

一种基于 Gm-C 的高 Q 值模拟中频带通滤波器设计与实现

段 冲, 李卫民, 文 武

(北京微电子技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 设计并实现了一种基于 Gm-C 二次节(Biquad)结构的 6 阶切比雪夫 I 型模拟中频带通滤波器, 中心频率为 46 MHz, 带宽为 2.046 MHz. 其中 Biquad 结构中加入了负阻抗单元, 增加输出阻抗, 实现滤波器的高 Q 值(品质因数). 跨导放大器(Operational transconductance amplifier, OTA)单元使用源极负反馈技术, 优化了 OTA 的线性性能. 整个滤波器电路采用 0.35 μm CMOS 工艺实现. 经过仿真验证, 滤波器的通带纹波是 2.704 dB, 1.5 倍带宽处衰减大于 21 dB. 在 3.3 V 电源电压情况下, 滤波器的总电流消耗为 8.87 mA.

关键词: 带通滤波器; 跨导放大器; 二次节; 负阻抗; 源极负反馈

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)08-0074-04

Design and Implementation of High Q Analog IF Bandpass Filter Based on Gm-C

DUAN Chong, LI Wei-min, WEN Wu

(Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: A 46 MHz centre frequency, 2.046 MHz bandwidth 6th order Chebyshev-I bandpass integrated filter using a biquad Gm-C structure is designed and implemented. Negative resistance cells are used in the biquad structure to obtain high Q of the filter. The OTA has a high linearity with source degeneration technique using MOS resistors. The whole filter circuit is designed and simulated in 0.35 μm CMOS process. The pass-band ripple of the filter is 2.704 dB and the 1.5 bandwidth attenuation is higher than 21 dB. The total dc current consumption is 8.87 mA @ 3.3 V supply.

Key words: Bandpass Filter OTA Biquad Negative resistance Source degeneration

1 引言

随着无线通讯的应用与发展, 低功耗、低成本、高集成度、高性能的无线接收机设计变得越来越重要^[1]. 作为无线接收机的核心模块, 射频前端芯片对整个接收机的影响最大, 其性能要求也最高. 图 1 是无线接收机射频前端结构框图.

模拟中频带通滤波器(IF Filter)是无线接收机射频前端的关键模块之一, 其主要作用是信道选择和滤波. 滤波器的性能不仅直接影响着无线接收机中射频前端性能, 而且还关系着最终产品的制造成本、功耗、尺寸和重量.

本文介绍一种可用于无线接收机中的高中频、

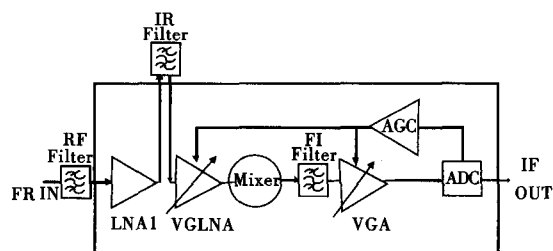


图 1 射频前端结构框图

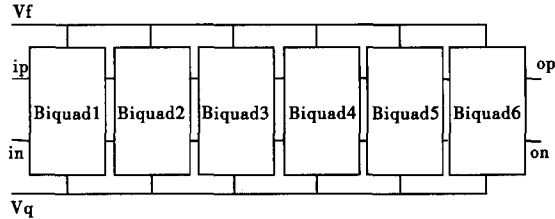
高 Q 值的集成模拟中频带通滤波器. 其中 Biquad 结构中加入了负阻抗单元, 增加输出阻抗, 实现滤波器的高 Q 值. OTA 单元采用源极负反馈技术, 优化 OTA 的线性性能.

2 Gm-C 滤波器

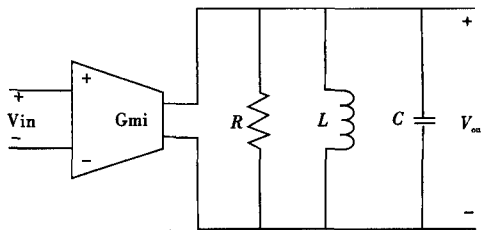
片内集成滤波器有很多种实现方式,比如 MEMS 滤波器、开关电容滤波器、有源 RC 滤波器、有源 LC 滤波器、Gm-C 滤波器等。Gm-C 滤波器是目前比较受欢迎的片内集成滤波器的实现方式^[2-3]。原因是 Gm-C 滤波器由跨导放大器和电容组成,不含电阻,工作频率高,便于集成。滤波器的各项性能参数均由跨导 Gm 和电容 C 这两个参数决定,OTA 的跨导值可以通过外加信号进行连续调节,易于实现高精度的可调谐滤波器。因此,本文选择 Gm-C 滤波器来实现射频前端芯片所需的集成模拟中频带通滤波器。

3 滤波器设计

为了减少器件噪声对电路的影响,降低电路设计的复杂度,本文设计的 6 阶切比雪夫 I 型模拟中频带通滤波器采用六级 Biquad 级联的方法实现,图 2(a)为其结构框图。图 2(b)显示了单级 Biquad 的 LC 原型。跨导放大器 Gmi 实现电压到电流的转换,驱动谐振器进行输出。谐振器由电感 L 和电容 C 构成。



(a) 滤波器结构图



(b) 单级 Biquad 的 LC 原理

图 2 滤波器结构框图与单级 Biquad 的 LC 原型

实现 Biquad 最重要的步骤是使用有源器件对 LC 原型中无源器件进行替换。基于回转器原理^[4],使用跨导放大器和电容可以实现等效的有源电感,如图 3 所示。其中,输入电压通过跨导放大器 Gm1 转化为电流,电流流过电容 C,产生了与跨导放大器 Gm2 输入电压成比例的电压。因此,实现了一个与

输入电压成比例的电流,等效电感值为

$$L = \frac{C}{G_{m1} * G_{m2}} \quad (1)$$

这种无源网络变换为有源滤波器的设计方法具有低敏感度的特点,而且该滤波器电路具有良好的对称性。

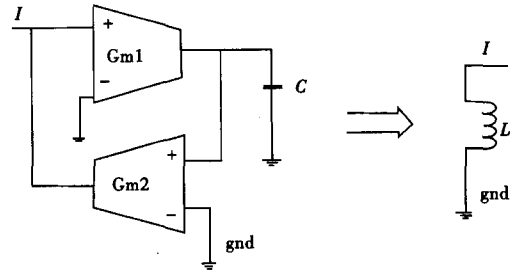


图 3 等效电感

图 4 所示为等效替换后的单级 Biquad 结构,采用全差分结构,抑制共模噪声。此外,电路中的电容全部为接地电容。Gmi 为输入跨导放大器,等效有源电感通过跨导放大器 Gm1、Gm2 和电容 C1、C2、C3、C4 实现。Gm0 为滤波器输出跨导,Gmn 是负阻抗单元。因此,传输函数 H(s) 可以近似为

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{g_{mi}}{g_{m0} - g_{mn}} \frac{\frac{g_{m0} - g_{mn}}{C} s}{s^2 + \frac{g_{m0} - g_{mn}}{C} s + \frac{g_{m1}^2}{C^2}} = A_0 \frac{\frac{\omega_c}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q} s + \omega_o^2} \quad (2)$$

其中, $A_0 = g_{mi} / (g_{m0} - g_{mn})$, 跨导值 $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ 。中心频率 f_c 为

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C^2}} = 2\pi * \frac{g_m}{C} \quad (3)$$

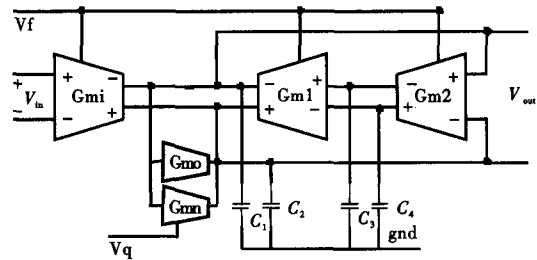


图 4 单级 Biquad 的 Gm-C 等效替换结构

通过表达式(3)可以看出,滤波器中心频率由回转器结构中的跨导放大器 Gm1 和 Gm2 的跨导值决定。因此中心频率可以通过改变偏置电压 Vf 进行

调谐,而且跨导放大器 G_{m1} 和 G_{m2} 的跨导值随着偏置电压的改变线性变化.

在本文设计的 6 级 Biquad 中,单级最高的 Q 值高达 80 以上,但由于输出阻抗较低,纵联后无法实现如此高的 Q 值.为此,本文采用在输出端并联负阻抗单元的方法来增加输出阻抗^[5],图 5 中显示了设计的负阻抗单元,这时 Q 值为

$$Q = \frac{g_m}{g_{m0} - g_{mn}} \quad (4)$$

通过调谐负阻抗单元的跨导值,可以实现本文所需要的高 Q 值,改变偏置电压 V_q 即可对负阻抗单元进行连续调谐.

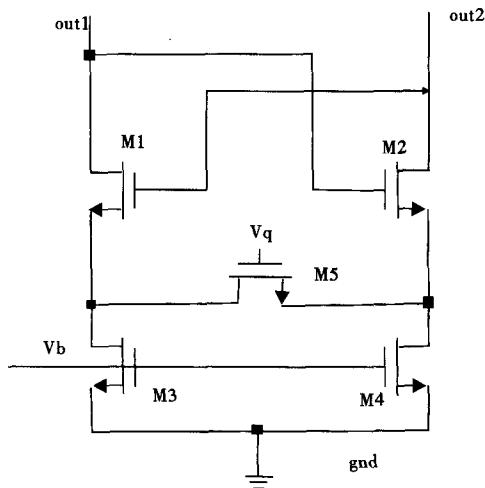


图 5 负阻抗单元

4 跨导放大器设计

一个跨导放大器单元就是一个电压到电流的转换器,实现输入电压到输出电流的转化.线性跨导放大器是 G_m -C 型滤波器电路中最基本的单元,也是最重要的单元.跨导放大器的线性优化方法有很多,比如源极负反馈、交叉耦合和有源偏置等等.本文选择加入源极负反馈电阻的方法实现跨导放大器的线性优化^[6],如图 6 所示.

在上述电路中输出电流可以表示为

$$I_{out} = \frac{1}{2} (V_{id} - I_{out}R) \sqrt{2I_{SS}k} \sqrt{1 - \frac{(V_{id} - I_{out}R)^2 k}{2I_{SS}}} \quad (5)$$

$$V_{id} = V_{in1} - V_{in2} \quad I_{out} = I_{out1} - I_{out2} \quad (6)$$

其中 $k = \frac{1}{2} C_{ox} \frac{W}{L}$, 因此跨导放大器的跨导值 G_m 为

$$G_m = \frac{g_m}{1 + g_m R} \quad (7)$$

式中, g_m 是 MOS 管 M1 和 M2 的跨导值.从表达式

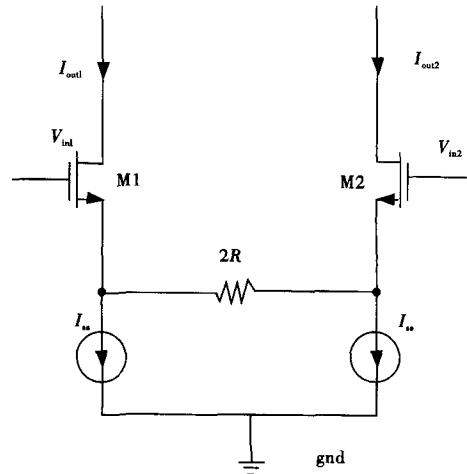


图 6 源极负反馈跨导放大器

(6)可以看出,非线性项主要取决于 $(V_{id} - I_{out}R)$. 当 $R \gg 1/g_m$ 时,跨导值 G_m 近似为

$$G_m \approx 1/R \quad (8)$$

此跨导值的大小近似由源极负反馈电阻值的大小决定.但是在 CMOS 工艺中,实现高质量的电阻具有很大的困难,而且采用无源负反馈结构的跨导放大器的线性度可控性较差.因此,本文采用工作在深线性区的有源 MOS 电阻来代替无源电阻.有源 MOS 电阻的阻值可以通过改变偏置电压进行方便和精确的调谐,从而较大的改善跨导放大器的线性度.图 7 所示为本文设计的跨导放大器.

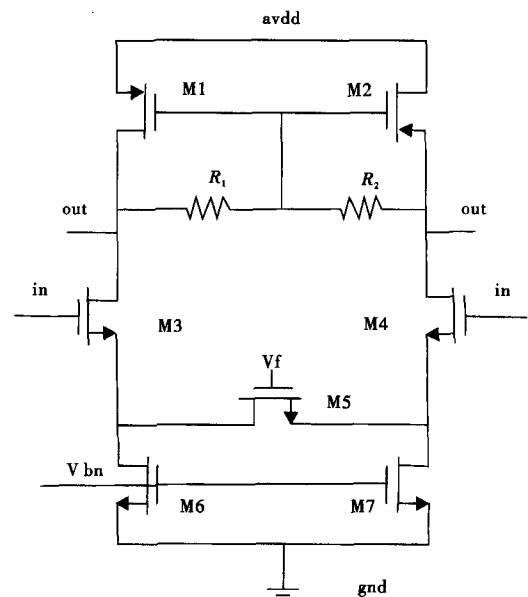


图 7 跨导放大器

图 7 中, MOS 管 M6 和 M7 偏置电流源, M5 是工作在深线性区的有源 MOS 电阻.此外, MOS 管 M1、M2 和电阻 R_1 、 R_2 组成了跨导放大器的共模反

馈电路,用来控制输出信号的共模分量,防止其产生波动。

5 版图与仿真结果

整个滤波器电路采用 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺进行设计和仿真. 电源电压为 $3.3\ \text{V}$, 整体功耗为 $8.87\ \text{mW}$. 图 8 所示为滤波器的后仿真频率响应曲线. 由图中可以得到, 滤波器带内的纹波是 $2.704\ \text{dB}$, 1.5 倍带宽处的衰减分别为 $21.92\ \text{dB}$ 和 $22.51\ \text{dB}$. 滤波器的动态范围是 $50.13\ \text{dB}$.

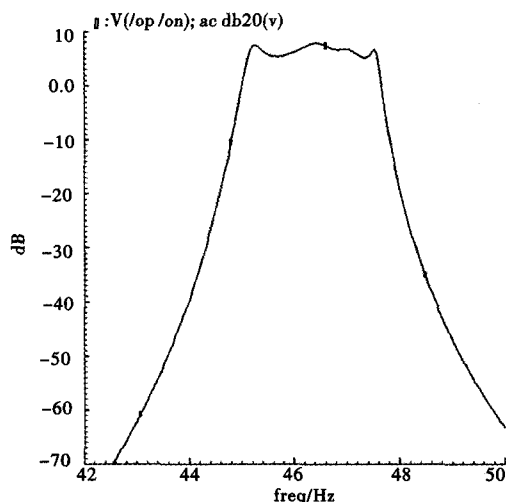


图 8 频率响应曲线

表 1 中给出了滤波器的各项参数. 图 9 是所设计的滤波器的版图. 为了减小电阻、电容等的失配, 滤波器版图采用了大量的对称设计技术.

表 1 滤波器各项参数

工艺	中心频率	带宽	纹波
$0.35\ \mu\text{m}$ MOS	46 MHz	2.046 MHz	2.704 dB
1.5 带宽衰减	动态范围	电源电压	功耗
21.92 dB	50.13 dB	3.3 V	8.87 mW
22.51 dB			

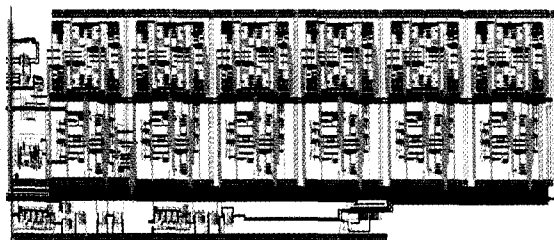


图 9 滤波器版图

6 结束语

本文设计并实现了一种可用于无线接收机中的高中心频率和高 Q 值的模拟中频带通滤波器. 整个滤波器电路采用 $0.35\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺实现. 经过仿真验证, 滤波器的通带纹波是 $2.704\ \text{dB}$, 1.5 倍带宽处衰减大于 $21\ \text{dB}$. 在 $3.3\ \text{V}$ 电源电压情况下, 滤波器的总电流消耗为 $8.87\ \text{mW}$. 此模拟中频带通滤波器已经应用在一种无线接收机射频前端芯片的设计中.

参考文献

- [1] Choi Yu Wing. A 70MHz CMOS Gm-C bandpass filter with automatic tuning[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 1999.
- [2] Jun-Hong Weng, Ching-Yuan Yang. An active Gm-C filter using a linear transconductance[J]. IEEE, 2007: 909-912.
- [3] James Moritz, Yichuang Sun. 100MHz 6th order leap-frog gm-C high Q bandpass filter and on-chip tuning Scheme[J]. ISCAS, 2003: 2381-2384.
- [4] Deliyannis T, Yichuang Sun, Fidler J K. Continuous-time active filter design[M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [5] Krummenacher F, Norbert Joehl. A 4-MHz CMOS continuous-time filter with on-chip automatic tuning [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuit, 1988, 23 (3): 750-758.
- [6] Mustafa Hadi Koroglu. High frequency integrated filters for wireless applications[D]. Georgia: School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, 2002.

作者简介:

段冲 男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为模拟电路的设计与测试.

李卫民 男, 研究员, 硕士生导师. 研究方向为超大规模集成电路的设计与测试.

文武 男, 高级工程师. 研究方向为超大规模集成电路的设计与测试.