

3~5 GHz 超宽带无电感 CMOS 低噪声放大器设计

王 巍, 官召英, 杨 铿, 马晓英, 唐政维, 王岳生

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 基于 TSMC 0.18 μm RFCMOS 工艺设计了一种无电感并联负反馈的超宽带低噪声放大器(LNA). 在 3~5 GHz 工作频率范围内, 电阻电流复用技术为整体电路提供自偏置, 使其在足够的带宽范围内均可实现较高增益; 同时噪声相消技术又可消除部分沟道热噪声, 在很大程度上降低了放大器的噪声系数. 由仿真结果可以看到: LNA 在 3~5 GHz 内实现了良好输入输出匹配和较好的线性度, 同时得到了较好的电压增益和噪声性能; 并且其在整个频带范围内增益达到 11~13.9 dB, 噪声系数小于 4.6 dB. 整个设计最大的优点是没有用到片上电感, 使得芯片面积大大缩小, 这对商业应用具有极大的吸引力.

关键词: 超宽带; LNA; 电流复用; 噪声相消; 有源电感

中图分类号: TN722.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)06-0130-04

Design of Inductorless CMOS Low Noise Amplifier for 3~5 GHz UWB Receiver

WANG Wei, GONG Zhao-ying, YANG Keng, MA Xiao-ying
TANG Zheng-wei, WANG Yue-sheng

(College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: A shunt feedback inductorless UWB LNA implemented in a 180 nm CMOS technology is here reported. Covering a 3 to 5 GHz band, the circuit uses resistive current reuse technique as self bias to obtain the relative gain within wide band, and the noise cancellation technique to cancel part of thermo noise in the channel, which can effectively lower NF over the desired UWB band. The simulation results showed that the designed LNA achieves a NF of 4.6 dB in the 3~5 GHz UWB band and a power gain of 11~13.9 dB. The active inductance design greatly reduces the chip size, which has great potential in commercial applications.

Key words: UWB; LNA; current reuse; noise canceling; active inductance

1 引言

超宽带(Ultra Wideband, UWB)无线传输系统具有传输容量大、功耗小、复杂性低, 以及具有对信道衰落不敏感、发射信号功率谱密度低、抗干扰性强、空间容量大、安全性高等优点, 引起了广泛的研究兴趣. 而低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)作为 UWB 无线接收系统中第一个电路模块, 若要求其能在强大外部干扰的环境下, 处理和接收微弱的射频信号, 它就必须要在宽频带范围内满足

高增益、低噪声的要求^[1].

在超宽带 LNA 电路设计时, 电感作为输入输出匹配元件被广泛使用, 但无源电感通常占用芯片较大面积, 例如, 一个 1~2 nH 的电感所占用的面积将会超过一个 LNA 电路中其余全部有源器件所占面积之和. 同时无源电感还有 Q 值低、成本高、不利于集成等缺点, 在很大程度上影响了电路性能. 因而无电感 LNA 的设计开始受到关注^[2-4], 逐渐成为近年来的研究热点.

在无电感的情形下, 可在 LNA 电路中引入反

馈电阻并采用电流复用技术来提高增益和拓宽频带.适当调整反馈电阻的大小,就可在整个设计频带范围内获得较高的增益和较低的噪声系数^[2].另外,对于电阻负反馈式 LNA 放大器,可以在不加入电感等其他元件的条件下就可以完成输入和输出网络的阻抗匹配.

本文针对电阻负反馈式结构,采用 TSMC 0.18 μm 工艺,设计了一种工作于 3~5 GHz 的无电感 CMOS 低噪声放大器.其中电流复用技术和噪声相消技术用来提高带宽、增益和噪声性能,有源电感用来实现输出匹配.

2 LNA 关键技术及电路设计

2.1 电路复用技术

最常见的电阻负载共源并联反馈放大器的电路结构如图 1(a)所示,其输入阻抗、电压增益、噪声因子及 -3 dB 带宽分别为^[3-4]

$$Z_{in} = \frac{R_f + r_{ds} // R_l}{1 + g_m (r_{ds} // R_l)} \quad (1)$$

$$A_v \approx -g_m (R_f // R_l // r_{ds}) \quad (2)$$

$$F \approx 1 + \frac{\gamma}{R_s g_m} + \frac{1}{R_s R_l g_m} + \frac{4R_s}{R_f} \left(1 + \frac{R_f + R_s}{(1 + g_m R_l) R_l}\right)^{-2} \quad (3)$$

$$BW_{-3\text{dB}} \approx \frac{1}{R_f C_{gs1}} + \frac{g_m (R_l P r_{ds})}{(R_f + R_l P r_{ds}) C_{gs1}} \quad (4)$$

由以上可知,若要同时提高 LNA 的电压增益和噪声性能,可增大反馈电阻 R_f 的值,但这会使得放大器的带宽变窄,也会影响放大管的偏置电压,无法保证其工作在饱和区.所以,要使 LNA 在足够带宽下获得较高的增益和较低的噪声系数,本文采用电流复用技术.此技术可增大 g_m 的值,以此达到提高 LNA 的增益和带宽的目的.一般的电流复用技术是将两个 MOS 管堆叠起来,如图 1(b)所示,通过共用同一偏置电流来节省功耗,最重要的是, P 型管可以节省大量的电压摆幅余度.同时,放大器的跨导也由 g_{mN} 变成 $g_{mP} + g_{mN}$,一定程度上提高了增益,增加了带宽^[4].

2.2 噪声消除技术

电流复用技术的使用一定程度上提高了 LNA 的增益和带宽,但分析式(3)可知,噪声性能并没有因为 g_m 的提高而得到改善,反而会因电流复用技术而变得更糟.于是,为了降低 LNA 的噪声系数,可以利用噪声消除技术来消除一部分噪声.噪声相

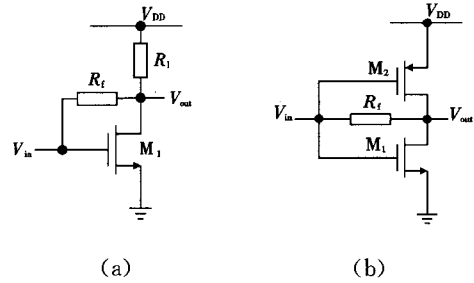


图1 电阻反馈放大器和电流复用结构

消技术的基本原理如图 2 所示,若其输入阻抗和电压增益分别为: $Z_{in} = 1/g_{m1} = R_s$, 且 $A_{V1} = V_B/V_A = 1 - g_{m1}R_f$, 则从晶体管 M_1 流出的一部分沟道噪声电流(设为 αi_{noise}^2 , 其大小取决于 g_{m1} 和 R_s), 经过 R_f 和 R_s 后, 便会在 A 和 B 节点处产生相同相位的噪声电压和相反相位的信号电压^[5]. 这种信号和噪声相位不同就可能利用匹配元件来消除噪声, 同时还可达到将信号幅值相加目的. 为了达到此目的, 就在 A 点增加一个负值的放大器, 并与 B 相连. 这样一个恰当的放大值将可使 M_1 的热噪声在输出端抵消. 此时 A、B 点噪声电压为

$$\overline{v_{A,noise}^2} = \alpha i_{noise}^2 R_s \quad (5)$$

$$\overline{v_{B,noise}^2} = \alpha i_{noise}^2 (R_s + R_f) \quad (6)$$

$$V_B = A_{V1} V_A = -|A_{V1}| V_A \quad (7)$$

从而输出端口的噪声电压为:

$$\overline{v_{out,noise}^2} = \overline{v_{A,noise}^2} + A_{V2}^2 \overline{v_{B,noise}^2} \quad (8)$$

选择合适的电压增益 A_{V2} 就能使得输出噪声电压为零, 从而达到消除噪声的目的. 令 $\overline{v_{out,noise}^2} = 0$, 则可以得出

$$A_{V2} = -\left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \quad (9)$$

然而由电阻 R_f 所引起的噪声电流流经 A 点部分可消除, 但流经 B 点噪声电流则不能被本结构消除. 所以,

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_A} = -\frac{2R_f}{R_s} \quad (10)$$

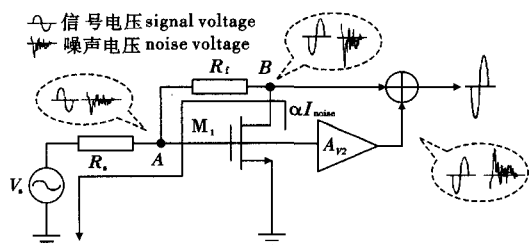


图2 技术原理

2.3 有源电感的设计

为了完成 LNA 的输出匹配,需要在负载端加入若干电感来进行匹配,本文采用 MOS 管构成的有源电感来代替无源电感.基本原理是利用 MOS 管构成的有源回转器电路的回转特性,进行电流和电压的相互转换,产生感性阻抗,以达到实现电感的目的^[6].

本文设计的有源电感及其等效电路结构如图 3 所示,它由两个不同类型的 MOS 管和一个电阻 R_p 构成,其中, M_1 能够将 V_{in} 转变为电流进而对 M_2 的栅源间电容 C_{gs2} 进行充电,同时 M_2 能够将栅源间的电压转变成输入电流,而得到呈感性的输入阻抗.等效电路中的各元件的值由有源电感中 R_p 的大小和管 M_1 、 M_2 的宽长比等参数共同决定,可以通过微调的方法来完成输出匹配.

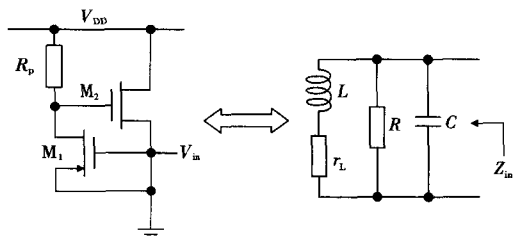


图 3 本文设计的有源电感及其等效电路

2.4 LNA 电路结构设计

本文设计的 LNA 的完整电路结构如图 4 所示.其中, M_1 、 M_2 和 R_f 组成的电流复用结构,为电路提供自偏置,通过两管共用同一偏置电流,在不额外增加偏置电路的前提下为电路节省了功耗,提高了增益和带宽,合理调整反馈电阻 R_f 及 MOS 管的宽长比便可实现良好的输入匹配.

在设计 LNA 结构中, M_3 、 M_4 和 M_5 分别为 M_2 栅端和漏端的噪声电压和信号电压提供增益放大,反相的信号电压和同相的噪声电压在经过提供负增益的共源放大器的多级放大后,在输出端口形成了同相的信号电压和反相的噪声电压.此为噪声相消技术.放大管产生的部分沟道热噪声可用此消除,因而降低了整体电路的噪声系数.若合理调整各 MOS 管的宽长比便可在保证较高增益的前提下消除部分噪声,达到提高电路噪声性能的目的.

而在负载端,由 M_6 、 M_7 和 R_p 构成的有源电感及电阻 R_q 为 LNA 提供了一定的输出阻抗,通过调节相应的参数值即可完成输出匹配. C_{out} 与 C_{in} 则是电路耦合电容.

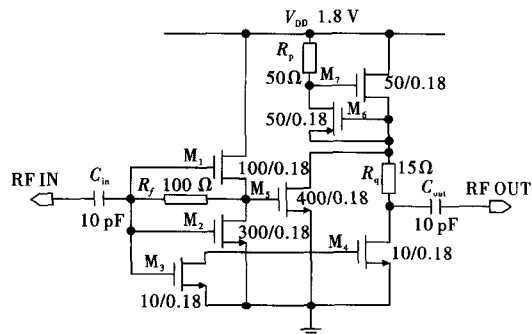


图 4 本文提出的 LNA 的完整电路结构

3 仿真结果分析与讨论

本文采用 TSMC 公司的 $0.18 \mu\text{m}$ 工艺库,利用 Cadence 软件的 Spectre RF 对图 5 所示的 LNA 完整电路结构进行仿真分析.利用史密斯圆图进行输入网络匹配,适当调整 M_1 、 M_2 管的宽长比和反馈电阻 R_f 的大小,使其输入反射系数保持在一 10 dB 以下; M_3 、 M_4 管参数相同,再对 M_5 管选取合适的宽长比,并加以调整,使电路在较大带宽范围内获得较低的噪声系数和较高的增益;为了使得输出反射系数小于 -10 dB,利用史密斯圆图进行输出匹配,以此来调整 M_6 、 M_7 管和电阻 R_p 、 R_q 的值,同时综合考虑其他参数的相互影响,微调其他元件的值.

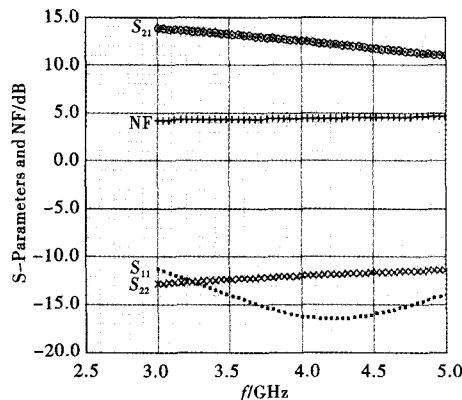


图 5 S 参数和 NF 仿真结果

仿真优化后得到的 LNA 的 S 参数、噪声系数 NF、1 dB 压缩点 P_{1dB} 以及三阶交调点 IIP_3 的仿真结果如图 5~7 所示.分析各图可以看出,电流复用结构为电路提供了较平坦的高增益,增益范围为 11~13.9 dB;利用噪声相消技术很大程度上提高了 LNA 的噪声性能,在无电感的电路得到的噪声系数只有 4.2~4.6 dB,并且在整个频带范围内的平坦度较好;而电阻负反馈放大器结构和有源电感实现了良好的输入输出匹配,输入输出反射系数均小

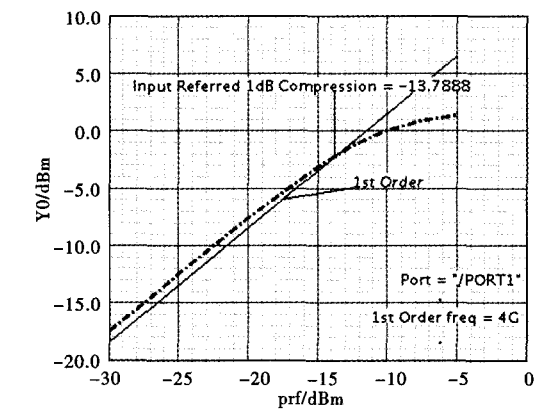


图 6 P_{1dB} 仿真结果

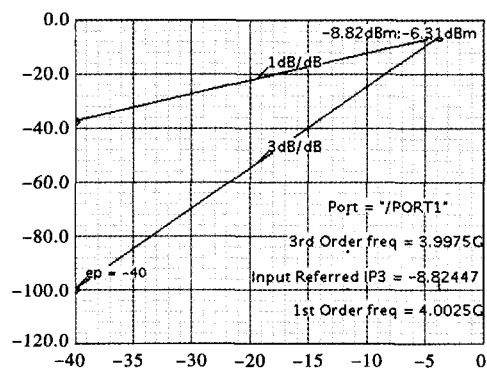


图 7 IIP3 仿真结果

表 1 本文结果与近年发表的几种超宽带 LNA 的性能比较

文献	CMOS 工艺	有无电感	带宽/GHz	S_{11} /dB	S_{22} /dB	S_{21} /dB	NF/dB	P_{1dB} /dBm	IIP3/dBm	功耗/mW
[3]	65 nm	无	1~10.5	<-10	N/A	<16.5	3.9~5	-13.5	-5	36
[7]	0.18 μ m	有	3~5	<-9	<-14	11~13.3	3.5~5.5	N/A	N/A	12.5
[8]	0.18 μ m	有	2~6.5	<-7.8	<-10	<11.9	4.1~4.6	N/A	N/A	27
本文	0.18 μ m	无	3~5	<-11.3	<-11.4	11~13.9	4.2~4.6	-13.8(4 GHz)	-8.8(4 GHz)	28

于-12 dB;同时,电路的线性度较好, P_{1dB} 和 IIP₃ 分别为-13.8 dBm 和-8.82 dBm.

本文所设计的 LNA 电路的版图结构如图 8 所示.表 1 所示为本文设计的 LNA 与已发表文献中的超宽带 LNA 的性能比较.从表中可以看出,本文所设计的 LNA 在网络匹配等参数上优于已有的 LNA 设计,虽然噪声系数稍高,但是由于无电感的使用,换来了较小的芯片面积,节约了生产成本.

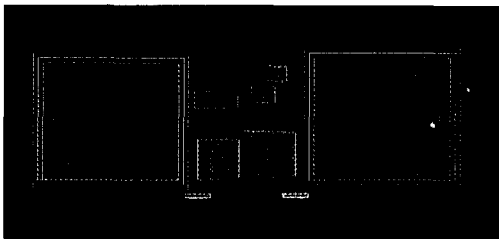


图 8 本文提出的 LNA 结构的版图

4 结束语

本文从增益、带宽和噪声分析出发,详细介绍了一种工作于 3~5 GHz 的无电感的超宽带并联反馈放大器的设计,采用了电流复用技术来获得高带宽范围内的较高增益,并利用噪声相消技术改善噪声

系数,同时设计了一种有源电感来取代无源电感,实现输出匹配功能.文章最后采用 TSMC 0.18 μ m 工艺利用 Cadence 软件对 LNA 进行了优化设计和仿真分析,结果表明:本文所设计的 LNA 在保证良好的输入输出匹配和较好线性度的前提下,实现了较高的电压增益和较好的噪声性能,在整个频带范围内噪声系数小于 4.6 dB,增益达到 11~13.9 dB.

参考文献:

[1] 曾卿铭. 3.1~10.6 GHz 超宽带接收机前端电隔之研究[M]. 台湾:国立中央大学电机工程研究所,2006.

[2] Lee, Cressler JD. Analysis and design of an ultra-wideband low-noise amplifier using resistive feedback in SiGe HBT technology[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(3): 1262-1268.

[3] Hampel S K, Schmitz O, Tiebout M, et al. Inductorless 1~10.5 GHz wideband LNA for multistandard applications[C]// IEEE Asian on Solid-State Circuits Conference, TaiBei; IEEE, 2009: 269-272.

[4] Taris T, Begueret JB, Deval Y, et al. A low voltage current reuse LNA in a 130nm CMOS technology for UWB applications[C]// Microwave Conference, European, Munich; IEEE, 2007: 1105-1108.

对应关系,修正星地测控信号接收理论估计值,得到更为真实的星地测控信号质量的预测情况,如图4、图5所示。

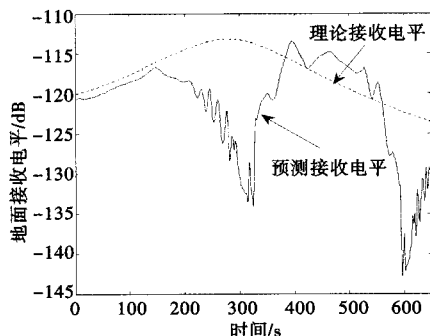


图4 主动段地面站接收卫星信号电平曲线

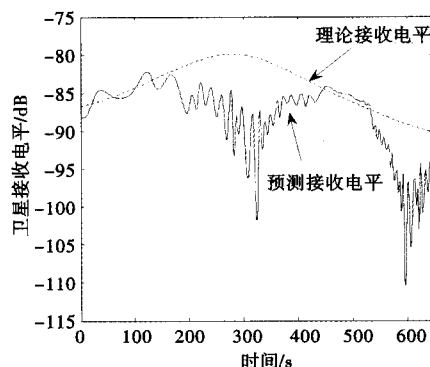


图5 主动段卫星接收地面站信号电平曲线

6 结束语

本文通过仿真分析,验证了利用 Kalman 滤波理论预测主动段卫星飞行弹道的应用效果,并在此基础上,建立了主动段星地测控天线轴向夹角模型,并利用卫星天线辐射方向图,实现了星地测控信号质量的

预测目标。该方法不仅适用于任务准备阶段开展应急预案设置,也适用于任务实施过程中的状态监视与判决,可为地面指挥人员提供科学的信息支持。

参考文献:

- [1] 胡世祥,段双泉. 外弹道测量数据处理[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 王晓蓉. 弹道修正火箭弹系统弹道卡尔曼滤波研究[D]. 山西:中北大学,2009.
- [3] 胡宏灿,郭立. 卡尔曼滤波器在导航系统初始对准中的应用[J]. 微电子学与计算机,2006,23(2):163-165.
- [4] 周凤岐,卢晓东. 最优估计理论[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [5] Kalman-RE. A new approach linear filtering and prediction Problem[J]. Trasaction of the ASME-Journalk of Basic Engineering, 1960;35-45.
- [6] 蒋大为. 空间解析几何及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [7] 宋铮. 天线与电波传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [8] 叶云裳. 航天器天线[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007.

作者简介:

张焱男,(1982—),硕士研究生,工程师. 研究方向为航天器测量与控制工作。

龚宜男,(1988—),硕士研究生. 研究方向航天器导航制导与控制。

王巧女,(1982—),工程师. 研究方向为航天器在轨运行管理工作。

(上接第133页)

- [5] Bruccoleri F, Klumperink E A M, Nauta B. Wideband CMOS low-noise amplifier exploiting thermal noise canceling[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004; 275-282.
- [6] Gray P R. Analysis and design of analog integrated circuits[M]. New York: Wiley, 2001; 335-375.
- [7] Su J-F, Fu Z-Q, Yuan H-Q, et al. An ultra-wideband CMOS low noise amplifier for 3~5 GHz UWB wireless receivers[C]// proceedings of the 7th International Conference on ASIC 2007 proceedings of the [S. I.]: IEEE, 2007.

- [8] Jung J, Chung K, Yun T, et al. Ultra wideband low noise amplifier using a cascade feedback topology [C] //Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems Dig, [s. l.]: IEEE,2006;202-205.

作者简介:

王魏男,(1967-),博士,教授. 研究方向为新型半导体器件、射频电路设计、微波器件、半导体工艺及设备。

宫召英女,(1986-),研究生. 研究方向为集成电路设计。