

类梳状补偿滤波器设计与仿真

张 磊,狄建国,吴淑婷,王建新,方 熙

(北京电子科技学院,北京 100070)

摘 要: 积分梳状(CIC;cascaded integrator comb)滤波器由于具有运算速度较快,占用资源少等优点,而被广泛应用于多信号抗混叠系统中.针对传统CIC滤波器因简单级联而带来的通带失真增大和阻带衰减减小的缺陷,本文基于CIC滤波器的传递函数以及频谱特性分析,提出了一种类梳状补偿滤波器(SCC_CIC:similar to comb compensation CIC)的设计方案,根据实际需要调整参数和来满足设计要求.同时,利用多相分解技术重构滤波器结构,提升了整个系统的运行效率,且实现复杂度较低.通过MATLAB仿真实验及分析,相比 $N=2$ 的同级联数的传统CIC滤波器、ISOP_CIC(interpolated second-order polynomials CIC)和SCIC(sharpening to cascaded integrator-comb)滤波器,SCC_CIC滤波器在 f_s 处的阻带衰减分别增加近80dB、60dB和70dB,在 f_c 处分别补偿通带失真97.3%、90.1%和-2%,整个滤波器的运算量减小到 $1/D$,滤波器的精确度基本保持一致,使得SCC_CIC能够较好地应用在抗混叠滤波系统中.

关键词: 积分梳状滤波器;类梳状补偿滤波器;通带失真;阻带衰减;多相分解;抗混叠滤波

中图分类号: TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2018)08-1997-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.08.027

The Designing and the Simulation of the SCC_CIC Compensation Filter

ZHANG Lei, DI Jian-guo, WU Shu-ting, WANG Jian-xin, FANG Xi

(Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: For the advantage of high speed in computing and very limited consumption of resource, CIC (cascaded integrator comb) filter has been widely used in Multi-signal anti-aliasing systems. In this paper, we proposed a SCC_CIC (similar to comb compensation CIC) filter based on the transfer function of CIC filter and the analysis of its spectrum characteristics. The SCC_CIC filter could combat the disadvantage of high pass-band distortion and low stop-band attenuation brought by filter cascading. In practice, we could adjust parameter $C1$ and K to satisfy the requirement of the system. In addition, by reconstructing the structure of the filter with the aid of poly-phase decomposition technique, the efficiency of the system could be improved evidently. As shown in numerical Monte-Carlo simulation results, compared with the traditional CIC, the ISOP_CIC (interpolated second-order polynomials CIC) and the SCIC (sharpening to cascaded integrator-comb) filters, the advantage of the SCC_CIC for the stop-band attenuation is approximately 80dB, 60dB and 70dB, respectively. Compared with the CIC, the ISOP_CIC, and the SCIC filter, the advantage for the pass-band distortion of our method has been improved by approximately 97.3%, 90.1% and -2% accordingly. For the SCC_CIC filter, the total computation complexity could be decreased to $1/D$ the complexity required by the CIC filter. These advantages facilitate the application of the SCC_CIC filter in numeral Multi-signal anti-aliasing systems.

Key words: cascaded integrator comb filters; similar to comb compensation CIC; pass-band distortion; stop-band attenuation; poly-phase decomposition; anti-aliasing filtering

1 引言

CIC(cascaded integrator comb)滤波器是无线通信中常用的模块,由于滤波器结构简单,没有乘法器,只需

要加法器、积分器和少量的寄存器就可以实现高采样率条件下多速率信号的处理,因而CIC是高速抽取或插值系统中重要的单元,具有重要的研究意义和广泛的应用前景.

然而,传统 CIC 滤波器仅通过简单级联的方式导致系统通带失真增大、阻带衰减减小,无法在通带和阻带性能要求较高的变换系统中应用^[1]. 目前,文献[2~11]提出了改进 CIC 滤波器的设计方案,但这些方案主要围绕降低功耗、改善通带和阻带性能等单方面展开,或通带和阻带的性质同时得到有效改善却额外增加了大量的工作器件,极大限制了 CIC 滤波器在采样率变换系统中的应用.

文献[2,3]提出利用 SCIC 锐化滤波器(sharpening to cascaded integrator-comb)的改进方案,该改进滤波器利用锐化技术使传统 CIC 滤波器在通带和阻带性能方面得到改善,但资源开销大. 部分锐化滤波器^[4,5]是锐化滤波器的一种有效改进方式,相比 SCIC 滤波器阻带性能有所提高,但无法有效弥补通带失真,同时工程实现占用资源较大. 在传统 CIC 滤波器系统上级联一个内插或抽取二阶多项式,这是二阶多项式滤波器 ISOP-CIC^[6-8](interpolated second-order polynomials CIC)相应的另一种改进方法,能够有效减少硬件实现时所占的逻辑资源,但只能单方面的补偿系统的通带失真,无法解决阻带衰减减小的问题. 文献^[9-11]提出了新型多相分解 CIC 滤波器,该滤波器把非递归结构与多相分解技术相结合,减少高采样率区的工作器件,有效降低了系统功耗,但通带和阻带的性能较差.

通过分析已有 CIC 滤波器的改进方法,找出影响通带、阻带和运算效率的关键因素,本文给出了 SCC_CIC 的设计及实现方案,首先将两个补偿滤波器级联到传统 CIC 滤波器系统中,再利用多相分解技术重构部分滤波器. 通过 MATLAB 仿真及分析,相比 $N=2$ 的同级联数的传统 CIC 滤波器、ISOP_CIC 和 SCIC 滤波器,本文提出的 SCC_CIC 滤波器在 f_s 处的阻带衰减分别增加了近 80dB、60dB 和 70dB,在 f_c 处分别补偿通带失真 97.3%、90.1% 和 -2%,并随着参数 K 的增加,阻带衰减增大显著. 同时,多相分解技术使整个滤波器的运算量减小到 $1/D$,有效的降低计算复杂度,从而大大提高运算的效率. 利用 FPGA 仿真及分析,SCC_CIC 滤波器能够更好的应用在多信号抗混叠系统中.

2 传统 CIC 滤波器分析

由文献^[12,13]可知,CIC 滤波器主要由积分滤波器 $H_i(z)$ 和梳状滤波器 $H_c(z)$ 两部分级联组成,其系统函数 $H(z)$ 为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{D-1} z^{-n} = \frac{1}{1-z^{-1}}(1-z^{-D}) \quad (1)$$

其中:

$$H_i(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (2)$$

$$H_c(z) = 1 - z^{-D} \quad (3)$$

式(1)中 D 为传统 CIC 滤波器的抽取因子.

抽取因子为 D 的传统单级 CIC 抽取滤波器,其直接结构如图 1(a) 所示,根据文献[14]得到 Hogenauer 的等价结构,如图 1(b) 所示.

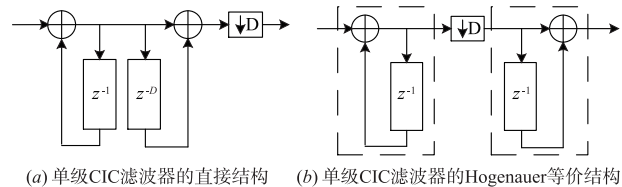


图1 传统CIC滤波器实现结构

对 CIC 滤波器的冲激响应函数进行傅里叶变换,可得到其幅频特性函数为:

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sin(\omega D/2)}{\sin(\omega/2)} \right| \quad (4)$$

由公式(4)可知,单级 CIC 滤波器的主瓣区间为 $[0, 2\pi/D]$ 、第一旁瓣区间为 $[2\pi/D, 4\pi/D]$,当 $D > 1$ 时,第一旁瓣幅度为 $2D/3\pi$,它与主瓣幅度的差值 $a = 20\log(D/2D/3\pi) = 20\log(3\pi/2) \approx 13.46\text{dB}$. 设抽取因子 $D=2, D=5, D=8$,得到传统 CIC 滤波器的幅频特性,如图 2 所示.

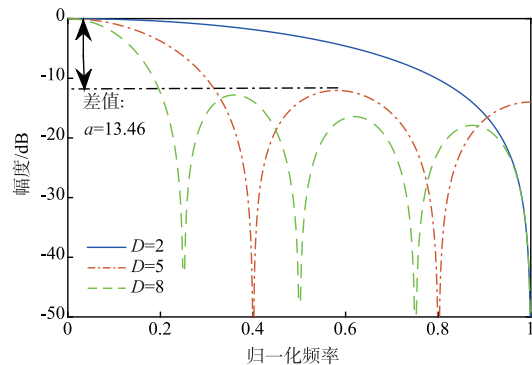


图2 不同抽取因子的CIC幅频特性

由图 2 可知,当滤波器的抽取因子 D 大于 1 时,第一旁瓣和主瓣幅度的差值为固定值 13.46dB. 显然,这么小的阻带衰减远不能满足滤波器的设计需求. 根据文献[15,16],将单级 CIC 滤波器进行级联,增加 N 级级联滤波器,则旁瓣幅度衰减相应的线性增加 $13.46 * N$ dB,同时,因简单级联带来的通带失真和阻带衰减不明显等问题随之出现.

3 SCC_CIC 滤波器的设计与实现

本文提出了两个结构简单、易于实现的补偿滤波器 $H_{sc1}(z)$ 和 $H_{sc2}(z)$,将这两个补偿滤波器与传统的 CIC 滤波器级联,然后再利用多相分解技术实现一种类梳状补偿 CIC 滤波器(SCC_CIC, Similar to Comb Compensation CIC)的设计,整个滤波器的设计方案如图 3 所示.

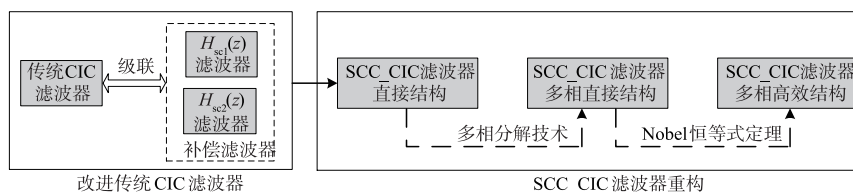


图3 SCC_CIC滤波器的设计方案

3.1 补偿滤波器设计及实现

滤波器 $H_{sc1}(z)$ 和 $H_{sc2}(z)$ ^[17-18] 属于两个简单的 FIR 滤波器,能够保证 z 在 $\left[\frac{2\pi}{D} \cdot K, \frac{2\pi}{D} \cdot (K+1)\right]$, $K \in [0, D]$ 的频率范围内是线性相位.

$$\begin{cases} H_{sc1}(z) = c_1 - z^{-D}, c_1 > 1 \\ H_{sc2}(z) = ((1 + z^{-2q}) \cdot (1 + z^{-q})^2 / a)^k, k \geq 1, q = \frac{D}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: D 为 CIC 滤波器的抽取因子; a 为固定常数. C_1 为通带补偿因子; K 为阻带衰减因子. 通过调节参数 C_1 , $H_{sc1}(z)$ 滤波器能有效的补偿级联 CIC 滤波器的通带失真,调节参数 K , $H_{sc2}(z)$ 滤波器能有效增大阻带衰减.

N 级传统 CIC 滤波器与 $H_{sc1}(z)$ 、 $H_{sc2}(z)$ 滤波器级联得到三级结构的新型 SCC_CIC 滤波器,其传递函数为:

$$H_{SCC_CIC}(z) = \left(\frac{1 - z^{-D}}{1 - z^{-1}}\right)^N \cdot (c_1 - z^{-D}) \cdot ((1 + z^{-2q}) \cdot (1 + z^{-q})^2 / a)^k, k \geq 1, c_1 > 1, q = \frac{D}{2} \quad (6)$$

为方便讨论,令常数 $a = 1$. 通过合理的调节 C_1 和 K 这两个参数能够有效改善 CIC 滤波器的性能.

3.2 基于多相分解技术的滤波器重构

首先,将两个补偿滤波器 $H_{sc1}(z)$ 、 $H_{sc2}(z)$ 与 N 级的积分器 $H_i(z)$ 、梳状器进行级联 $H_c(z)$,便可得到 SCC_CIC 滤波器的直接实现结构,如图 4 所示.

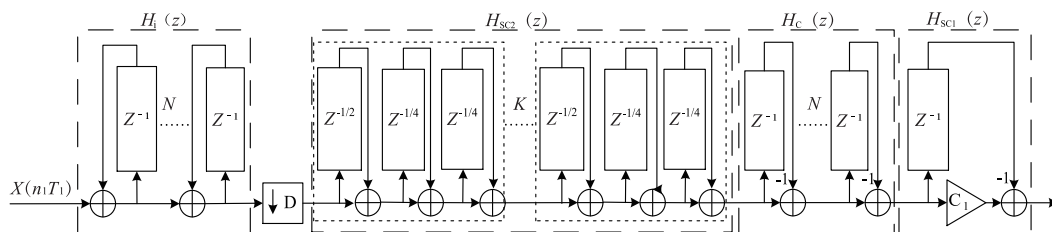


图4 SCC_CIC滤波器的直接结构

由图 4 可知,设 $X(n_1 T_1)$ 在时间 T_1 内完成 $H_i(z)$ 滤波器的处理运算,当 n_1 是 D 的整数倍时, $X(n_1 T_1)$ 能够通过 $\downarrow D$ 进入下一个滤波器系统,否则将无法通过 $\downarrow D$ 而被舍弃. 即:设 $m = n_1 / D$, m 为正整数, $n_1 = mD$ 时, $X((mD) T_1)$ 和 $X((m+1)DT_1)$ 能够有效通过系统,而 $X((mD) T_1)$ 和 $X((m+1)DT_1)$ 之间的 $D-1$ 个运算结果因无法通过 $\downarrow D$ 而被舍弃,这 $D-1$ 个运算被称为系统的冗余运算.

为减少积分器 $H_i(z)$ 的冗余运算量,由滤波器多相分解技术文献^[19]得:

$$\begin{aligned} H_i(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} h(n)z^{-n} = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots \\ &= \sum_{l=0}^{D-1} z^{-l} \times \sum_{n=0}^{\infty} h(Dn+l)z^{-Dn} \\ \text{令 } E_l(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} h(Dn+l)z^{-n} \\ \text{则 } H_i(z) &= \sum_{l=0}^{D-1} z^{-l} E_l(z^D) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $h(Dn+l)$ 为多相分量,由公式(7)得到 N 级

积分滤波器 $H_i(z)$ 的多相结构^[20-21],如图 5 所示.

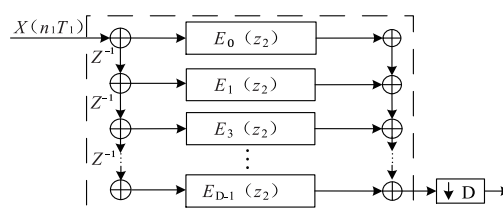


图5 N 级积分滤波器多相结构

根据 Nobel 恒等式原理,将图 5 中抽取操作 $\downarrow D$ 移到各支路, $E_l(z^D)$ 移到抽取因子 D 右侧,便可得到整个 SCC_CIC 滤波器的多相型高效结构,如图 6 所示.

由图 6 可知, $X(n_1 T_1)$ 到达 $H_i(z)$ 滤波器输入端,当 n_1 是 D 的整数倍时, z^{-1} 延迟链上的数据为 $X(n_1 T_1)$ 、 $X((n_1 - 1) T_1)$ 、 \dots 、 $X((n_1 - D + 1) T_1)$,这时所有的 $\downarrow D$ 均能够通过,否则将无法通过 $\downarrow D$ 而被停止运算,有效避免图 5 中 $D-1$ 个无效运算. 节约了大量的运算时间,因此,在相同数据速率要求情况下, $\downarrow D$ 右端的系统被允许的运算时间为 $T_2 = DT_1$.

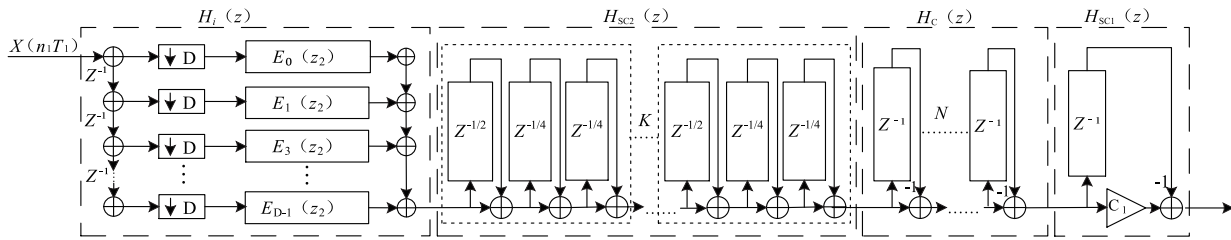


图6 SCC_CIC滤波器多相型高效结构

图 7 给出了 $D = 16, N = 2, K = 1, C_1 = 2$ 情况下的 $H_{sc1}(z)$ 、 $H_{sc2}(z)$ 、 $H_{sc-cic}(z)$ 以及传统 CIC 滤波器的幅频特性曲线。

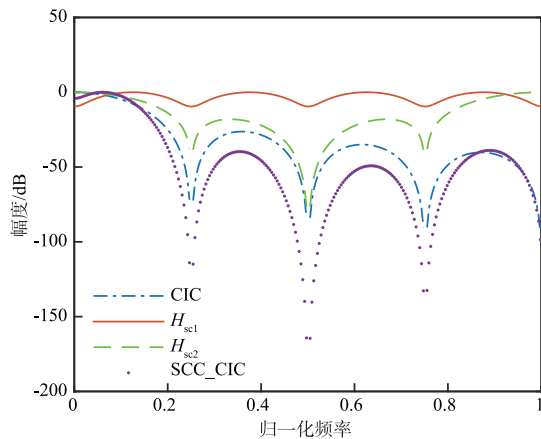


图7 $H_{sc1}(z)$ 、 $H_{sc2}(z)$ 、 $H_{sc-cic}(z)$ 与 CIC 频率响应

综合图 6、图 7 可知，(1) 利用多相分解技术能够有效减少冗余计算量，使整个滤波器的运算量减小到原来的 $1/D$ ，从而大大提高运算的效率，且随着 D 的增大，多相型高效结构的性能优势会更加明显。(2) 与传统 CIC 滤波器相比，SCC_CIC 滤波器通带性能有效改善，阻带衰减增加了近 1 倍。因此，改进型 SCC_CIC 滤波器在通带、阻带性能和运算效果等方面有了进一步提高，达到了预期的设计效果。

4 SCC_CIC 滤波器的仿真与应用

4.1 SCC_CIC 滤波器的仿真

从 SCC_CIC 滤波器的频谱特性函数可以看出，影响其滤波性能的因素主要是参数 C_1 和 K ，适当的调整这两个参数能够满足通带、阻带的性能要求。设系统的抽取因子 $D = 16$ ，改变其中一个参数值进行仿真分析，得到不同参数值下 SCC_CIC 滤波器的零频 f_p 处的通带失真、 f_c 处的通带失真和 f_s 处的阻带衰减，如表 1 和表 2 所示。

为更直观的看出参数 C_1 和 K 对滤波性能的影响，特将参数 K, C_1 对阻带衰减的影响作具体分析，如图 8 所示。

表 1 参数 C_1 变化时 SCC_CIC 滤波器性质

滤波器	$N=2$ $K=2$	零频率 f_p 处 通带失真/dB	频率点 f_c 处 通带失真/dB	频率点 f_s 处 阻带衰减/dB
CIC	--	0	-1.044	-72.4
SCC_CIC	$C_1=2$	-3.239	-2.390	-152.5
SCC_CIC	$C_1=3$	-0.711	-0.495	-150.0
SCC_CIC	$C_1=4$	-0.068	-0.024	-149.3
SCC_CIC	$C_1=5$	0	0.012	-147.9

表 2 参数 K 变化时 SCC_CIC 滤波器性质

滤波器	$N=2$ $C_1=2$	零频率 f_p 处 通带失真/dB	频率点 f_c 处 通带失真/dB	频率点 f_s 处 阻带衰减/dB
CIC	--	0	-1.044	-72.4
SCC_CIC	$K=1$	-1.265	-0.990	-112.1
SCC_CIC	$K=2$	-0.711	-0.825	-150.0
SCC_CIC	$K=4$	-0.152	-0.054	-226.3
SCC_CIC	$K=6$	0	-0.020	-303.0

由图 8 可知：相比参数 K ，参数 C_1 对通带失真的影响更大，当参数 $K \leq 4$ 时，约是参数 K 的 5 倍，当参数 $K > 4$ 时，两者相当。相比参数 C_1 ，参数 K 对阻带衰减的影响更大，约是参数 C_1 的 26 倍。综合可知：参数 K 对通带失真和阻带衰减的影响程度比参数 C_1 大，即：参数 K 对 SCC_CIC 滤波器性能的影响大于参数 C_1 。

SCC_CIC 滤波器与 CIC 滤波器及其它改进滤波器在阻带和通带性能方面的比较^[22-24]，如表 3 所示。

表 3 SCC_CIC 和其它改进滤波器性能比较

滤波器	N	K	C_1	C	频率点 f_c 处 通带失真/dB	频率点 f_s 处 阻带衰减/dB
CIC	2	--	--	--	-0.447	-72.4
CIC	3	--	--	--	-0.670	-107.8
CIC	6	--	--	--	-1.341	-217.2
SCC_CIC	2	2	5	--	-0.012	-147.9
SCC_CIC	2	4	3	--	-0.054	-226.3
SCC_CIC	2	6	3	--	-0.020	-303.0
ISOP_CIC	2	--	--	8	-0.121	-93.9
ISOP_CIC	4	--	--	8	-0.225	-130.3
SCIC	2	--	--	--	-0.004	-84.6

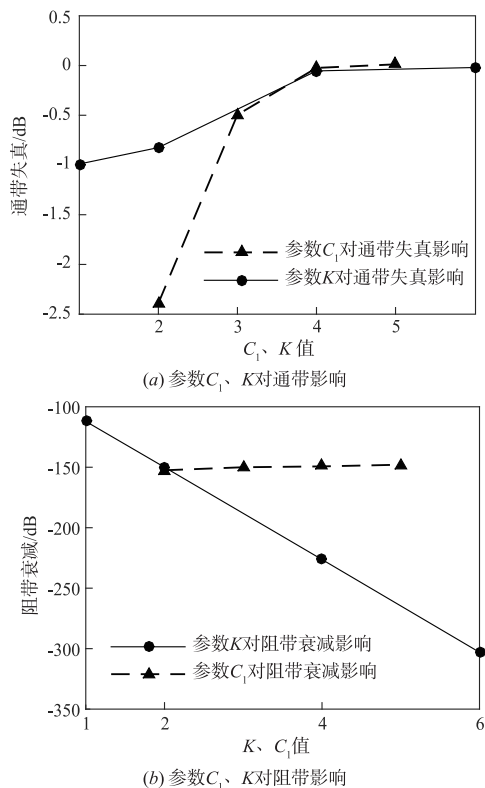


图 8 参数 C_1 、 K 对通带、阻带的影响

表 4 列出了 $D = 16, K = 1, C_1 = 5$ 的 SCC_CIC、ISOP_CIC、SCIC、CIC 四种抗混叠滤波器的资源、复杂度对比。

表 4 SCC_CIC 和其它抗混叠滤波器资源、复杂度比较

滤波器	N	乘法器数量	加法器数量	复杂度
SCC_CIC	2	1	6	$O(3^N + 16)$
SCC_CIC	4	1	10	
SCC_CIC	6	1	14	
ISOP_CIC	2	1	6	$O(3^N + 2)$
ISOP_CIC	4	1	10	
SCIC	2	2	12	$O(3^{3N})$
CIC	2	0	4	$O(3^N)$
CIC	4	0	8	
CIC	6	0	12	

综合表 3 和表 4 可知:(1)与 N 级的 CIC 滤波器相比,SCC_CIC 滤波器增加了 2 个加法器和 1 个乘法器, f_c 处的通带失真得到了有效的补偿, f_s 处的阻带衰减明显增大,性能有效提高了近 50%;当 $N = 6$ 时,传统 CIC 滤波器的阻带性质和 SCC_CIC 滤波器在 $N = 2, K = 4, C_1 = 3$ 的性质相当,但 SCC_CIC 滤波器的通带相比 CIC 滤波器性能提升近 3 倍。(2)SCC_CIC 滤波器在改善通带性能方面和 SCIC 滤波器接近, $N = 2$ 的 SCIC 滤波器在频率点 f_s 处阻带衰减为 84.6dB,而 SCC_CIC 比 SCIC 滤波器提高了近 70dB,且 SCC_CIC 滤波器占用更少数量的乘法器和加法器。(3)在 $N = 4, C_1 = 8$ 时,ISOP_CIC 的阻带性能和 SCC_CIC 滤波器在 $N = 2, K = 2, C_1 = 5$ 时的性能相当,但 SCC_CIC 滤波器的级联数是 ISOP_CIC 的一半,并且随着参数 K 的增加,SCC_CIC 滤波器的阻带性能改善显著。(4)四种抗混叠滤波器的复杂度由高到低为:SCIC、SCC_CIC、ISOP_CIC、CIC;级数 N 相同情况下,SCC_CIC 滤波器的复杂度与多信号抗混叠滤波器 ISOP_CIC 近似相等,但远小于 SCIC 滤波器;每一次运算,SCC_CIC 滤波器比传统 CIC 滤波器多 16 次乘除法运算,并且随着级数 N 的增加,两者的复杂度近似相等。

4.2 SCC_CIC 滤波器的抗混叠性应用

设 SCC_CIC 滤波器系统的抽取因子 $D = 5$ 、级联数 $N = 3$ 、阻带因子 $K = 1$ 、通带因子 $C_1 = 2$,利用 FPGA 设计出 SCC_CIC 滤波器作为抗混叠滤波器.输入频率为 1000Hz 和 30000Hz 的正弦混叠信号,利用 Model-Sim 仿真输入 SCC_CIC 滤波器的前后仿真波形如图 9 所示。

由图 9 可知,混叠信号 X_{in} 通过 SCC_CIC 滤波器后生成 Y_{out} ,输出信号由原来的正弦混叠信号变成单一的正弦信号,且滤波后的数据速率降低到 1/5. 为了更直观地看出 SCC_CIC 滤波器的抗混叠性效果,给出通过 SCC_CIC 滤波器前后的数据波形,如图 10 所示。

由图 10 可知,通过 SCC_CIC 滤波器后,输出信号变成单一的 1000Hz 正弦信号.对比传统 CIC 与 SCC_CIC 滤波器的抗混叠效果,得到通过滤波器前后混叠信号的频谱图形,如图 11 所示。

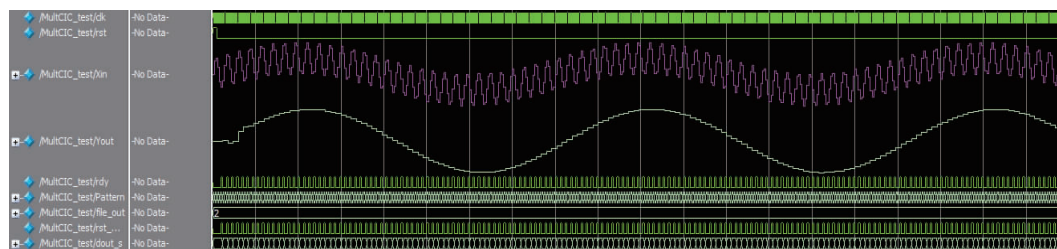


图 9 ModelSim 仿真 SCC_CIC 抗混叠滤波器波形图

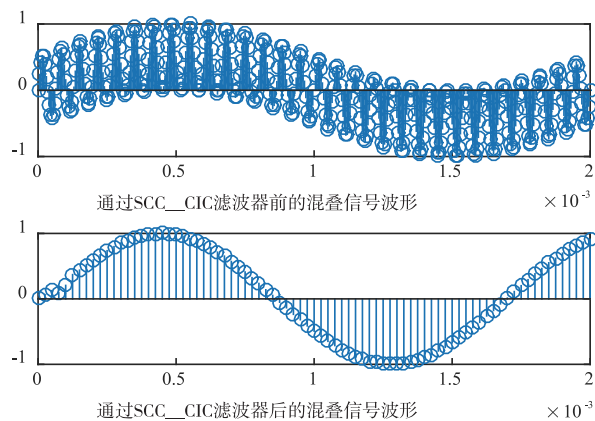


图10 通过SCC_CIC滤波器前后混叠信号波形图

经过滤波器后的信号幅度衰减极小,可以忽略不计.因此,我们考察输出频谱信号的相位差,并规定滤

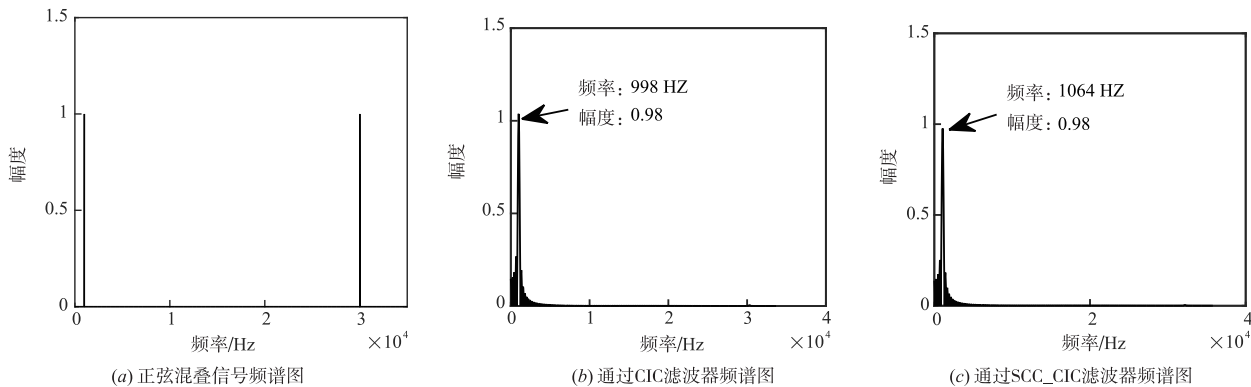


图11 通过CIC、SCC_CIC滤波器前后混叠信号频谱图

5 结论

传统 CIC 滤波器由于结构简单、运算速度较快、工作稳定等优点,被广泛应用于多信号抗混叠系统中.本文提出了一种 SCC_CIC 滤波器的设计方案,将两个补偿滤波器 $H_{sc1}(z)$ 和 $H_{sc2}(z)$ 级联到传统 CIC 滤波器系统中,利用多相分解技术重构滤波器结构.相比 $N=2$ 的同级的传统 CIC 滤波器、ISOP_CIC 和 SCIC 滤波器,SCC_CIC 滤波器,在 f_s 处的阻带衰减分别增加近 80dB、60dB 和 70dB,在 f_c 处分别补偿通带失真 97.3%、90.1% 和 -2%,并随着参数 K 的增加,阻带衰减增大显著,实现滤波器的通带和阻带性能同时提升.另一方面,SCC_CIC 滤波器采用多相分解技术使整个滤波器的运算量减小到 $1/D$,提升了运算效率,乘法器、加法器资源占有率低,运算复杂度低,结构易于实现.通过 FPGA 仿真及分析,SCC_CIC 滤波器实现抗混叠应用,滤波器的精确度基本保持一致.

SCC_CIC 滤波器在继承了 CIC 滤波器优点的基础上,弥补了传统 CIC 滤波器因简单级联而带来的通带

波器的精确度 $A(X)$ 为:

$$A(X) = \frac{\varphi_i - \varphi_o}{\varphi_i} \quad (8)$$

其中 φ_i 为输入信号的初始相位, φ_o 为输出信号相位.

由图 11 可知,通过 CIC 滤波器后的混叠信号,其频谱是频率为 998Hz、幅度大小为 0.998 的脉冲信号,存在 2Hz 的相位差,且有少量系统噪声,精确度 $A(\text{CIC})$ 为 99.8%;通过 SCC_CIC 滤波器后的混叠信号,其频谱是频率为 1064Hz、幅度大小为 0.981 的脉冲信号,存在 64Hz 的相位差,且有少量系统噪声,精确度 $A(\text{SCC_CIC})$ 为 93.6%;相比传统 CIC 滤波器,SCC_CIC 滤波器的精确度降低了 5% 左右,滤波器效果达到预期期望.因此,本文所提出的 SCC_CIC 滤波器满足多速率信号处理过程中抗混叠性的实际应用.

失真增大和阻带衰减减小的缺陷,提高了系统的运算效率,降低了数据速率,为硬件实现提供了理论支撑.

参考文献

- [1] 刘立,向新.高性能 CIC 抽取滤波器研究与设计[J].电视技术,2013,37(7):53-56.
Liu L, Xiang X. Design of high-powered CIC decimator filter[J]. Video Engineering, 2013, 37(7):53-56. (in Chinese)
- [2] Kwentus A Y, Jiang Z, Willson A N. Application of filter sharpening to cascaded integrator-comb decimation filters[J]. Signal Processing IEEE Transactions on, 1997, 45(2):457-467.
- [3] Jovanovic-Dolecek G, Mitra S K. Sharpened comb decimator with improved magnitude response[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004 Proceedings[C]. Canada: IEEE, 2004. 929-932.
- [4] Dolecek G J, Mitra S K. A new sharpened cascaded comb-cosine decimation filter[A]. Signal Processing Confer-

- ence,2005,European[C]. Turkey:IEEE,2005.37-38.
- [5] Torres F J T,Dolecek G J. Compensated CIC-cosine decimation filter[A]. Communications and Information Technologies,2007. ISCIT07. International Symposium on[C]. Turkey:IEEE,2007.256-259.
- [6] Oh H J,Lee Y H. Multiplierless FIR filters based on cyclotomic and interpolated second-order polynomials with powers-of-two coefficients[A]. Circuits and Systems, Proceedings of the 40th Midwest Symposium on[C]. USA: IEEE,1997.1449-1452.
- [7] Oh H J,Kim S,Choi G,et al. On the use of interpolated second-order polynomials for efficient filter design in programmable downconversion[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,1999,17(4):551-560.
- [8] 刘国稳,朱卫华. 高性能 CIC 滤波器的优化设计[J]. 计算机仿真,2016,33(2):234-238.
Liu G,Zhu W. Optimal design of high performance CIC filter[J]. Computer Simulation,2016,33(2):234-238. (in Chinese)
- [9] Hepbasli A,Ozalp N. Efficient polyphase decomposition of Comb decimation filters in $\Sigma\Delta$ analog-to-digital converters [A]. Circuits and Systems [C]. USA Midwest: IEEE,2000.898-903.
- [10] Aboushady H,Dumonteix Y,Louerat M M,et al. Efficient polyphase decomposition of comb decimation filters in sigma delta analog-to-digital converters [J]. Midwest Symposium on Circuits & Systems Mwscas,2000,1(10):898-903.
- [11] Aboushady H,Dumonteix Y,Louerat M M,et al. Efficient polyphase decomposition of comb decimation filters in $\Sigma\Delta$ analog-to-digital converters [A]. Circuits and Systems,2000. Proceedings of the,IEEE Midwest Symposium on [C]. USA IEEE,2000.432-435.
- [12] Hogenauer E. A class of digital filters for decimation and interpolation[A]. Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP [C]. USA:IEEE,2003.271-274.
- [13] Hogenauer E. An economical class of digital filters for decimation and interpolation[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing,1981,29(2):155-162.
- [14] Garcia A,Meyer-Baese U,Taylor F. Pipelined hogenauer CIC filters using field-programmable logic and residue number system[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. USA:IEEE,1998.3085-3088.
- [15] 杜勇. 数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京:电子工业出版社:2012:214-217.
Du yong. Digital Filter MATLAB and FPGA Implementation[M]. Beijing:Electronic Industry Press,2012.214-217. (in Chinese)
- [16] 冯维婷. 多速率采样中的 CIC 滤波器设计与分析[J]. 现代电子技术,2007,30(14):18-20.
- [17] Liu T,Zhan Y,Jianhua L U. Improved high performance cascaded integrator comb filter[J]. Journal of Tsinghua University,2009,49(1):65-68.
- [18] Xiong Z,Chen C. Superconvergence of rectangular finite element with interpolated coefficients for semilinear elliptic problem [J]. Applied Mathematics & Computation,2006,181(2):1577-1584.
- [19] 杜勇. FPGA 应用技术丛书:数字滤波器的 MATLAB 与 FPGA 实现(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社,2014.185-218.
- [20] 李冰,郑瑾,葛临东,等. 基于多相结构和部分锐化的 CIC 抽取滤波器[J]. 电子与信息学报,2007,29(4):1005-1008.
- [21] Liu Quan,Gao Jun,Huang Gao ming. On design of efficient comb decimator with improved response [J]. High Technology Letters,2012,18(2):202-207.
- [22] 叶和忠,赵利,彭小卫,等. 一种性能良好的高效 CIC 抽取滤波器的设计[J]. 桂林电子科技大学学报,2010,30(2):113-117.
- [23] 崔永俊,罗建华. FPGA 实现 FIR 抽取滤波器的设计[J]. 电子技术,2009,(2):4-6.
- [24] 史焕卿,邓春伟. 积分梳状滤波器的 FPGA 实现[J]. 现代电子技术,2008,31(17):31-33.

作者简介



张 磊 男,1979 年生于河北省.北京电子科技学院电子系副教授,硕士生导师,主要从事电子技术、信息安全、芯片设计等方面的研究工作.
E-mail:zhanglei@besti.edu.cn



狄建国 男,1991 年生于江苏省淮安市.北京电子科技学院研究生,研究方向为电子与信息安全.
E-mail:420679232@qq.com