

信号流图 OTA-C 高通滤波器

蔡国昌 吴杰 何怡刚

(湖南大学电气系, 长沙 410082)

摘要 本文提出了采用 OTA 微分器设计高通滤波器的方法。基于有源滤波器的跳耦综合, 导出了全极点高通梯形滤波器的 OTA-C 实现。该滤波器具有低灵敏度和高截止频率, 与 MOS 工艺兼容, 便于单片集成, 调整方便。文中给出了实验结果和 P-SPICE 模拟, 证明此滤波器的可行性。

关键词 OTA-C 高通滤波器; 信号流图; 微分器; OTA 微分器

一、引言

运算跨导放大器 (Operational Transconductance Amplifier 简称 OTA) 是一种有源器件。近十年来, 它以工作频率高、电路结构简单、便于集成等突出优点受到国内外学者和工业界的重视。由 OTA 器件和电容元件构成的 OTA-C 滤波器的研究已有了很大进展, 设计方法也日趋完善, 特别是一阶、二阶 OTA-C 滤波器的设计已较为成熟, 对于 OTA-C 高阶滤波器的设计也有了一些研究, 如跳步法^[1,2]、信号流图法^[3]等。他们的一个共同特点是利用 OTA 器件灵活的电流控制特性, 即通过外加电压控制 OTA 跨导 g_m , 从而调谐滤波器的频率特性, 实现电控滤波器。

本文基于无源 LC 梯形网络的跳耦模拟, 提出了一种高阶 OTA-C 高通滤波器设计方法。以三阶 Butterworth OTA-C 高通滤波器为例, 描述了此类滤波器的设计过程以及实际装置高频应用时所采取的补偿措施。

二、 g_m 控制的微分器

在高通 OTA-C 滤波器跳耦结构中需要用到图 1 所示的微分器。分析该电路有

$$V_o = (V_{ia} - V_{ib})SCgm_1/(gm_2gm_3)$$

令 $gm_1 = gm_2 = gm_3 = g_m$, 则

$$V_o = (V_{ia} - V_{ib})SC/g_m \quad (1)$$

1992.05.07 收到, 1992.12.07 定稿。

蔡国昌 男, 1938 年生, 副教授, 现从事电路、信号与系统等研究和教学工作。

吴杰 男, 1957 年生, 教授, 现从事电路、信号与系统、滤波器、电磁场理论、神经网络理论等方面的教学和研究工作。

何怡刚 男, 1966 年生, 助教, 硕士, 现从事电路 CAA、信号与系统、滤波器等方面的教学和研究工作。

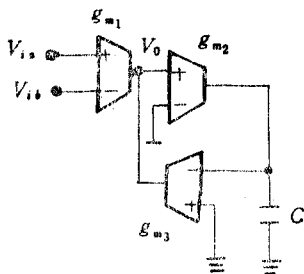


图1 OTA 微分器

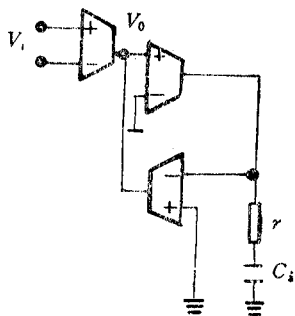


图2 补偿跨导极点的微分器

用微分器来实现高通滤波时,为提高滤波器的截止频率,针对 OTA 器件非理想性需采取补偿措施。

补偿措施 1 当信号频率较高时,OTA 的开环稳定性受第 1 个主极点 ($\mu_1 \approx 2\pi \times 2 \times 10^6 \text{ rad/s}$) 的影响。考虑 μ_1 的影响时,跨导系数可写成^[4]:

$$gm_i = gm_i(1 + S/\mu_1) \quad (2)$$

此时 OTA 微分器出现附加极点。由 (1) 式可得:

$$\frac{SC_i}{gm_i} = \frac{SC_i}{i gm_i(1 + S/\mu_1)} \quad (3)$$

正因如此,OTA-C 高通滤波器会出现附加极点并偏离原极点位置,以致达不到设计指标。下面的证明说明了这一点。

n 阶高通滤波器传输函数

$$T(S) = V_o(S)/V_{in}(S) = \frac{DS^n}{\sum_{j=1}^n d_j S^j + d_0} \quad (4)$$

式中 D 为常数。考虑 (3) 式的影响, (4) 式变为

$$T(S) = \frac{D \left(\frac{S}{1 + S/\mu_1} \right)^n}{\sum_{j=1}^n d_j \left(\frac{S}{1 + S/\mu_1} \right)^j + d_0} = \frac{DS^n}{\sum_{j=1}^n d_j S^j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{n-j}^k d_j S^{j+k} \mu_1^{-k} + \sum_{m=1}^n C_n^m d_0 (S/\mu_1)^m} \quad (5)$$

($|S/\mu_1| \leq 1$)

因此需对 OTA 微分器进行补偿。补偿方法是采用零极点对消技术,具有补偿作用的微分器如图 2 所示。分析图 2 可得

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{SC_i}{gm_i} \cdot \frac{1 + S/\mu_1}{1 + S/\mu_1 C_i}$$

若选取 $r = 1/(\mu_1 C_i)$, 则可达到补偿效果。

补偿措施 2 考虑 OTA 的多余相移。根据文献 [4],当 $0 < \omega r < 1/3$ 时,有

$$G = G_0(1 - S\gamma) \quad (6)$$

(6) 式中 G_0 为跨导的理想值, γ 为有源元件延迟特性。据此分析可得微分器 (图 1) 在 V_0 处出现接地负电阻, 值为 $C/(2rG_0^2)$ 。为消除负阻所引起的电路不稳定性, 可在 V_0 处联接适当数值的电阻到地。

三、设 计

下面以三阶全极点低通 LC 原型的例子说明 OTA-C 高通滤波器设计的一般方法。

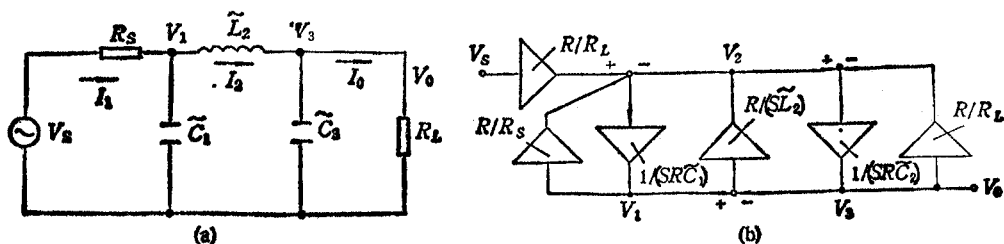
第一步 由给定的滤波器衰减指标, 查表计算得到 LC 梯形网络原型。如图 3(a) 所示。

第二步 以电容电压、电感电流为变量, 得到原型网络的运算模拟系统框图 (图 3(b) 所示)。

第三步 对第二步的框图应用低通到高通的频率变换, 得到高通滤波器的框图 (图 3(c) 所示)。

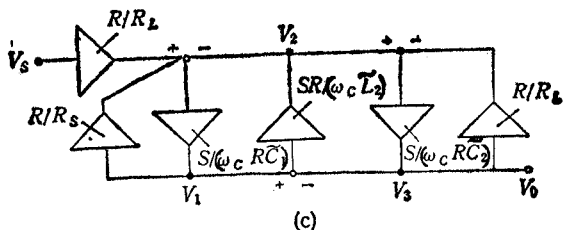
第四步 用图 1 所示 OTA 微分器节实现上述框图所示电压转移函数。

第五步 比较系数, 得到电路的设计方程。

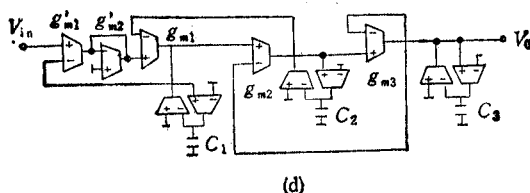


(a) 无源 LC 低通梯形原型

(b) LC 网络的运算模拟



(c) 对图 (b) 应用低通到高通频率变换得到的高通滤波器跳耦结构



(d) OTA 电路实现

图 3 高通滤波器跳耦结构的 OTA-C 实现

$$\begin{aligned}
 gm'_1/gm'_2 &= R_0/R_1 \\
 gm_1/C_1 &= \omega_c R_0 \bar{C}_1 \\
 gm_2/C_2 &= \omega_c R_0^{-1} \bar{L}_2 \\
 gm_3/C_3 &= \omega_c R_0 \bar{C}_2
 \end{aligned} \quad (7)$$

令 $gm_1 = gm_2 = gm_3 = gm$, 则电容参数为

$$C_1 = gm/(\omega_c R_0 \bar{C}_1), \quad C_2 = gm R_0/(\omega_c \bar{L}_2) \quad C_3 = gm/(\omega_c R_0 \bar{C}_2) \quad (8)$$

四、滤波器的电控特性

由(1)式可知 OTA 微分器是 gm 可控的, 由它耦合实现的高阶滤波器也是 gm 可控的。由上节(7)式可以证明这一点。在该式中 gm_1, gm_2, gm_3 都正比于 ω_c , 即本文的高通滤波器可很方便地通过调节一个电压, 独立地改变滤波器的截止频率。可见, 本文电路具有很好的电控特性。

五、例子

考虑如下技术参数等终端高通滤波器设计:

通带 $20\text{kHz} \sim \infty$, 最大衰减 1dB;

阻带 $0 \sim 5\text{kHz}$, 最小衰减 24dB。

经查表计算 P0325 波特华兹滤波器满足技术要求。设 $C_1 = C_3 = 6800\text{pF}$, $C_2 = 0.02\mu\text{F}$, 则 $gm'_1 = gm'_2 = 2.503 \times 10^{-3}\text{S}$, $gm_1 = gm_3 = 5.44 \times 10^{-4}\text{S}$, $gm_2 = 3.2 \times 10^{-3}\text{S}$ 。运用跨导运放 CA3080E 和分立电容元件进行实验, 幅频特性实测曲线如图 4 所示。

在采用图 3(d) 电路进行实验时, 若输入信号频率超过 200kHz 则滤波器频率特性将受 OTA 第一个主极点影响; 信号频率接近兆赫时, 出现不稳定现象; 在第一个微分器节输入端与地间并入兆欧电阻, 这个现象即可消除。用 P-SPICE 程序模拟该滤波器受影响后的曲线与(5)式结果基本一致。

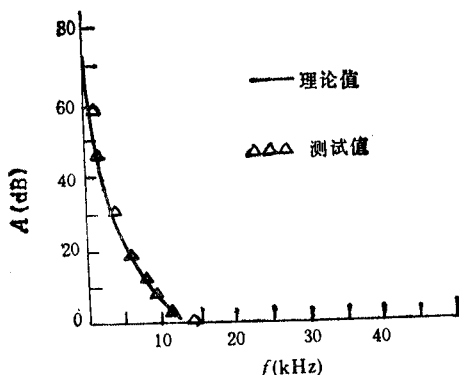


图 4 OTA-C 高通滤波器衰减频率特性

六、结论

本文研究了 OTA-C 高通滤波器的跳耦结构和设计方法, 得出几个主要结论如下:

(1) 运用 OTA 微分器是本文的主要特点。

(2) 所有电容均接地, 有利于集成实现, 同时减小了滤波器对寄生电容的灵敏性。

(3) 具有灵活方便的电控特性,截止频率可经外加电压独立调谐。

参 考 文 献

- [1] 戴违颢,刘建猷,杨山,电子学报,17(1989)4,106—109.
- [2] 吴杰,通信学报,12(1991)4,76—78.
- [3] Antonioc. M. de Queiroz et al., Signal Flow Graph OTA-C Integrated Filters, Proc. EEE/ISCAS, ESPOO, Finland, June 7—9, 1988, pp. 2165—2168.
- [4] R. Nandi, *Electron. Lett.*, 16(1980)17, 666—667.

SIGNAL FLOW GRAPH OTA-C HIGH-PASS FILTERS

Cai Guochang Wu Jie He Yigang

(Department of Electrical Engineering, Hunan University, Changsha 410 82)

Abstract A design technique for high-pass filters using OTA differenciator is presented. By means of the leapfrog synthesis of the active filters, the OTA-C realization of the high-order high-pass filters is built up. The filter is compatible with MOS process. It has low sensitivity performance and high cut-off frequency, and can be tuned conveniently by the external voltages. Experimental results and P-Spice simulation are given to prove its feasibility.

Key words OTA-C high-pass filter; Signal flow graph; Differentiator; OTA differenciator