文章编号:1672-3961(2010)01-0129-04

一种基于双极型 OTA 的窄带滤波器设计

罗敏,王晨旭,李浩
(哈尔滨工业大学(威海)微电子中心, 山东 威海 264209)

摘要:采用上华(CSMC)0.6 μm BiCMOS 工艺设计了一个应用于红外接收芯片中的中心频率和带宽正交可调的集成窄带滤波器。该滤波器主要由双极型器件搭建的跨导运算放大器(OTA)组成,通过将 OTA 接成回转器模拟电感来替换 LC 梯形滤波器中的电感,实现了有源网络模拟无源 LC 梯形结构。经过 HSPICE 仿真验证,该滤波器的中心频率为 38.02 kHz,带宽为 3.92 kHz,且中心频率和带宽能够正交调节,具有很好的性能,满足了红外接收芯片的需要。

关键词:窄带滤波器;OTA 单元;正交可调
中图分类号:TN47 **文献标志码**:A

A design of NBF based on bipolar OTA

LUO Min, WANG Chen-xu, LI Hao
(Microelectronic R&D Center, Harbin Institute of Technology in Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: A narrow band filter used in IRDA IC whose central frequency and band width can be orthogonally modulated was designed using the CSMC 0.6 μm BiCMOS process. The narrow band filter consisted of bipolar OTA cells. With the simulation of HSPICE, the conclusion could be obtained that the central frequency of this filter was 38.02 kHz, the band width was 3.92 kHz, and the central frequency and the bind width could be orthogonally modulated, which can represent the outstanding capability of this filter.

Key words: narrow band filter; OTA cell; orthogonal modulation

0 引言

红外通信技术因为具有便捷和成本较低的优点,目前在很多领域特别是消费类电子领域有着广泛的应用。而对于红外信号的传输与接收去除各种外界干扰信号的影响是非常重要的。窄带滤波器就是在红外接收芯片中实现这一功能的重要模块。

目前常见的集成滤波器多采用 OTA-C 结构,它具有结构简单、方便的特点[1]。本文首先在理论上较详细地分析了滤波器的一些重要设计参数,然后给出了一种中心频率和带宽正交可调的双极 OTA-C 滤波器的设计方案,用 HSPICE 仿真工具对上述滤波器进行了仿真,给出了仿真波形。在版图设计后的仿真结果表明该窄带滤波器性能良好,完全满足了红外接收芯片的需要。

1 OTA 的电路实现

常见的跨导运算放大器 OTA 分为 CMOS 型和双极型两种。图 1 为采用基本源耦差分对 CMOS 型 OTA 电路。设图中上面 2 个电流镜的电流传输比均为常数 m,并设 T_3, T_6 和 T_8 始终工作在饱和状态。则图 1 所示电路的输出电流为

$$i_o = m(I_{D1} - I_{D2}) = mg_{m1}(V_{I1} - V_{I2}) = g_m(V_{I1} - V_{I2}), \quad (1)$$

式中,g_{m1}是差动式跨导输入级的增益,g_m 是跨导运算放大器的增益。该电路具有较小的失调和漂移,良好的高频特性和低噪声特性,但是它的动态范围是受到限制的。

收稿日期:2009-03-20
作者简介:罗敏(1978-),男,四川南充人,讲师,硕士,主要研究方向为模拟、混和信号集成电路设计. E-mail: cn.minLuo@gmail.com

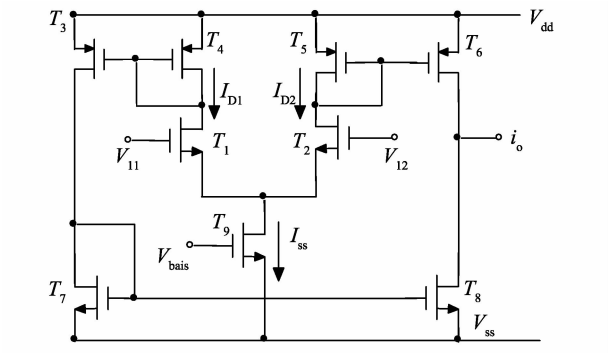


图1 CMOS基本型OTA

Fig.1 The normal CMOS OTA

图2为基于双极工艺的改进型OTA电路实现。输入端射极跟随器的引入使得输入电阻提高,同时增大差分对管的工作电流,增大跨导值。此外,放大级采用两级差分结构,第一级差分对接入了射极负反馈电阻,它能增大输入电压的范围,同时能增大共模抑制比。电流通过第二级差分放大电路后由级联电流镜输出。

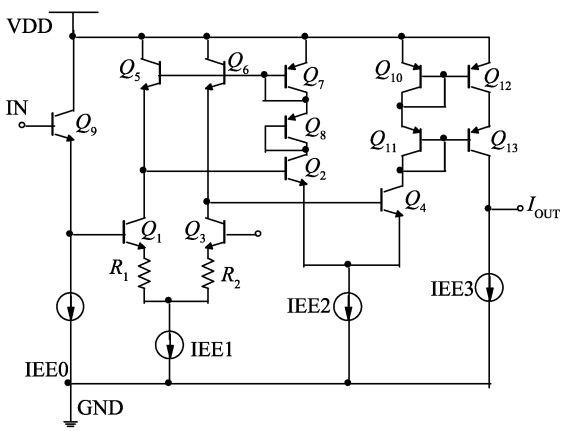


图2 改进型双极OTA

Fig.2 The improved bipolar OTA

该电路中电阻 R_1 与 R_2 的值相等,且均为 R_e。对于单个双极型晶体管而言,其跨导为

$$g'_m = \frac{I_c}{V_{be}} = \frac{\beta I_b}{V_{be}} = \frac{I_e}{V_{be}} = \frac{1}{r_e}, \tag{2}$$

其中 r_e 为从发射极看进去的基极和发射极之间的小信号电阻,即

$$r_e = \frac{V_{be}}{i_e}。 \tag{3}$$

本文OTA中两级差分结构的半边小信号等效电路如图3所示,其总跨导为

$$g_m = \left[\frac{r_{be2}}{r_{e1} + R_e}\right]\frac{1}{r_{e2}} = \frac{\beta_2}{r_{e1} + R_e}, \tag{4}$$

其中

$$r_{e1} = \frac{V_T}{I_E} = \frac{26}{\frac{I_{EE1}}{2}} = \frac{52}{I_{EE1}}。 \tag{5}$$

而要调节 I_{EE1} 则只需改变外加偏置电路的电阻就可以实现。

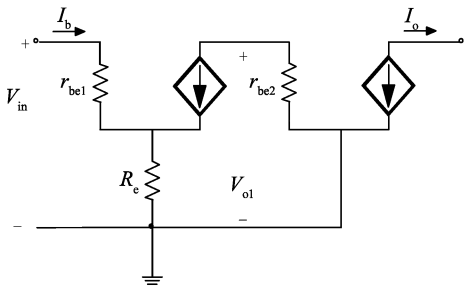


图3 两级差分的半边小信号电路

Fig.3 The side small signal circuit of two stage differential pair

2 带通滤波器实现

由于该带通滤波器用于红外接收系统,中心频率 ω_0 和 Q 值必须具有低灵敏度的特点才不易被寄生参数影响。而无源LC梯形滤波器具有优良的灵敏度特性,已经形成十分成熟的设计理论[2]。带通滤波器的传递函数[3]为

$$H(S) = \frac{H(0)\frac{\omega_0}{Q}S}{S^2 + S\frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}, \tag{6}$$

式中,$H(0)$是通带增益,ω_0 是带通滤波器的中心频率,Q 是品质因数。

图4为基本无源带通滤波器,该电路的传输函数为

$$H(S) = \frac{V_O(S)}{V_I(S)} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{SL} + SC}}{R + \frac{1}{\frac{1}{SL} + SC}} = \frac{S\frac{1}{RC}}{S^2 + S\frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}}。 \tag{7}$$

将式(3)与标准式(2)比较可得下列关系式:

$$H(0) = 1, \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}。 \tag{8}$$

由式(8)可见,中心频率和品质因数都与电感、电容大小相关,因而无法实现正交可调。

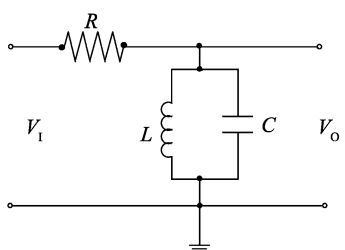


图4 基本无源带通滤波器

Fig.4 The normal passive band-pass filter

采用有源网络可以模拟无源LC梯形结构构成低灵敏度的有源滤波器。图5所示的电路通过低阶

链成高阶方法,把滤波器设计成两级结构[4]。该电路中的 OTA 可以采用 MOS 型也可以采用双极型,但与双极型跨导放大器相比,MOS 型 OTA 的增益值较低,增益可调范围较小,限制了滤波器的调节范围,所以本设计采用了两个双极型 OTA 结构。

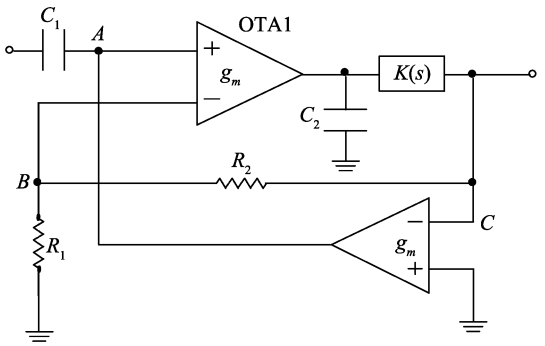


图 5　二阶带通滤波器电路
Fig.5　The diagram of band-pass filter

该电路中高通部分主要由 C_1、OTA1、R_1、R_2 构成,采用电压负反馈结构,引入负反馈后能够稳定跨导放大器放大倍数,改善净输入量的非线性失真。低通部分主要由 C_2、OTA2 构成,采用电流负反馈结构。为了说明网络 $K(s)$的作用,先将其短路对电路中的 A、B、C 节点列出节点方程:

$$SC_1(V_{IN} - V_A) = g_m V_{OUT}, \tag{9}$$

$$\frac{V_B}{R_1} = \frac{V_{OUT}}{R_1 + R_2}, \tag{10}$$

$$g_m(V_A - V_B) = SC_2 V_{OUT} + \frac{V_{OUT}}{R_1 + R_2}。 \tag{11}$$

得到带通滤波器的传递函数为

$$H(S) = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{\frac{g_m}{C_2}S}{S^2 + S\frac{R_1 g_m + 1}{(R_1 + R_2)C_2} + \frac{g_m^2}{C_1 C_2}}。 \tag{12}$$

与标准二阶带通滤波器传递函数式(2)作比较,并假设 $g_m R_1 \gg 1$,可得

$$\omega_0 = \frac{g_m}{\sqrt{C_1 C_2}}, Q = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\sqrt{\frac{C_2}{C_1}}, H(0) = 1 + \frac{R_2}{R_1}。 \tag{13}$$

特别地,当 $C_1 = C_2 = C$ 时,式(13)可以简化为

$$\omega_n = \frac{g_m}{C}, Q = H(0) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)。 \tag{14}$$

由中心频率、品质因数表达式可见,这两个参数之间没有联系因而可以很容易地实现正交调节。另外从以上分析可以发现,要获得式(14)结果必须满足 $g_m R_1 \gg 1$。以 $g_m R_1 > 10$ 为例,假设 R_1 取 10 kΩ,则 g_m 必须大于 1 ms;要获得 10 ~ 100 kHz 的中心频率,则需要 nF 量级的电容值。但是集成电路中过大的电容难以集成,这将给设计带来很大困难。因此可以在电路中加入电压增益为 1,电流增益为 K 的网络 $K(s)$,然后重新列出节点 C 的电压电流关系:

$$g_m(V_A - V_B) = SC_2 V_{OUT} + \frac{V_{OUT}}{(R_1 + R_2)K}。 \tag{15}$$

得到 $H(s)$新的表达式:

$$H(S) = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{\frac{g_m}{C_2}S}{S^2 + S\frac{R_1 g_m + 1/K}{(R_1 + R_2)C_2} + \frac{g_m^2}{C_1 C_2}}。 \tag{16}$$

显然,只需满足 $g_m R_1 \gg 1/K$ 即得到与式(14)一样的结果,而现在对 g_m 或 R_1 的要求宽松多了,可满足大范围 ω_0 和 Q 的正交调节的设计要求,给设计带来了极大的灵活性。由于射极跟随器具有电压增益为 1,电流增益为 β 倍的特点,因此,可以直接采用射极跟随器来构成网络,即在跨导放大器的输出端再接上一个双极型的晶体管对输出电流进行放大。

根据式(5),可以通过改变 I_{EE1} 来改变 g_m,从而达到 ω_0 可调的目的。而要想调节 I_{EE1} 只需改变相应偏置电路的电阻就可以实现。加入偏置电路并重新调整后得到的整体电路如图 6 所示。

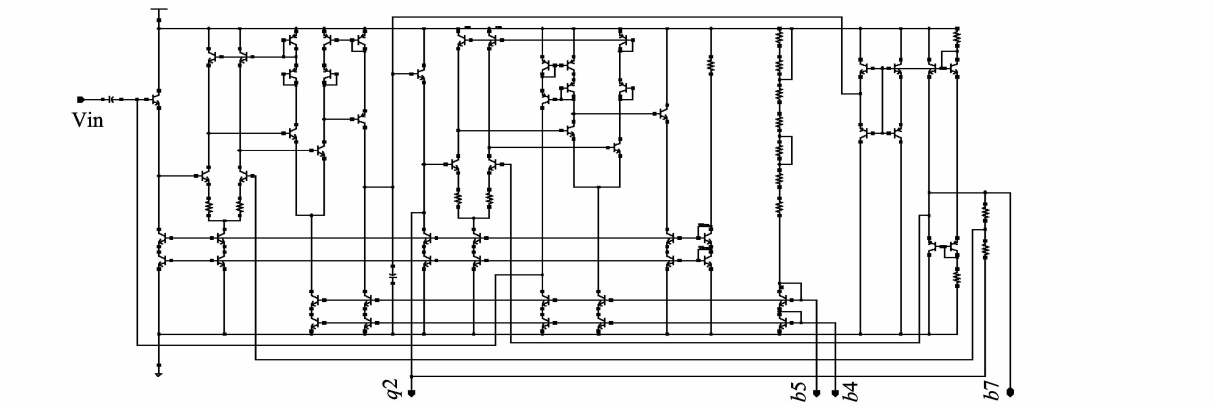


图 6　滤波器整体电路图
Fig.6　The whole diagram of filter

红外接收器最常用的载波频率在 36 ~ 40 kHz 之间,因此滤波器的中心频率被定为 38 kHz。利用 HSPICE 仿真器,采用上华 CSMC 0.6 μm BiCMOS 工艺模型进行了仿真模拟。图 7 给出了 LPE 之后的仿真结果,可见该滤波器的中心频率为 38.02 kHz,带宽是 3.92 kHz。该滤波器已经应用在我中心开发的一款采用数字控制技术的红外接收 IRDA 芯片中。图 8 是该芯片中本文设计的滤波器部分版图。

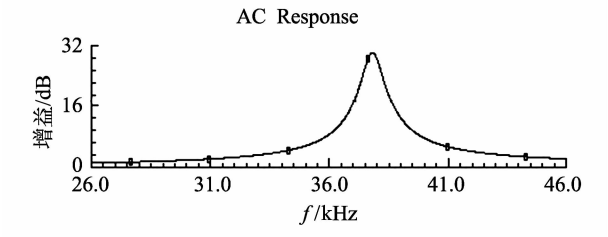


图 7 滤波器仿真结果

Fig.7 The simulation result of filter

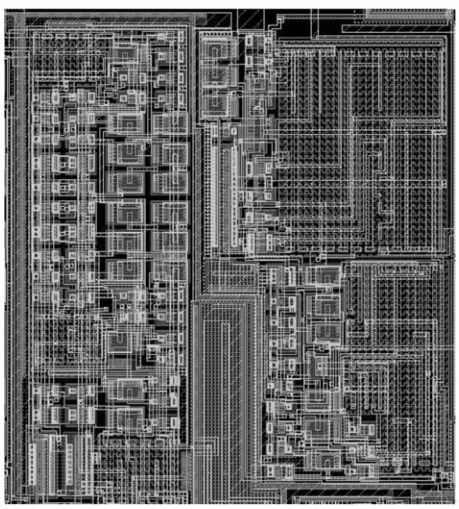


图 8 滤波器模块版图

Fig.8 The layout of filter

3 结语

针对本文开发的一款红外接收芯片的要求设计了一个采用双极型 OTA 构成的两阶带通滤波器,并对该滤波器和 OTA 进行了详细的设计分析。HSPICE 仿真证明该设计方案具有品质因数和中心频率能够正交调节、OTA 跨导值调节范围较大、电路具有低灵敏度等特性,达到了预期设计目标。

参考文献:

[1] EDUARD SACKINGER, WALTER GUGGENBUHL. A high-swing, high-impedance MOS cascode circuit[J]. IEEE Journal of Solid-State circuits, 1990, 25 (1):289-297.

[2] WU J, MASR Y. Current-mode ladder filters using multiple output current conveyors[J]. IEEE Proceeding G, 1996, 143 (4):218-224.

[3] 陈惠开.无源与有源滤波器理论与应用[M],北京:人民邮电出版社,1989.
CHEN Huikai. Passive and active filters theory and applications [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1989.

[4] 麦日峰,俞军,程君侠,等. 一种用于红外接收前端的二阶带通滤波器[J].微电子学,2002,32(1):54-57, 61.
MAI Rifeng, YU Jun, CHENG Junxia, et al. One for the infrared receiver front-end of the second-order band-pass filter [J]. Microelectronics, 2002, 32(2):54-57, 61.

[5] 复旦大学微电子教研组.集成电路设计原理·模拟集成电路[M].北京:高等教育出版社,1984.
Microelectronics Teaching and Research Group of Fudan University. IC design principles · analog IC[M]. Beijing: Higher Education Press,1984.

(编辑:孙培芹)