

① 开关电容复数滤波器及其应用的研究

93.16(2) Switched-Capacitor Complex Filter and Its Application

1-7

吴宁 李新
Wu Ning Li Xin

TN 713.91

(重庆大学电气工程系)

摘要 研究开关电容复数滤波器(SCCF)的级联实现及其在负通滤波中的应用。进行了SC复数负通滤波器实例设计,并给出了其衰减特性的计算机模拟结果。

关键词 信号流程图 / 开关电容电路; 复数滤波器; 负通滤波器, 滤波器。
中国图书资料分类法分类号 TN713.91

ABSTRACT The realization of cascade connection and its application in negative-pass filtering of Switched-Capacitor Complex Filter(SCCF) are studied in this paper, in which a SC complex negative-pass filter is designed and its attenuation characteristics obtained by computer simulation are also presented.

KEY WORDS signal-flow graph / switched-capacitor circuit; complex filter; negative-pass filter

0 引 言

复数滤波的概念在本世纪60年代的科技文献中已出现。但长期以来,它只是作为辅助理论分析的一种技巧,而能够处理复数信号的系统被认为是不可能实现的^[1]。随着现代通讯技术、微电子技术等的发展,近十年来,关于复数滤波器理论及其实现的研究,日益受到人们的关注。迄今,不仅数字复数滤波器已成功地实现,模拟复数滤波器也已成为实际的器件。但现有的RC有源复数滤波器精度较低,且不利于单片集成。为了研制全集成、高精度的复数滤波器,开关电容复数滤波器引起了滤波器学术界很大的兴趣。本文根据复数滤波器理论和开关电容网络理论,研究开关电容复数滤波器的级联实现及其在负通滤波中的应用。

1 复数滤波器理论^[2]

具有复传递函数的滤波器称为复数滤波器。复传递函数是一般实传递函数的推广,其分子、分母多项式的系数含有复数,一般可表示为

$$T(s) = T_r(s) + jT_i(s) \tag{1}$$

• 收文日期 1992-01-22

式中

$$T_z(s) = \frac{T(s) + \bar{T}(s)}{2} \tag{2a}$$

$$T_l(s) = \frac{T(s) - \bar{T}(s)}{2j} \tag{2b}$$

$\bar{T}(s)$ 为将 $T(s)$ 的全部复系数换成其共轭复数而得的复函数。由此所得的 $T_z(s)$ 与 $T_l(s)$ 均为复频率 s 的实函数, 即当 s 为实数时, $T_z(s)$ 、 $T_l(s)$ 均为实数。复传递函数的极、零点中, 至少含一个非共轭成对出现的复数极、零点, 因而其频率响应可不对称于零频率。

设具有复传递函数 $T(s)$ 的复数滤波器的输入、输出复信号分别为

$$X(s) = X_R(s) + jX_I(s) \tag{3}$$

$$Y(s) = Y_R(s) + jY_I(s) \tag{4}$$

则滤波器的输入—输出关系方程如下

$$Y(s) = T(s)X(s) \tag{5}$$

$$Y_R(s) = T_z(s)X_R(s) - T_l(s)X_I(s) \tag{6a}$$

$$Y_I(s) = T_l(s)X_R(s) + T_z(s)X_I(s) \tag{6b}$$

由式(5)与式(6)可绘出图1(a)所示的复信号流程图(SFG)与图1(b)所示实 SFG^[1]。根据实 SFG 便可找出实现复传递函数 $T(s)$ 的滤波器电路。

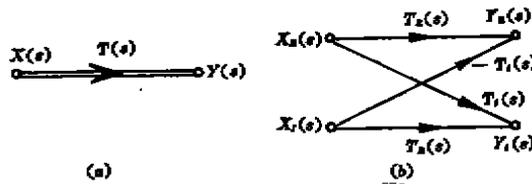


图1 复数滤波器的 SFG

下面以一阶复数滤波器为例, 研究其 RC 有源电路实现。设一阶复传递函数为

$$T(s) = -\frac{A + jB}{s + (a + j\beta)} \tag{7}$$

式中 A, B, a, β 均为正实常数。由式(7)可写出以下方程

$$Y(s) = (-s^{-1})[(A + jB)X(s) + (a + j\beta)Y(s)] \tag{8}$$

根据式(8)绘出对应的复 SFG 和等效实 SFG, 如图2(a), (b)所示。由图2(b)进而得到实现一阶复传递函数 $T(s)$ 的 RC 有源滤波器电路, 如图3所示。

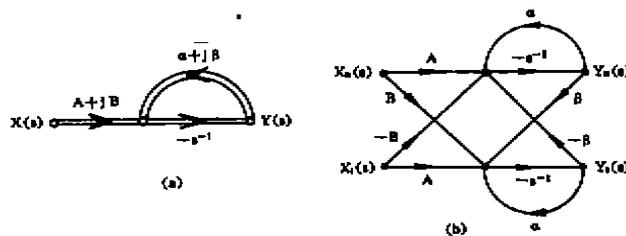


图2 一阶复数滤波器的 SFG

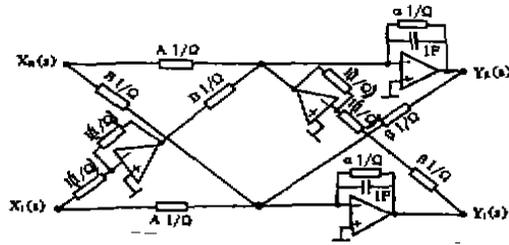


图3 RC有源复数滤波器

由此看出，一个复数滤波器实际上是一个双输入—双输出系统，它由一对相互交叉耦合的、完全相同的实数滤波器构成。

2 用开关电容电路实现级联型复数滤波器^[3,4]

任意 N 阶复传递函数均可表示为 N 个一阶复传递函数之积，因而它可用 N 个一阶复数滤波器通过级联来实现。故若采用级联法综合高阶复数滤波器，只需要一种基本节——一阶节，这是复数滤波器与实数滤波器的又一区别之处。因此，本文为了综合级联型开关电容复数滤波器，以下只需着重研究一阶复数滤波器的 SC 电路的实现问题。

开关电容电路实质上是一种采样数据系统，其分析与设计均涉及连续频域 (s 域) 与离散频域 (z 域) 之间的映射问题。由下式所定义的双线性变换

$$s = \frac{2}{Tc} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \tag{9a}$$

$$z = \frac{2 + sTc}{2 - sTc} \tag{9b}$$

是一种满足完善的映射要求的变换，被广泛采用。研究式(10)所示的一阶复传递函数

$$T(s) = -(bs + (A + jB))/(s + (\alpha + j\beta)) \tag{10}$$

式中 b, A, B, α, β 均为正实常数。对式(10)进行双线性变换，得

$$T_D(z) = -\frac{b(1 - z^{-1}) + (A' + jB')(1 + z^{-1})}{(1 - z^{-1}) + (\alpha' + j\beta')(1 + z^{-1})} \tag{11}$$

式中 $A' = (Tc/2) \cdot A$, $B' = (Tc/2) \cdot B$, $\alpha' = (Tc/2) \cdot \alpha$, $\beta' = (Tc/2) \cdot \beta$ 。

根据式(11)所示 z 域一阶复传递函数，可绘出 z 域复 SFG 和实 SFG，如图 4(a) 和 (b) 所示。

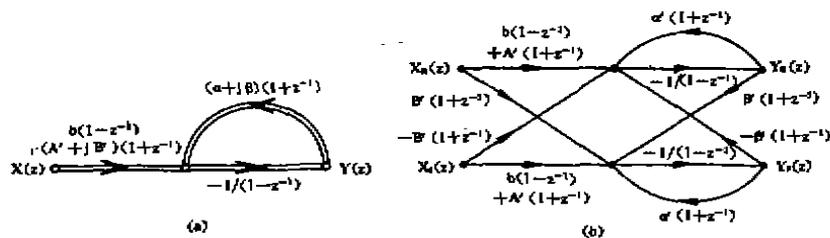


图4 SC复数滤波器的SFG

为实现式(11)所示的复传递函数，本文采用 SC 网络的 z 域等效导纳分析法，首先寻求

实现图4(b)SFG中各支路传输值的SC单元电路,进而便可得到实现整个SFG所代表的传递函数的SCF。

根据图4(b)中支路传输值的类型,本文选用了表1中列出的几种对寄生电容不敏感的SC单元电路。表中同时列出了各SC单元电路的 z 域等效导纳表达式。SC单元电路的 z 域等效导纳定义于后。

表1 SC单元电路

SC单元电路	z 域等效导纳	
	ψ_1 输出	ψ_2 输出
	$-c_1 z^{-1}$	$-c_1$
	$-c_1$	$-c_1 z^{-1}$
	c_1	
		c_1
	$c_1 z^{-1}$	
		$c_1 z^{-1}$
	$c(1-z^{-1})$	$c(1-z^{-1})$

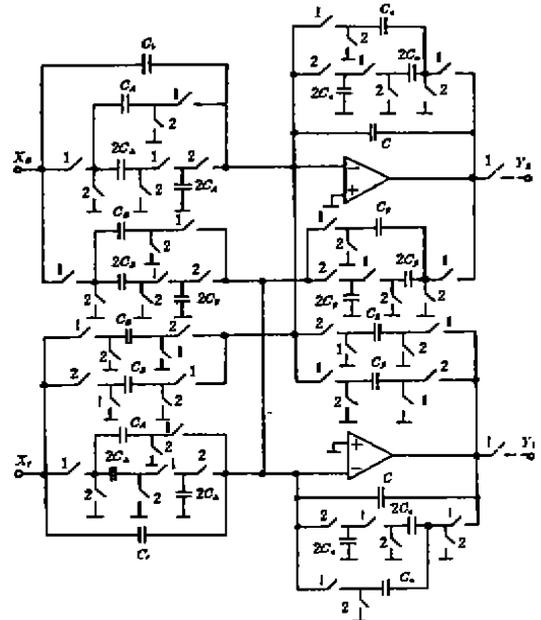


图5 一阶SCCF电路

表1中各SC单元电路 a 端接电压源(输入电源或运放输出端), b 端接运放输入端。输入信号在整周期 $[(n-1)Tc, nTc]$ ($n=1, 2, 3, \dots$)内采样保持。若运放输出采样时刻为 $\dots(n-1)Tc, nTc, (n+1)Tc, \dots$,则在时钟信号一周期 $[(n-1)Tc, nTc]$ 时间内,流出 b 端的电荷量(z 变换式)与 a, b 间的电压(z 变换式)之比定义为该SC单元电路的 z 域等效导纳,即 $G(z) = \Delta Q(z) / V(z)$ 。若连接于某运放输入端的各SC单元电路的 z 域等效导纳为已知,则在该输入端列写电荷平衡方程 $\sum \Delta Q_i(z) = 0$,由此可求出相应的 z 域传递函数。

结合图4(b)与表1,且合并某些开关,得到图5所示的SC电路,这是实现式(10)所示的一阶复传递函数的一种SCCF电路。

3 用开关电容复数滤波器实现负通滤波

SCCF的频率响应的对称中心可不为零,即可为正值或负值的任何频率,且频率响应对中心频率呈算术对称。利用上述特性,我们可以设计中心频率为任何值(包括负值)的带通滤波器,以满足某些特殊的滤波器技术条件。

在通讯系统中,为了实现信号的单边带(SSB)传输,通常,先使基带信号经低通滤波器成为限带信号,再用高频载波调制,最后用单边带带通滤波器对已调制信号滤波,得到所需

SSB 信号。按上述方案，带通滤波器的中心频率很高，这对于采取开关电容滤波技术带来困难。为避免 SCF 工作在很高的频率下，可以利用 SCCF，用图6所示方案得到 SSB 信号。即基带信号首先经 SCCF 进行负通滤波，成为零频率附近的单边带信号，再经正交载波调制，即得已调制的 SSB 信号。

图6中的 SC 复数负通滤波器，实际上是中心频率为 $-\omega_0$ ($\omega_0 > 0$)、通频带宽度约为 $2\omega_0$ 的 SC 复数带通滤波器。下面举一算例说明 SC 复数负通滤波器的设计方法。例中采用了频移法综合复数滤波器。

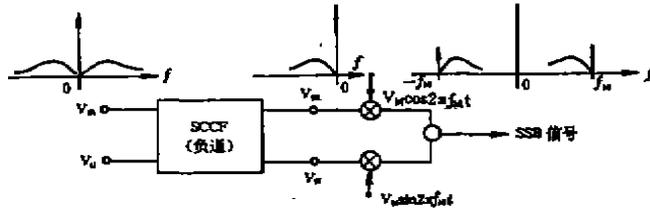


图 6 用 SCCF 获得 SSB 信号

设给定 SCCF 的衰减技术条件如图7(a)所示，即通频带自 -2500 Hz 至 -500 Hz ，通带最大衰减 $A_{max} = 1\text{ dB}$ ，止频带边界频率为 -3500 Hz 和 500 Hz ，止带最小衰减 $A_{min} = 20\text{ dB}$ 。

通带中心频率为 $f_0 = \frac{-2500 + (-500)}{2} = -1500\text{ Hz}$ ，止带边界满足对中心频率算术对称的要求。

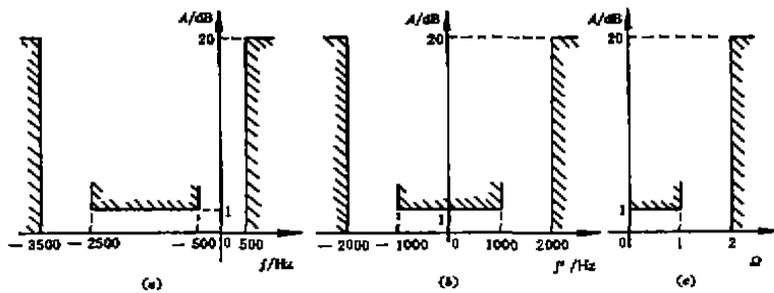


图 7 负通滤波器的技术条件

对技术条件作频移变换，使对称中心移动至零，即令 $f' = f + 1500$ ，如图7(b)所示。可以看出，频移变换后的技术条件实际上就是一般实低通滤波器的技术条件。经频率归一化后，得到图7(c)所示的实低通原型滤波器技术条件。

用 Chebyshev 逼近得到以下归一化低通函数

$$T_{NL}(p) = \frac{0.49130}{(p^2 + 0.49417p + 0.99420)(p + 0.49410)} \tag{12}$$

为了级联实现，将上式改写成

$$T_{NL}(p) = \left(\frac{-1}{p + 0.24708 - j0.96600} \right) \cdot \left(\frac{-1}{p + 0.24708 + j0.96600} \right) \cdot \left(\frac{0.49130}{p + 0.49410} \right) \tag{13}$$

去归一化后得

$$T_L(p) = \left(\frac{-6283.2}{p + 1552.4 - j6069.6} \right) \cdot \left(\frac{-6283.2}{p + 1552.4 + j6069.6} \right) \cdot \left(\frac{3086.9}{p + 3104.5} \right) \quad (14)$$

对式(14)所示实低通函数作频移变换,即得满足原技术条件的复传递函数

$$\begin{aligned} T(s) &= T_L(p) \Big|_{p=s+j2\pi \times 1500} \\ &= \left[\frac{-6283.2}{s + (1552.4 + j3355.2)} \right] \cdot \left[\frac{-6283.2}{s + (1552.4 + j15494.4)} \right] \\ &\quad \cdot \left[\frac{3086.9}{s + (3104.5 + j9424.8)} \right] \\ &= T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot T_3(s) \end{aligned} \quad (15)$$

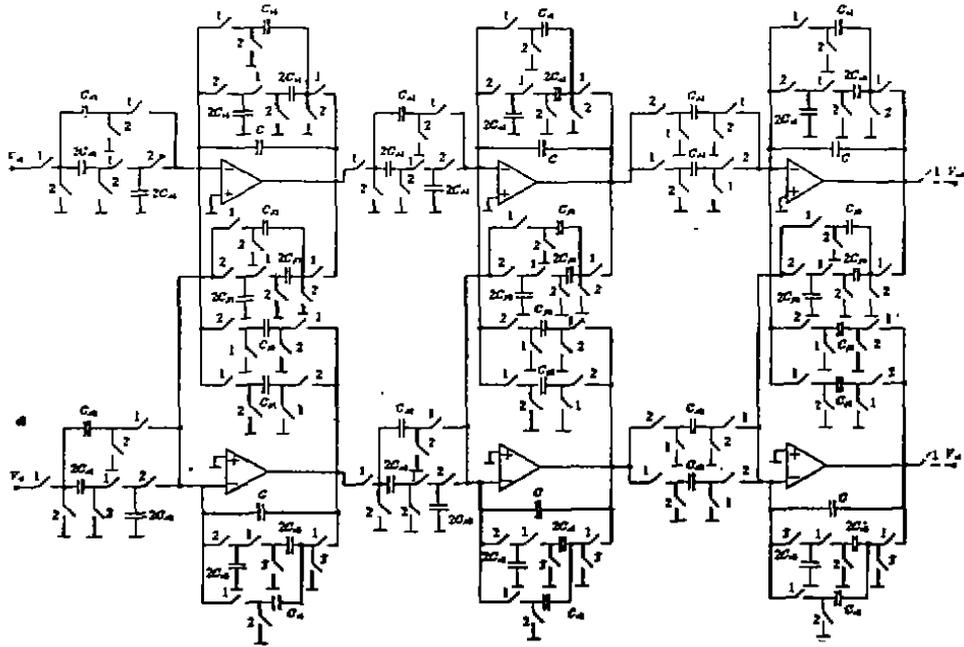


图8 负通SCCF电路

式(15)中 $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ 、 $T_3(s)$ 均为一阶复传递函数,其中 $T_1(s)$ 、 $T_2(s)$ 和式(10)取 $B = b = 0$ 时的形式相同,故可直接采用图5所示SCCF电路来实现,这时需要去掉图中的 C_6 支路及含 C_6 的SC单元电路。注意到 $T_3(s)$ 分子为正实数,与式(10)中令 $B = b = 0$ 时的传递函数相比较分子反号,故其 s 域实SFG可由图4(b)去掉含 B' 的支路、令 $b = 0$ 、并将 A' 换为 $-A'$ 得到。

根据以上讨论,设计出满足给定技术条件的级联型SCCF,如图8所示。图中各电容参数为: $C = 100\text{pF}$, $C_{A1} = 7.854\text{pF}$, $C_{o1} = 1.940\text{pF}$, $C_{p1} = 4.195\text{pF}$, $C_{A2} = 7.854\text{pF}$, $C_{o2} = 1.940\text{pF}$, $C_{p2} = 19.37\text{pF}$, $C_{A3} = 3.859\text{pF}$, $C_{o3} = 3.880\text{pF}$, $C_{p3} = 11.78\text{pF}$, 时钟频率 $f_c = 40\text{kHz}$ 。

应用作者基于撕裂法编制的SCF分析程序,对以上算例所设计的SCCF进行计算机模

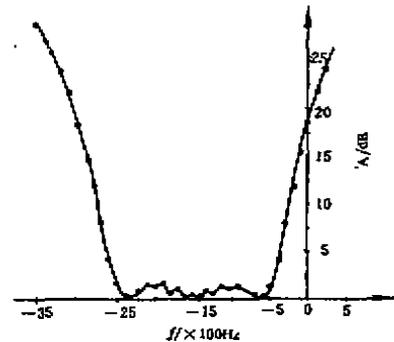


图9 负通SCCF的衰减特性

拟,得到图9所示的衰减特性。可以看出,它满足题设技术条件,与预期结果相吻合。

4 结束语

本文基于复数滤波器理论,应用复信号流程图和开关电容网络的 z 域等效导纳分析法,研究了开关电容复数滤波器的级联实现,提出了一种SCCF一阶基本节电路。利用复传递函数的频率响应不对称于零频率的特性,讨论了SCCF在负通滤波中的应用,并进行了SC复数负通滤波器实例设计,给出了其衰减特性的计算机模拟结果,与预期结果一致。

参 考 文 献

- 1 Lang G R, Bracket P O. Complex Analogue Filters. In: Proc European Conf on Circuit Theory and Design, Netherland, 1981. 412~419
- 2 Sedra A S, Snelgrove W M, Allen R. Complex Analog Band-Pass Filters Designed by Linearly shifting Real Low-pass Prototype. In: Proc on circuits and Systems. Japan, 1985. 1223~1226
- 3 Datar R B, Sedra A S. Exact Design of Stray-Insensitive Switched-Capacitor Ladder Filters. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1983, CAS-30(12), 888~898
- 4 Ghausi M S, Laker K R. Modern Filter Design Active RC and Switched Capacitor. Printice-Hall, 1981