

一种 CMOS 超宽带 LNA 的优化设计方法

刘萌萌¹, 张 盛², 王 硕¹, 张建良¹, 周润德¹

(1 清华大学微电子学研究所, 清华大学信息科学与技术国家实验室
微电子学部, 北京 100084; 2 清华大学深圳研究生院, 广东深圳 518055)

摘 要: 为实现性能更优的超宽带(UWB)射频前端低噪声放大器(LNA), 本文提出了一种通用的基于 CMOS 工艺的超宽带 LNA 优化设计方法. 基于源端电感负反馈的 LNA 电路模型, 本文提出利用最优化的数学方法分别确定晶体管尺寸、输入匹配网络和负载网络各元件参数的方法, 实现了较好的输入阻抗匹配, 达到了较高的增益、较好的增益平坦度以及优秀的噪声系数, 并具有较低的功耗; 本设计方法所用无源元件不但适宜 CMOS 集成, 而且对工艺偏差具有一定的忍耐力. 仿真结果说明用上述方法设计的超宽带 LNA 在工作频带内能够达到预期的各项性能要求.

关键词: 射频前端低噪声放大器; 超宽带; 优化设计方法; CMOS

中图分类号: TN402; TN432 文献标识码: A 文章编号: 037222112 (2009) 051082205

An Optimization Design Methodology for CMOS UWB LNA

LIU Mengmeng¹, ZHANG Sheng², WANG Shuo¹, ZHANG Jianliang¹, ZHOU Run2de¹

(11 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China ;
21 Shenzhen Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: An optimization methodology is proposed for designing ultra-wideband (UWB) low noise amplifier (LNA) in CMOS technology to achieve better performance of LNA in UWB RF front-end. Based on the circuit model of inductively source degenerated LNA, we present a design method using mathematics optimization technology to get optimum transistor size and component value in input matching net and load net, leading to fine input matching, adequate and flat gain, excellent noise performance as well as low power consumption. Meanwhile, the passive components in the proposed circuit can be implemented easily in CMOS technology with tolerance of process variation. Simulation results show that UWB LNA using this design methodology can achieve expectable performance.

Key words: low noise amplifier (LNA); ultra-wideband (UWB); optimization design methodology; CMOS

1 引言

超宽带(UWB)技术具有功耗低、速度快、保密性好等优点, 在战场通信、精确定位、个人局域网等领域有其独特的优势^[1]. 用于 UWB 接收机的 LNA 需要满足以下要求: 在宽带范围内实现输入阻抗的匹配以避免能量损耗和对天线的反射干扰; 具有低的噪声系数以提高接收机的灵敏度; 具有足够的增益幅度和平坦度以减少后级电路的噪声影响以及非线性失真; 具有较低的功耗.

相对于普通窄带 LNA, 超宽带 LNA 实现的难点在于需要使用一定数量的无源元件(主要是 L、C)来实现宽带输入匹配和宽带平坦增益. 由于 CMOS 工艺在实现无源元件时存在较明显的工艺偏差, 所以电路性能对工艺偏差的忍耐力也应该在设计中加以考虑. 此外, 超宽带 LNA 的噪声性能以及增益的表达式都和窄带 LNA 不

同, 因此超宽带放大器晶体管最优尺寸的确定也需要通过对噪声性能、增益以及功耗的分析重新确定.

已有超宽带 LNA 的研究成果^[3~8], 仅限于电路设计和性能测试而缺少就超宽带 LNA 各部分对整体性能影响的分析, 而且都未提出一套系统完整的超宽带 LNA 的优化设计步骤和方法, 也未在设计中考虑工艺偏差的影响和解决办法. 本文通过超宽带 LNA 的噪声性能、增益以及功耗的理论分析, 通过最优化的数学理论提出了确定超宽带 LNA 晶体管最优尺寸的方法, 以及输入匹配网络和负载网络中各电路最优参数的优化设计方法; 在源端电感负反馈 LNA 的基础上分别对放大器晶体管尺寸、源端反馈电感、输入滤波网络和负载网络的各元件参数进行设计, 以达到较好的输入阻抗匹配度、较好的增益幅度和增益平坦度、优秀的噪声性能以及较低的功耗, 同时对工艺偏差具有一定的容忍能力.

2 超宽带 LNA 的优化设计方法

2.1.1 概述

LNA 的拓扑结构有很多种, 本文选用源端电感负反馈(源简并)结构的 LNA, 其原因在于这种结构的 LNA 用电抗元件产生实数的输入阻抗而不引入额外的噪声^[2]. 源简并超宽带 LNA 的电路结构如图 1 所示, 图中省去了偏置网络.

超宽带 LNA 的电路可以分为 4 部分: 放大器晶体管、输入匹配网络、负载网络和输出 buffer. 放大器晶体管的设计目标是确定晶体管的尺寸, 在较小的功耗下得到较低的噪声系数以及较高的增益; 输入匹配网络的设计目标是在宽带内得到输入阻抗的匹配, 同时不引入额外噪声; 负载网络的设计目标是在宽带内得到较高较平坦的增益; 输出 buffer 在驱动电阻性负载(如镜像抑制滤波器)时是必需的, 其作用在于提供和后级匹配的输出阻抗. 本部分将重点对上述前三个部分进行分析并给出完整有效的优化设计方法.

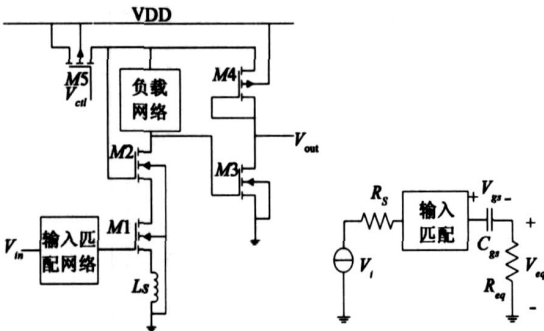


图1 LNA的电路结构 图2 超宽带LNA的等效输入网络

2.1.2 放大器晶体管设计

在源简并结构的超宽带 LNA 中, 放大器的晶体管尺寸以及源端电感 L_s 的取值对于 LNA 的增益、噪声系数和功耗等性能具有很大的影响.

源简并 LNA 利用反馈电感 L_s 产生实数的输入阻抗^[2]:

$$R_{eq} = X_f I_S = \frac{g_m}{C_{gs}} L_s \quad (1)$$

其中 X_f 为晶体管的截止频率, 取决于工艺而和晶体管尺寸无关, g_m 为晶体管的跨导. 输入网络如图 2 所示.

其中 V_i 为输入电压, C_{gs} 为放大管的栅源电容, V_{gs} , V_{gs} 分别为 R_{eq} 和 C_{gs} 两端的电压.

输入网络的品质因子为:

$$Q = \frac{1}{X_{C_{gs}} R_{eq}} \quad (2)$$

经过推导, 在理想输入匹配条件下, 超宽带 LNA 的电压增益为:

$$A_v = \frac{g_m}{4 X_{C_{gs}} \sqrt{R_s R_{eq}}} R_{out} = \frac{X_f}{4 X_{C_{gs}}} \sqrt{\frac{1}{R_s R_{eq}}} R_{out} \quad (3)$$

其中 V_{out} 为输出电压, R_{out} 为放大器的输出电阻. 可见超宽带 LNA 的电压增益与放大器的跨导 g_m 无关, 而与 $\sqrt{R_{eq}}$ 成反比.

根据二端口网络的噪声模型和 MOS 管的噪声模型^[2], 我们得到具有图 2 所示输入网络的超宽带 LNA 的噪声系数为:

$$F_{U1} + \frac{A Q (1 - |c|^2) R_s}{J g_m R_{eq}^2} + \frac{R_s^2 C}{R_{eq} A} \left(\frac{X_f}{X} \right)^2 g_m \left(R_{eq} + \frac{1}{J g_m} \right)^2 \left(\frac{1}{R_{eq}} + \frac{1}{R_s} \right)^2 \quad (4)$$

其中 C, A, J, c, D 为由工艺决定的常数, R_s 为特征阻抗, 取 50Ω. 式(4)中忽略了输入匹配网络引入的噪声.

由式(4)我们可以看到对于确定的 R_{eq} , 存在最优的 g_m 使噪声系数最小. 对式(4)关于 g_m 求偏导并令其为 0, 并认为 $R_{eq} \approx \frac{1}{J g_m}$, 可得到一定的 R_{eq} 值下 g_m 的最优值:

$$g_{mpt} = \sqrt{\frac{D (1 - |c|^2)}{J C}} A \left(\frac{X_f}{X} \right) \frac{R_s}{R_{eq}^2 + R_{eq} R_s} \quad (5)$$

此时的最优噪声系数为:

$$F_{min} = 1 + \sqrt{\frac{D (1 - |c|^2) C}{J}} \left(\frac{X_f}{X} \right) \left(2 + \frac{R_s}{R_{eq}} \right) \quad (6)$$

图 3 为 5GHz 频率下, R_{eq} 取不同值时得到的噪声系数 NF 和跨导 g_m 的关系:

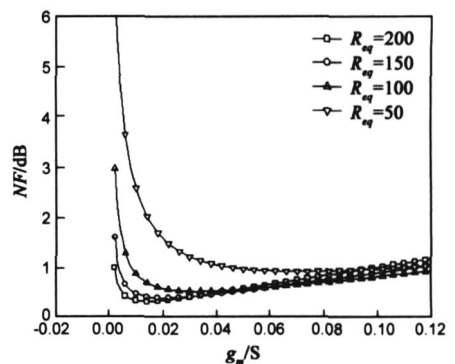


图3 不同Req下的噪声系数和跨导的关系

其中纵坐标 $NF = 10 \lg(F)$. 图 3 中 $R_{eq} = 50\Omega$ 的情况对应于^[2]中经典的窄带 LNA 的噪声理论, 可见对于经典的源简并窄带 LNA, 噪声系数 NF 达到最优时的跨导值 g_m 较大^[2]. 因此经典的源简并窄带 LNA 在其跨导值使噪声性能最优时会导致很大的功耗. 但从图 3 中我们可以看到当 R_{eq} 增大时, 使噪声性能最优的跨导值 g_m 变小, 最优的噪声系数 NF 也同时变小, 这样我们就可以在较小的 g_m 情况下同时获得较低的功耗和较小的噪

声系数.

因此由式(5)和图3,选择较大的 R_{eq} 值可以使超宽带 LNA 在较低的功耗下得到很好的噪声性能. 而由式(3)可知,较大的 R_{eq} 会使 LNA 增益有所下降. 由式(2),输入网络的 Q 值反比于 R_{eq} , 这意味着较大的 R_{eq} 将有利于宽带输入匹配网络的设计,而较小的 R_{eq} 会增大输入匹配网络的设计难度. 下一小节将就输入匹配网络的设计继续讨论 R_{eq} 的选取原则.

由上可知,对于源筒并结构的超宽带 LNA,选择适当较大的 R_{eq} 值在牺牲一些增益的同时可带来低的功耗和优秀的噪声性能,也降低了输入匹配网络的设计难度.

2.1.3 输入匹配网络的设计

在超宽带 LNA 中,输入匹配网络的作用是在 INA 的工作带宽内实现输入阻抗的匹配,以避免对天线/射频滤波器的干扰.

图1所示的源筒并放大电路,其输入端的等效小信号电路如图4(a)所示,输入阻抗可等效为一个串联的 RLC 网络.

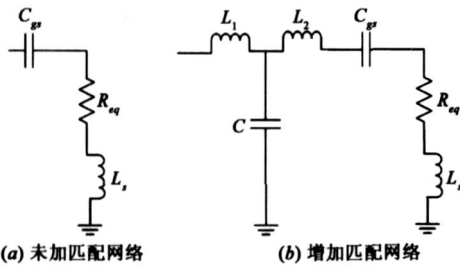


图4 输入网络的等效小信号电路

图4(a)所示串联 RLC 网络的 Q 值较高,不可能实现 GHz 以上的宽带匹配,所以必须使用 LC 滤波网络以实现宽带的输入匹配. 本文以图4(b)所示三阶 T 型 LC 滤波网络为例来说明输入匹配网络的优化设计方法,所述方法同样适用于更高阶或其他拓扑结构的滤波网络.

图4(b)所示三阶 T 型匹配网络的各元件参数,可根据 LNA 工作频带以及输入匹配性能的要求,通过如下所述的最优化数学方法确定.

输入网络的匹配程度可由 S_{11} 来表示,

$$S_{11}(L_1, L_2, C, R_{\text{eq}}, f) = \frac{Z_m(L_1, L_2, C, R_{\text{eq}}, f) - R_S}{Z_m(L_1, L_2, C, R_{\text{eq}}, f) + R_S} \quad (7)$$

由式(7)可以看到, S_{11} 为 L_1 、 L_2 、 C 、 R_{eq} 和频率 f 的函数. 超宽带 LNA 工作带宽内对输入阻抗匹配的要求可以近似地用 S_{11} 在带宽内一些频点上的值来表示:

$$S_{11}(L_1, L_2, C, R_{\text{eq}}, f_i) < k, i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (8)$$

其中 f_i 为工作频带内的 $n+1$ 个 n 等分点频点, k 代表匹配精度的要求. 由于 CMOS 工艺对电感、电容等无源元件的参数有较严格的限制,取值不合理的无源元件

将造成面积过大或者精度无法保证而不适于 CMOS 的实现,因此在求解式(8)时需要 L 、 C 的值作出一定的限制,此外由于 CMOS 工艺中无源元件的工艺偏差较大,电路需要对工艺偏差具有一定的容忍能力,在式(8)的基础上再增加一个表征工艺偏差容忍能力的约束条件,即:

$$\begin{cases} P L_1^i I [(1 - e_l) L_1, (1 - e_l) L_1], L_2^i I [(1 - e_l) L_2, (1 - e_l) L_2], C^i I [(1 - e_c) C, (1 - e_c) C] \\ S_{11}(L_1^i, L_2^i, C^i, R_{\text{eq}}, f_i) < k, i = 1, 2, \dots, n+1 \\ L_1, L_2 I [L_1, L_h], C I [C_l, C_h] \end{cases} \quad (9)$$

其中 L_l 、 L_h 、 C_l 、 C_h 分别为易于 CMOS 实现的电感和电容值的下限和上限, e_l 、 e_c 为需要容忍的电感和电容的工艺偏差. 对式(9)搜索求解,就可以得到满足要求的输入匹配网络.

值得注意的是,并非所有 3 阶滤波器的拓扑结构对于任意的 k 、 e 值和工作频带都存在满足式(9)的元件取值. 事实上,滤波器拓扑结构和阶数的选择依赖于滤波器设计的经验和初步计算,更严格、更宽频带或者更高工艺偏差容忍度的输入匹配网络需要通过增加滤波网络的阶数并重新进行参数搜索来获得.

2.1.4 负载网络设计

负载网络的阻抗特性直接影响超宽带 LNA 的功率增益幅度和工作带宽内的增益平坦度. 本文从理论分析出发,以图5所示的 RLC 网络为例说明超宽带 LNA 负载网络的优化设计方法,该方法同样适用于其他结构的负载网络设计.

图5所示的负载等效电路中, R_0 和 C_0 分别为放大电路的输出电阻和输出电容,负载网络由 R_L 、 L 、 C_L 构成. R_L 是为扩展频带而增加的与电感串联的电阻,通常 $R_0 \ll R_L$. 和输入匹配网络相似,本文将采用最优化数学方法确定负载网络的各元件参数.

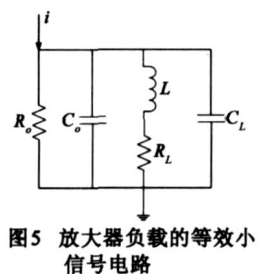


图5 放大器负载的等效小信号电路

输入匹配网络的各元件参数和放大器晶体管的尺寸确定后,放大器的输出电流为:

$$I(f) = g_m @ V_{gs}(f, V_i) = \langle f \rangle @ V_i \quad (10)$$

其中 $\langle f \rangle$ 为频率 f 的一个确定的函数.

由于负载阻抗为 L 、 C 、 R_L 和频率 f 的函数,因此超宽带 LNA 的功率增益 S_{21} 可表示为:

$$\begin{aligned} S_{21}(f, L, C_L, R_L) &= \frac{V_{\text{out}}(f, L, C_L, R_L)}{V_i} \\ &= \langle f \rangle @ Z_L(f, L, C_L, R_L) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 V_{out} 为输出电压. 由式(11)知, S_{21} 为 L 、 C 、 R_L 和频

率 f 的函数. 若将超宽带 LNA 的工作频带记为 $[f_1, f_h]$, 在此带宽内对功率增益和工作频带内增益平坦度的要求可以近似地用 S_{21} 在频带内的幅值大小和波动来表示, 即:

$$\begin{cases} \max(S_{21}(f, L, C_L, R_L)) > A \\ \max(S_{21}(f, L, C_L, R_L)) - \min(S_{21}(f, L, C_L, R_L)) < d \end{cases} \quad f \in [f_1, f_h] \quad (12)$$

其中 A 为功率增益幅度的要求, d 为平坦度的要求. 和输入匹配网络的优化设计方法相似, 在 L, C_L, R_L 允许的范围内搜索满足式(12)的 L, C_L, R_L 的取值, 再加上对工艺偏差容忍能力的要求, 我们得到:

$$\begin{cases} \max(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) > A \\ \max(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) - \min(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) < d \\ f \in [f_1, f_h], L \in [L_l, L_h], C_L \in [C_l, C_h] \end{cases} \quad (13)$$

搜索满足式(13)的元件取值, 我们就可以满足工作频带内对功率增益幅度和增益平坦度的要求, 同时满足元件取值的合理性和对工艺偏差的鲁棒性. 同样, 如果满足式(13)的元件取值不存在, 则需要变换负载网络重新进行搜索.

215 输出 buffer 的设计

当超宽带 LNA 驱动电阻负载时, 输出 buffer 需要提供 50 Ω 的输出阻抗. 我们可以采用以二极管为负载的共源放大电路作为 buffer, 利用负载二极管的 $1/g_m$ 得到 50 Ω 的输出阻抗, 如图 1 所示.

216 超宽带 LNA 优化设计方法

由上述讨论, 我们把超宽带 LNA 的设计步骤和方法归纳如下:

(1) 根据式(4)和所采用的工艺参数作出图 3, 结合式(3)所示的增益以及式(2)所示输入网络的 Q 值确定 R_{eq} 的值, 继而根据式(1)确定源端反馈电感 L_s 的值. 确定 R_{eq} 后, 根据式(5)和图 3 选择最优的跨导 g_m , 从而确定晶体管的尺寸.

(2) 搜索满足式(9)的元件取值, 完成输入匹配网络和反馈电感的设计:

$$\begin{cases} P L_i^c I [(1 - e_L) L_1, (1 - e_L) L_1], L_2^c I [(1 - e_L) L_2, (1 - e_L) L_2], C^c I [(1 - e_C) C, (1 - e_C) C] \\ S_{11}(L_1^c, L_2^c, C^c, R_{eq}, f) < k, i = 1, 2, \dots, n + 1 \\ L_1, L_2 \in [L_l, L_h], C \in [C_l, C_h] \end{cases}$$

如果搜索不成功则改变匹配网络的拓扑结构或放宽性能要求重新进行搜索.

(3) 搜索满足式(13)的元件取值, 完成负载网络的

设计:

$$P R_i^c I [(1 - e_R) R_L, (1 + e_R) R_L], L^c I [(1 - e_L) L, (1 + e_L) L], C_L^c I [(1 - e_C) C_L, (1 + e_C) C_L]$$

$$\begin{cases} \max(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) > A \\ \max(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) - \min(S_{21}(f, L^c, C_L^c, R_L^c)) < d \\ f \in [f_1, f_h], L \in [L_l, L_h], C_L \in [C_l, C_h] \end{cases}$$

如果搜索不成功则改变负载网络的拓扑结构或放宽性能要求重新进行搜索.

(4) 合理选择输出 buffer 晶体管的尺寸, 使 $1/g_m = 50\Omega$ 完成输出 buffer 的设计.

3 电路设计举例

美国联邦通信委员会(FCC)规定的超宽带(UWB)通信的频谱范围为 311~1016GHz^[9]. 本文基于 SMIC 0113Lm 的 CMOS 工艺, 按照上述超宽带 LNA 的优化设计方法分别设计了工作在 3~5GHz 和 3~10GHz 的两个超宽带 LNA.

图 6 为用上述方法所设计的超宽带 LNA 的电路结构. 为了获得更宽频带的输入匹配, 输入匹配网络在图 4(b)的 T 型匹配网络的基础上增加了 C_1 和 L_1 , 构成了五阶输入匹配网络.

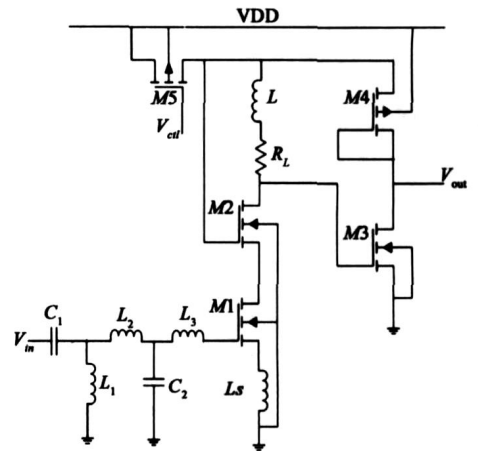


图6 超宽带LNA的电路结构

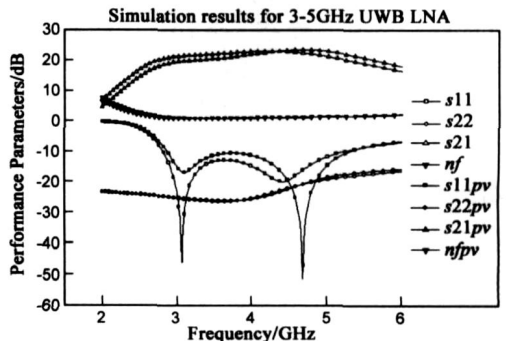


图7 3-5GHz超宽带LNA的性能仿真结果(pv表示无源元件存在20%工艺偏差的一种情况)

图 7、8 是这两个超宽带 LNA 的 S 参数和噪声系数的仿真结果, 仿真结果表明, 分别工作在 3~5GHz 和 3~10GHz 的两个超宽带 LNA 在工作频带内具有良好的噪声、输入阻抗匹配、功率增益以及功耗等性能指标, 同时对工艺偏差都具有一定的忍耐能力. 表 1 为本文工作与已发表的超宽带 LNA 的比较.

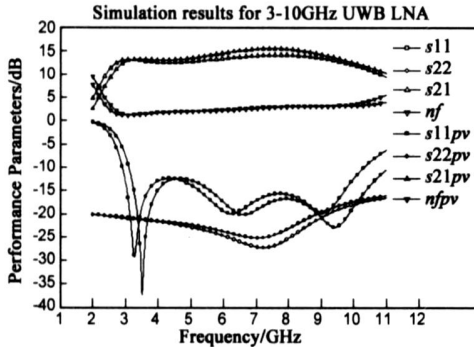


图 8 3-10GHz超宽带LNA的性能仿真结果(pv表示无源元件存在10%工艺偏差的一种情况)

表 1 超宽带 LNA 的性能比较

| REF | TECH (Lm) | BW (GHz) | S ₁₁ (dB) | S ₂₁ (dB) | NF max (dB) | NF min (dB) | Power (mW) | Tolerance of process variation | | | | |
|------------|-----------|----------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|------------|--------------------------------|------|------|------|-----|
| [3] | 0118 | 31121117 | < - 9 | 3 | 11 | 5 | 4 | 8 | 31 | 4 | 612 | N/A |
| [4] | 0118 | 312611 | < - 11 | 12 | 5 | 6 | 4 | 7 | 10 | N/A | | |
| [5] | 0118 | 224 | 6 | < - 9 | 10 | 6 | 5 | 2 | 21 | 3 | 1216 | N/A |
| [6] | 0113 | 3210 | 7 | < - 10 | 11 | 3(aver) | 21 | 2 | 418 | N/A | | |
| [7] | 0118 | 312241 | 8 | < 210 | 17 | 9 | 11 | 6 | N/A | 1312 | N/A | |
| [8] | 0113 | 01261 | 5 | < 210 | 19 | 4 | 2 | 3 | 1117 | N/A | | |
| This work1 | 0113 | 325 | < 214 | 22 | 11 | 5 | 11 | 0 | 4 | 25% | | |
| This work2 | 0113 | 3210 | < 210 | 14 | 3 | 5 | 11 | 3 | 4 | 15% | | |

4 结论

超宽带无线通信对 CMOS 工艺集成的 LNA 电路提出了新的要求, 本文就超宽带 LNA 的各组成部分以及它们对整体性能的影响进行了理论分析, 并在此基础上提出了一种系统有效的 CMOS 超宽带 LNA 的优化设计方法, 可分别对放大器晶体管的尺寸、源极反馈电感、输入匹配网络和负载网络进行优化设计. 利用此方法设计的两个分别工作在 3.25GHz 和 3210GHz 的 CMOS 超宽带 LNA, 能够达到预期的噪声、匹配、功耗、对抗工艺偏差的性能, 说明上述设计方法在设计阶段具有有效的指导意义.

参考文献:

[1] 田玲, 朱红兵, 洪伟. 超宽带射频接收机的研制[J]. 电子学报. 2007, 35(10): 1838- 1842.

Tian Ling, Zhu Hongbing, Hong Wei. Research on UltraWideband RF receiver[J]. Acta Electronica Sinica. 2007, 35(10): 1838- 1842. (in Chinese)

[2] Baoyong Chi, Zhiping Yu, Bingxue Shi. Analysis and Design of CMOS RF Integrated Circuits[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[3] Reja M. et al. A New CMOS 3. 211. 7 GHz Low Power LNA for UltraWideband Wireless Applications[C]. New Orleans, ISCAS, 2007. 1453- 1456.

[4] Chang Tsung Fu. et al. 3~ 11- GHz CMOS UWB LNA Using Dual Feedback for Broadband Matching[C]. San Francisco, IEEE RadioFrequency Integrated Circuits (RFIC) Symp., 2006. 49- 52.

[5] C2W Kim, M S Kang, P T Anh, H T Kim, S G Lee. An ultra wideband CMOS low noise amplifier for 3- 5GHz UWB system[J]. IEEE J. SolidState Circuits, 2005, (40): 544- 547.

[6] Y Wang, J S Duster, K T Komegay. Design of an ultra wideband low noise amplifier in 0.13um CMOS[C]. Kobe, ISCAS 2005. 5067- 5070.

[7] R Molavi, S Mirabbasi, M Hashemi. A wideband CMOS LNA design approach[C]. Kobe, ISCAS 2005. 5107- 5110.

[8] S Chehrizi, A Mirzaei, R Bagheri, A Abidi. A 61.5 GHz wideband CMOS low noise amplifier for multiband use[C]. San Jose, IEEE CICC, 2005. 801- 804.

[9] FCC. FCC notice of proposed rule making, revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra wideband transmission systems[S]. Washington DC, ETDocket, 2002. 98- 153.

作者简介:



刘萌萌 男, 1985 年出生于安徽, 清华大学微电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为射频及数模混合信号 CMOS 集成电路设计.
Email: liumm06@mails.tsinghua.edu.cn



张盛 男, 1975 年出生于重庆, 清华大学深圳研究生院讲师. 2004 年在清华大学微电子学研究所获博士学位. 主要研究方向为低功耗无线通信技术及芯片实现、低功耗 VLSI 设计、超宽带无线通信技术.