

## 用信号流图设计任意阶FTFN-RC通用滤波器

席燕辉<sup>①②</sup> 彭 辉<sup>①</sup> 彭良玉<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

<sup>②</sup>(长沙理工大学电气与信息工程学院 长沙 410077)

<sup>③</sup>(湖南师范大学物理与信息学院 长沙 410081)

**摘 要:** 该文提出采用信号流图实现任意阶 FTFN-RC 通用滤波器的方法。通过对网络函数的直接分析, 导出了任意阶传输函数的 FTFN-RC 实现电路。该滤波电路仅包含  $n$  个有源器件,  $n$  个接地电容和  $n$  个接地电阻, 可以实现  $n$  阶低通、带通、高通电流模式滤波。不必改变电路内部结构就可以同时在不同的输出端实现不同的滤波功能, 简化了电路结构, 便于集成。完成了 MOS 级的 PSPICE 仿真, 仿真结果表明了所提出电路的可行性。

**关键词:** 信号流图; 四端浮地零器; 电流模式;  $n$  阶滤波器

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0227-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01588

## Design of General Arbitrary Order FTFN-RC Filter with Signal-flow Graph

Xi Yan-hui<sup>①②</sup> Peng Hui<sup>①</sup> Peng Liang-yu<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

<sup>②</sup>(Electrical and Information Engineering College, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410077, China)

<sup>③</sup>(College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** A new design method is presented for designing FTFN(Four-Terminal Floating Nullor)-RC filter of arbitrary order with signal flow graph. A FTFN-RC configuration that can be used to realize arbitrary order transfer function is obtained by direct analysis of network function. The filter circuit which contains  $n$  active elements,  $n$  grounded capacitors and resistors can produce  $n$ th order low-pass, band-pass and high-pass filters without changing the internal structure of circuit. So the circuit is simplified and integrated conveniently. PSPICE simulation at the MOS transistor level is carried out and results show that the proposed circuit is feasible.

**Key words:** Signal flow graph; Four-Terminal Floating Nullor(FTFN); Current-mode; Nth-order filter

### 1 引言

长期以来, 电压模式电路在信号处理中占有重要的位置。然而, 最近, 电流模式电路由于具有很强的信号处理能力, 宽的带宽和动态范围、高精度、低工作电压等优点而受到学术界的极大关注<sup>[1]</sup>。近几年来, 相继研究和提出了不少的电流型有源器件, 如运算放大器, 跨导运算放大器(OTA), 电流传送器(CCII), 在有源滤波网络中获得了更广泛的应用。然而, 在这些有源器件中, 四端浮地零器(FTFN)比运算放大器、电流传送器等具有更低的输入阻抗, 高的输出阻抗, 更为灵活、通用, 高频性能更好等优点。用 FTFN 实现的电流模式 2 阶滤波器已见诸多报道<sup>[2-4]</sup>, 但对高阶通用滤波器的报道很少。本文采用信号流图实现任意阶 FTFN-RC 通用滤波

器, 该结构仅用  $n$  个 FTFN,  $n$  个接地电容和接地电阻, 在不改变电路结构的前提下, 能同时实现高通、低通、带通等滤波功能<sup>[5-11]</sup>。

### 2 四端浮地零器型模

多输出四端浮地零器在电流模式电路中是一种多用途的有源元件, 它能提供电流跟随和电压跟随功能, 工作电压较低。四端浮地零器的符号图如图 1(a)所示, 图 2 为其电路实现图。它的端口特性如下:

$$v_x = v_y, i_y = i_x = 0, i_w = i_z \quad (1)$$

图 1(a)中, 通过增加一新的输出端, 就可得到多输出四端浮地零器(图 1(b)所示)。它的端口特性:

$$v_x = v_y, i_y = i_x = 0, i_w = i_{z-} = -i_{z+} \quad (2)$$

### 3 设计方法

设网络的一般表达式为

2008-12-01 收到, 2009-09-28 改回

湖南省自然科学基金(06JJ50117)资助课题

通信作者: 席燕辉 xiyanhui@126.com

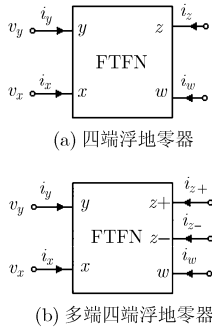


图 1

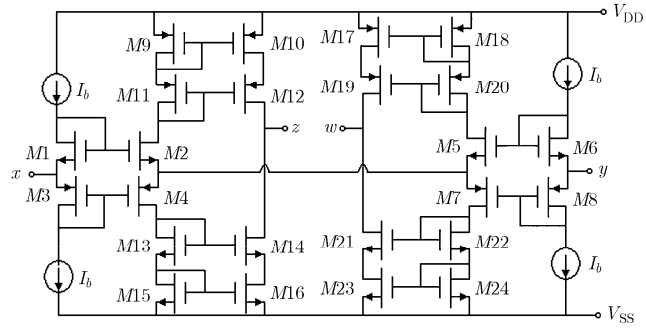


图 2 四端浮地零器的 CMOS 实现电路

$$H(s) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (3)$$

分子分母同时乘以  $s^{-n} I_0$  得

$$H(s) = \frac{a_n I_0 + a_{n-1} s^{-1} I_0 + \dots + a_1 s^{1-n} I_0 + s^{-n} I_0}{I_0 + b_{n-1} s^{-1} I_0 + \dots + b_1 s^{1-n} I_0 + b_0 s^{-n} I_0} \quad (4)$$

其中  $I_0$  是任意一电流信号。从式(4)可以看出, 输入电流  $I_{in}$  到输出电流  $I_{out}$  是通过  $n + 1$  个中间信号电流  $I_0, I_1, \dots, I_n$  连接起来的。其中

$$I_i = b_{n-i} s^{-i} I_0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$I_i = \frac{b_{n-i}}{b_{n-i+1}} s^{-1} I_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad b_n = 1 \quad (6)$$

$$I_{in} = I_0 + I_1 + \dots + I_{n-1} + I_n \quad (7)$$

$$I_{out} = a_n I_0 + \frac{a_{n-1}}{b_{n-1}} I_1 + \frac{a_{n-2}}{b_{n-2}} I_2 + \dots + \frac{a_1}{b_1} I_{n-1} + \frac{a_0}{b_0} I_n \quad (8)$$

由以上式子可导出式(4)的信号流图如图 3 所示, 图中各个节点为理想积分关系或线性加法关系。图 4 为相应的 FTFN 电路实现图。

从上述子图可知:

$$I_i = \frac{1}{s C_i R_i} I_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$R_i C_i = \frac{b_{n-i+1}}{b_{n-i}}, \quad R_i = 1/k_i, \quad C_i = k_i \frac{b_{n-i+1}}{b_{n-i}} \quad (10)$$

其中  $k_i$  为任意非零常量。

$$I_{out} = \sum_{i=0}^n \frac{\sum_{k=i}^n R_{sk}}{R_{n+1}} I_i \quad (11)$$

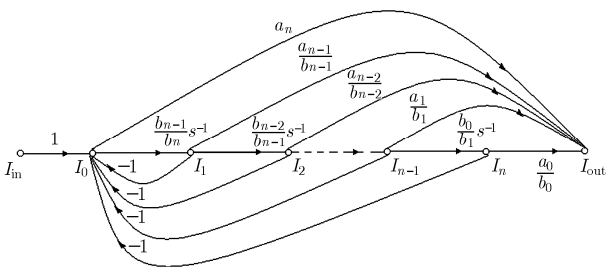


图 3 传递函数式(4)的信号流图

代入式(8)得

$$R_{si} = \begin{cases} R_{n+1} \frac{a_0}{b_0}, & i = n \\ R_{n+1} \left( \frac{a_{n-i}}{b_{n-i}} - \frac{a_{n-i-1}}{b_{n-i-1}} \right), & i = n-1, n-2, \dots, 1, 0 \end{cases} \quad (12)$$

将上述各 FTFN 单元电路级联就得到综合实现式(4)的 FTFN 网络结构, 如图 5 所示。如果取消式(11)中的加权和, 图 5 的结构就简化成图 6 所示的通用滤波器结构。从图 6 和式(11)中可得此结构的传递函数, 选择不同的输出端能同时实现高通、低通、带通滤波功能。

$$\frac{I_i}{I_{in}} = \frac{\left( \prod_{j=1}^{n-i} R_{n+1-j} C_{n+1-j} \right) s^{n-i}}{\sum_{k=0}^n \left( \prod_{j=1}^k R_{n+1-j} C_{n+1-j} \right) s^k} \quad (13)$$

其中  $i = 0, 1, \dots, n$ 。

- (1) 当  $I_{out} = I_0$ , 为高通滤波器;
- (2) 当  $I_{out} = I_n$ , 为低通滤波器;
- (3) 当  $I_{out} = I_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$ , 为带通滤波器。

### 4 设计举例及仿真

为了验证图 6 电路的可行性, 对截止频率为 500 kHz 的 3 阶巴特沃斯低通、高通、带通滤波器进行了硬件实验。经分析取  $C_1 = 0.5$  nF,  $C_2 = 1$  nF,  $C_3 = 2$  nF, 由截止频率可得电阻值为:  $R_1 = R_2 = R_3 = 1.57$  kΩ, 其仿真结果如图 7 所示。FTFN 采用图 2 的 CMOS 模型, 直流电压为  $\pm 5$  V, 偏值电流 50  $\mu$ A。

### 5 结论

本文提出了实现电流模式一般网络函数的 FTFN-RC 结构, 可用于工程应用及连续时间电路和大规模集成。由于任意网络函数都可适当的获得, 所以本方法能用来设计任意种类和任意阶滤波器。此单输入多输出滤波器具有以下特点: (1) 能产生高阶低通、带通、高通等滤波功能; (2) 电路结构简单, 所有的无源元件均接地; (3) 电路参数设计容易; (4)

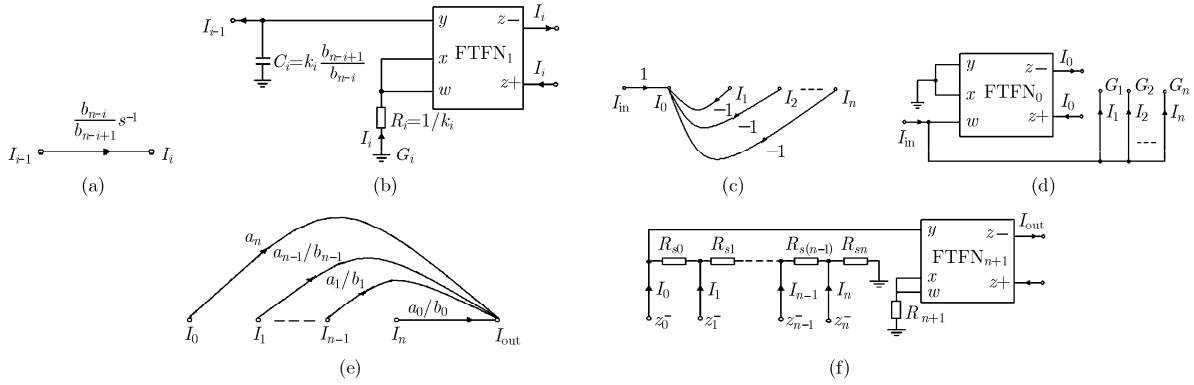


图 4 图 3 的子流图及相应的 FTFN 实现图

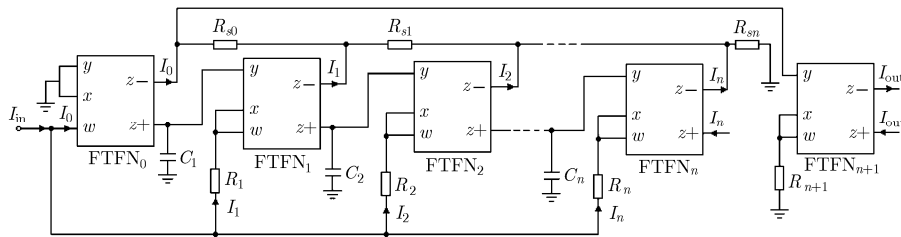


图 5 实现传递函数式(4)的 FTFN-RC 电路图

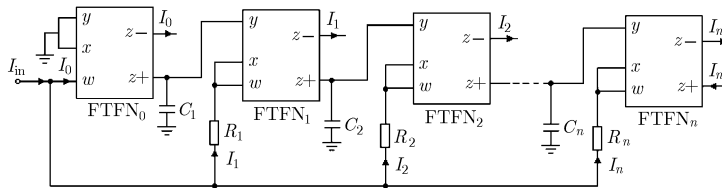


图 6 单输入多输出 n 阶通用滤波器结构

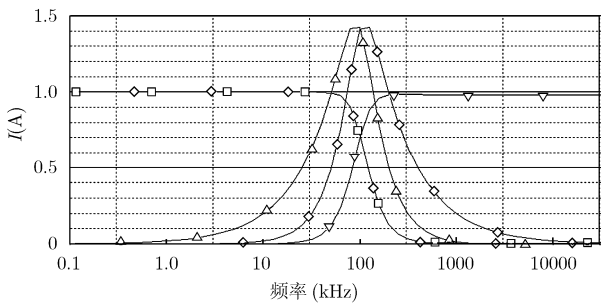


图 7 3 阶 Butterworth 低通、高通、带通滤波器幅频响应

通过改变外部输出电流信号的数目及方式就可得到不同种类的滤波器，而内部电路元件的连接方式及元器件数量不改变，有利于集成。

### 参考文献

[1] 何怡刚, 江金光, 吴杰, 蔡国昌. 通用有源电流模式滤波器. 电子学报, 1999, 27(11): 21-23.  
He Yi-gang, Jiang Jin-guang, Wu Jie, and Cai Guo-chang. Universal active current-mode filter. *Acta Electronica Sinica*,

1999, 27(11): 21-23.  
[2] Hirunporm J, Pukkalanun T, and Tangsrirat W. Current-controlled current-mode biquadratic filter with two inputs and three outputs using multiple-output FTFNs. *SICE-ICASE International Joint Conference, 2006*, (1): 5691-5694.  
[3] Sayginer M and Kuntman H. FTFN based realization of current-mode 4th order low-pass filter for video band applications. *Proceeding of Signal Processing and Communications Applications, Turkey, June. 11-13, 2007*, (1): 1-4.  
[4] Yildirim F, Uzunhisarcikli E, and Alci M. The realization of FTFN-based simple chaotic circuit and experimental verification of its high frequency performance. *Signal Processing and Communications Applications Conference, Turkey, April. 28-30, 2004*: 642-645.  
[5] 席燕辉, 李鸿, 彭良玉. 电流模式 N 阶 CDBA-RC 通用滤波器的系统设计. *电子与信息学报*, 2007, 29(3): 760-762.  
Xi Yan-hui, Li Hong, and Peng Liang-yu. A systematic design of current-mode Nth-order CDBA-RC universal filter.

- Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 760-762.
- [6] Sun Y and Fidler J K. OTA-C realization of general high-order transfer function. *Electron Lett*, 1993, 29(12): 1057-1058.
- [7] Acar C and Ozuguz S. Nth-order current transfer function synthesis using current differencing buffered amplifier: signal-flow graph approach. *Microelectronics Journal*, 2000, 31(1): 49-53.
- [8] Koksai M and Sagbas M. A versatile signal flow graph realization of a general transfer function by using CDBA. *International Journal of Electronics and Communication*, 2007, 61(1): 148-149.
- [9] 蔡国昌, 刘金华. 用信号流图设计任意阶 OTA-C 通用型滤波器. *湖南大学学报*, 2001, 28(3): 56-59.  
Cai Guo-chang and Liu Jin-hua. Design of general arbitrary order filter with signal-flow graph. *Journal of Hunan University*, 2001, 28(3): 56-59.
- [10] 宋树祥, 王卫东, 曹才开. 电流模式  $n$  阶 CCCII-C 的多输入单输出滤波器设计. *电子与信息学报*, 2007, 29(1): 243-245.  
Song Shu-xiang, Wang Wei-dong, and Cao Cai-kai. N-th order current mode filter design with multiple inputs and single output based on MCCCII. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(1): 243-245.
- [11] Muhammet K and Mehmet S. A versatile signal flow graph realization of a general current transfer function. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2008, 62(1): 33-40.
- 席燕辉: 女, 1979 年生, 硕士, 研究方向为电路与系统、有源滤波器理论设计及复杂系统建模等.
- 彭 辉: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模、控制与优化及信号处理等.