

## 基于噪声抵消技术的宽带低噪声放大器设计

唐学锋, 马陈燕, 蒋林华

(湖州师范学院 信息与工程学院, 浙江 湖州 313000)

**摘 要:** 采用  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺, 针对 DMB-T/H 标准数字电视调谐器应用, 设计了一个基于噪声抵消技术的宽带低噪声放大器. 详细分析了噪声抵消技术的原理, 给出了宽带低噪声放大器的设计过程. 仿真结果表明, 在  $48\sim 862\ \text{MHz}$  频率范围内输入输出反射系数均小于  $-20\ \text{dB}$ , 噪声系数低于  $3\ \text{dB}$ , 增益大于  $17\ \text{dB}$ ,  $1\ \text{dB}$  压缩点为  $-6\ \text{dBm}$ . 在  $1.8\ \text{V}$  电压下, 电路功耗为  $10.8\ \text{mW}$ .

**关键词:** 低噪声放大器; 噪声抵消技术; CMOS

**中图分类号:** TN722.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2013)01-0135-04

## Design of Wideband Low Noise Amplifier Based on Noise-Canceling Technique

TANG Xue-feng, MA Chen-yan, JIANG Lin-hua

(School of Information and Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** A wideband low noise amplifier (LNA) based on Noise-Canceling technique is presented in this paper. The LNA is designed for DMB-T/H Digital TV tuner based on  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS process. Noise-Canceling technique is analyzed in detail and the design flow of LNA is presented. The simulation results show that in the range of  $48\sim 862\ \text{MHz}$ , input reflection and output reflection are less than  $-20\ \text{dB}$ , the noise figure is lower than  $3\ \text{dB}$ , and the voltage gain is higher than  $17\ \text{dB}$ . The input-referred  $1\ \text{dB}$  compression point is  $-6\ \text{dBm}$ . The circuit consumes  $10.8\ \text{mW}$  with a  $1.8\ \text{V}$  power supply.

**Key words:** low noise amplifier; noise-canceling technique; CMOS

### 1 引言

数字电视在我国的发展风起云涌, 自广电总局的国标 DMB-T/H 发布至今, 我国已经有多家公司研发成功了 DMB-T/H 标准的数字信道解调 (Demodulator) 芯片, 但是在数字电视接收系统中非常重要的宽带射频调谐芯片 (Broadband Tuner) 还是几乎全部依靠国外进口. 宽带射频调谐芯片是指可以连续地接收整个 UHF 和 VHF 频段 ( $48\sim 862\ \text{MHz}$ ) 的射频调谐器<sup>[1]</sup>. 研发具有自主知识产权的适用于 DMB-T/H 标准的数字电视射频调谐器芯片已成为提升我国数字电视产业国际竞争力的一个关键环节, 也是我国数字电视产业发展过程中迫切

需要解决的问题.

低噪声放大器 (LNA) 是射频调谐器的第一级有源电路, 它的性能对整个调谐器系统的性能起着决定性的作用. 它必须在一定的频带范围内实现输入阻抗匹配、提供平坦的增益、引入尽可能低的噪声, 并保证有足够的线性范围容纳可能出现的输入信号幅度变化. 针对 DMB-T/H 标准数字电视射频调谐器应用, 低噪声放大器必须覆盖包括 UHF 和 VHF 的宽频段范围. 本文分析了宽带低噪声放大器的各种拓扑结构, 针对 DMB-T/H 标准数字电视调谐器应用, 采用  $0.18\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺设计一款基于噪声抵消技术的宽带低噪声放大器.

## 2 宽带 LNA 结构分析

目前常用的宽带低噪声放大器结构主要有:(1)分布式结构,采用传输线实现宽带匹配,一般为多级结构,功耗大,不适宜便携式低功耗应用<sup>[2]</sup>;(2)电阻并联负反馈结构,它在共源放大结构基础上引入了电阻并联反馈回路,降低输入端的品质因子,从而提高输入阻抗匹配网络的带宽,缺点是高功耗和高噪声<sup>[3]</sup>;(3)带通滤波器匹配网络共源共栅结构,在输入端增加一级宽带匹配网络,通常可以选用 Chebyshev 和 Butterworth 带通滤波器.这种结构可以达到很宽的带宽、平坦的增益、较低的噪声,但它需要电感电容无源器件,这些无源器件片上实现会占用大量芯片面积,片外实现则会增加电路成本<sup>[4]</sup>;(4)共栅结构,通过跨导  $g_m$  来实现宽带匹配,电路线性度高,其缺点是噪声系数较高<sup>[5]</sup>.

## 3 噪声抵消技术原理

对低噪声放大器而言,当电路输入阻抗( $Z_{in}$ )等于信号源阻抗( $R_S$ )时,可以实现输入最大功率传输,即功率匹配.而经典两端口网络噪声理论指出当电路输入阻抗( $Z_{in}$ )等于电路最优信号源阻抗( $Z_{opt}$ )时,电路可以获得最佳噪声性能,即噪声匹配<sup>[6]</sup>.然而,采用上述结构的宽带低噪声放大器难以同时做到功率匹配和噪声匹配.对于传统的电阻并联反馈共源结构 LNA,由于  $Z_{opt}$  不等于  $R_S$ ,因此噪声匹配和功率匹配难以同时达到.本文设计的宽带低噪声放大器在电阻并联反馈共源结构的基础上采用噪声抵消技术<sup>[7]</sup>消除输入 MOS 管的沟道热噪声在输出的贡献,使得在整个工作频段范围内满足输入阻抗匹配的条件下,达到较低的噪声系数,同时满足电压增益、线性度等指标要求.由于该电路不需要片内电感,减小了芯片面积,降低了流片成本.

考虑图 1 所示的带电阻反馈共源放大电路(实线部分),根据小信号等效电路可以推导出输入阻抗和增益:

$$Z_{in} = \frac{1 + R_F/r_0}{g_m + 1/r_0} \approx 1/g_m \quad (1)$$

$$A_v = -\frac{g_m - 1/R_F}{1/r_0 + 1/R_F} \approx 1 - g_m R_F \quad (2)$$

$g_m$  是 MOS 管跨导,  $r_0$  是 MOS 管输出电阻,  $R_F$  是并联反馈电阻.通过调节  $g_m$  的值,可以在较宽的频率范围内实现输入阻抗的匹配.

噪声抵消技术是指在保持电路的其它指标没有

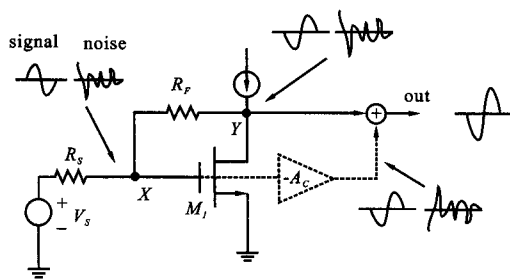


图 1 噪声抵消技术

明显下降的前提下,通过增加额外的通路,使得输入 MOS 管沟道热噪声经过不同的通路后在输出端减弱甚至完全抵消,从而达到减小电路总噪声系数的目的.

在图 1 所示的带电阻反馈共源放大电路中,最主要的噪声源是主放大 MOS 管  $M_1$  的沟道热噪声,可以表示为:

$$i_n^2 = 4kT\gamma g_m \quad (3)$$

该噪声电流  $i_n$  可以由并联在 MOS 管漏源两端的电流源来等效.当噪声电流  $i_n$  流过电阻  $R_F$  和  $R_S$  时,在节点 Y 和 X 上产生两个相位相同的即时噪声电压.带电阻反馈的共源放大电路增益一般为负 ( $g_m R_F > 1$ ),因此对于输入信号  $V_S$  而言,在节点 Y 和 X 具有相反的相位.考虑在共源放大器后面增加一个额外的反相放大器 ( $-A_c$ ) 将  $M_1$  管栅极的信号和噪声同时放大,再与  $M_1$  漏极的信号和噪声相叠加. X 点的噪声电压经过反相放大器 ( $-A_c$ ) 后与 Y 点的噪声电压是反相相加,通过选择适当的反相放大器增益  $A_c$  就可以减小甚至完全消除  $M_1$  沟道热噪声在输出端的贡献.而 X 点的输入信号经过反相放大器 ( $-A_c$ ) 后与 Y 点的信号是同相相加,输出信号幅度被加强.如图 1 所示结构, X、Y 点噪声电压可以表示为:

$$V_{X,n} = i_n \cdot R_S \quad (4)$$

$$V_{Y,n} = i_n \cdot (R_S + R_F) \quad (5)$$

输出端的噪声电压为:

$$V_{out,n} = i_n \cdot (R_F + R_S - A_c R_S) \quad (6)$$

要使输出端噪声电压为 0,即  $V_{out,n} = 0$ ,此时反相放大器增益应为:

$$A_c = 1 + \frac{R_F}{R_S} \quad (7)$$

式(7)称为噪声抵消条件.对于输入信号,在输出端两路信号同相相加,总增益为:

$$A_{V, total} = \frac{V_{out}}{V_X} = 1 - g_m R_F - A_c$$

$$= -g_m R_F - \frac{R_F}{R_S} = -2 \frac{R_F}{R_S} \quad (8)$$

从上面的分析可以看出,采用噪声抵消技术后低噪声放大器的噪声优化和输入阻抗匹配不相关,因此可以在满足输入阻抗匹配的条件下实现低噪声。

#### 4 电路设计与分析

图2是基于噪声抵消技术宽带低噪声放大器的具体电路实现。输入匹配级采用NMOS管和PMOS管的推挽互补形式,增加了跨导效率,从而能减少电路功耗。为减小增益和输入匹配对电源电压变化的敏感度,采用PMOS管 $M_3$ 、 $M_4$ 组成的电流镜为输入NMOS管和PMOS管提供复用偏置电流。 $M_7$ 、 $M_6$ 构成共源共栅反相放大结构( $-A_C$ ), $M_6$ 是共栅管,用来减弱由 $M_7$ 的栅漏极间寄生电容 $C_{gd}$ 引起的密勒效应和有限输出阻抗对放大器性能的影响,并提供良好的输入输出反向隔离。 $M_5$ 构成源极跟随器,以共栅管 $M_6$ 的输出阻抗为负载。电容 $C_3$ 、 $C_2$ 为旁路电容,可以抑制电源抖动和滤除偏置电路引入的噪声。第一级和第二级间采用 $R_1-C_1$ 高通滤波器交流耦合。

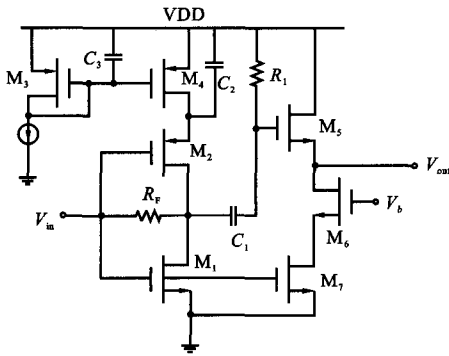


图2 宽带低噪声放大器的具体电路实现

电路参数计算如下:

放大器的输入端输出端要提供对 $50\Omega$ 阻抗的良好匹配,以减小信号反射,实现最大功率传输。因此,输入端 $M_1$ 、 $M_2$ 的跨导要满足:

$$Z_{in} \approx \frac{1}{g_m} = \frac{1}{(g_{m1} + g_{m2})} = 50\Omega$$

$$g_{m1} + g_{m2} = 0.02\text{ms}$$

分析电路的输出阻抗, $M_5$ 跨导要满足:

$$Z_{out} = \frac{1}{g_{m5}} / [(1 + g_{m6} r_{o6}) r_{o7}] \approx \frac{1}{g_{m5}}$$

$$g_{m5} = 0.02\text{ms}$$

根据噪声抵消条件公式(7),为了消除噪声共源共栅级应提供的增益应为:

$$A_C = 1 + \frac{R_F}{R_S} = 19 \text{ dB}$$

$R_F$ 是反馈电阻,从功耗噪声增益折中考虑,选择 $400\Omega$ 。根据公式(8)计算信号电压增益为:

$$|A_{V,\text{total}}| = 2 \frac{R_F}{R_S} = 24 \text{ dB}$$

#### 5 仿真结果与分析

采用 $0.18 \mu\text{m}$  RF CMOS 1P6M工艺模型,使用Agilent公司射频仿真软件ADS2009对电路进行优化仿真。图3、图4是输入输出反射系数,在整个工作频段( $48 \sim 862 \text{ MHz}$ )内满足 $S_{11} < -20 \text{ dB}$ ,  $S_{22} < -20 \text{ dB}$ ,达到了良好的输入输出匹配。图5是信号增益曲线,在整个频段内最大增益 $21 \text{ dB}$ ,最小增益 $17 \text{ dB}$ ,增益平坦度 $\pm 2 \text{ dB}$ 。仿真值要比理论计算值小,主要因为在计算时未考虑 $M_5$ 源跟随器、高通滤波器的损耗以及高频时寄生效应的影响。图6是噪声系数曲线,在 $200 \text{ MHz}$ 频率以上 $NF < 2 \text{ dB}$ ,在低频段由于MOS管 $1/f$ 噪声的影响,噪声系数变大,在整个频段内满足 $NF < 3 \text{ dB}$ 。图7是线性度仿真结果,在输入信号 $200 \text{ MHz}$ 时扫描输入信号功率,得到 $1 \text{ dB}$ 压缩点为 $-6 \text{ dBm}$ 。整个电路采用 $1.8 \text{ V}$ 电压,消耗电流为 $6 \text{ mA}$ 。

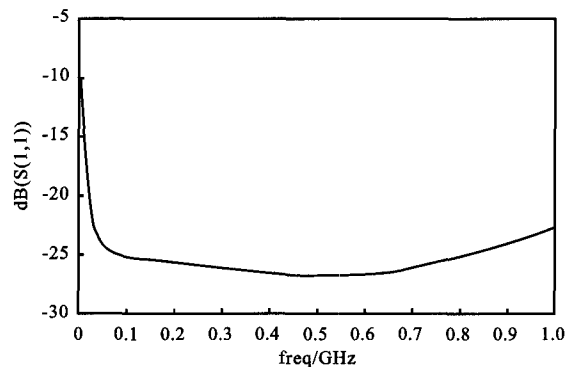


图3 输入反射系数

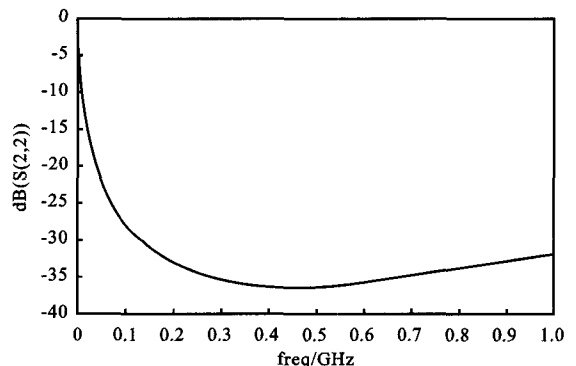


图4 输出反射系数

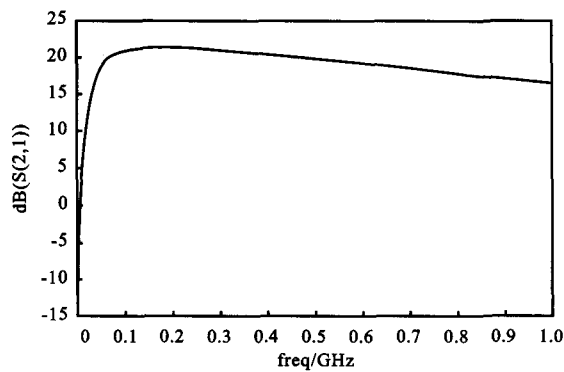


图5 增益

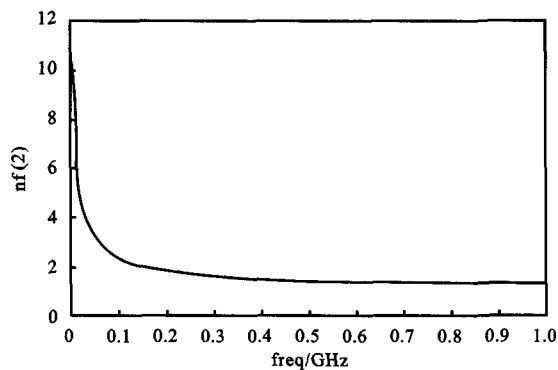


图6 噪声系数

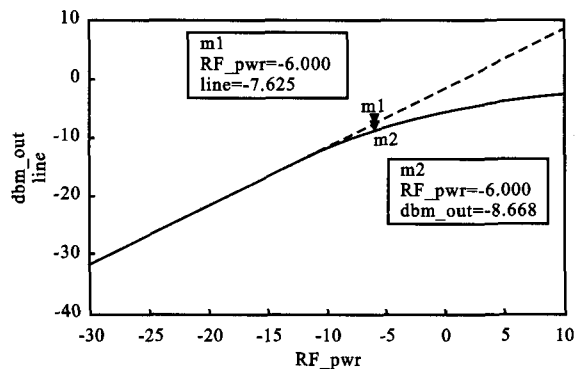


图7 线性度(1dB压缩点)

## 6 结束语

本文分析了宽带低噪声放大器的各种拓扑结构,针对 DMB-T/H 标准数字电视调谐器应用要求,在电阻并联反馈共源结构的基础上采用噪声抵消技术,设计了一款宽带低噪声放大器。仿真结果表明,该放大器在整个工作频段范围内达到了良好的输入输出阻抗匹配、较低的噪声系数、高增益和高线性度等特性。

## 参考文献:

- [1] GB20600-2006. 数字电视地面广播传输系统帧结构、信道编码和调制[S]. 2006.
- [2] Brian M. Ballweber, Ravi Gupta. A fully integrated 0.5~5.5 GHz CMOS distributed amplifier[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(2):231-239.
- [3] Chang-Wan Kim. An ultra-wideband CMOS low noise amplifier for 3-5 GHz UWB system[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2005, 40(2):544-547.
- [4] Aly Ismail, Asad A. Abidi. A 3 to 10 GHz LNA with wideband LC ladder matching network[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(12):2269-2277.
- [5] Vishwakarma S, Jung S. Ultra wideband CMOS low noise amplifier with active input matching[C]//IEEE Workshop on Ultra Wideband Systems. [S. L.]: IEEE, 2004:415-419.
- [6] Thomas H Lee. The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits [M]. Cambridge University Press, 1998.
- [7] Bruccoleri F, Klumperink E A M. Wide-band CMOS low noise amplifier exploiting thermal noise canceling [J]. IEEE JSSC, 2004, 39(2):275-282.

## 作者简介:

唐学锋 男, (1980-), 硕士研究生, 实验师. 研究方向为 CMOS 模拟集成电路设计.