

一种低功耗可变抽取倍数滤波器组的设计

王龙生^{1,2}, 谢 亮^{1,2}, 金湘亮^{1,2}

(1 湘潭大学 材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105; 2 微光电与系统集成湖南省工程实验室, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 提出一种以较少的功耗与面积实现可变抽取速率的数字抽取滤波器组. 该抽取滤波器组以梳状滤波器、补偿滤波器和半带滤波器三种滤波器级联的形式实现, 为减少其功耗和面积, 并提出了改进梳状滤波器的结构和电路实现形式以降低滤波器组的功耗和面积, 经验证, 采用非递归、多相分解的梳状滤波器结构比传统的 Hogenaur 梳状滤波器结构节省功耗 21%, 节省面积 5%. 当变换抽取速率时, 可关闭冗余抽取电路的工作, 从而进一步节省功耗.

关键词: 低功耗; 抽取滤波器组; 多速率; CIC; 非递归

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)08-0151-04

The Design of Low Power Alternative Rate Outputs Decimation Filters

WNAG Long-sheng^{1,2}, XIE Liang^{1,2}, JIN Xiang-liang^{1,2}

(1 Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2 Hunan Engineering Laboratory for Microelectronics,
Optoelectronics and System on A Chip, Xiangtan 411105, China)

Abstract: This paper given a method to design and realize the low power alternative-rate outputs decimation filters. This filters included cascaded integrated comb filters, compensation filter, and half-band filter, in order to decrease its power and area consumption, this paper proposed the method which taken non-recursive and polyphase decomposition to realize the cascaded integrated comb filters, which can saved 21% power and 5% area consumption compared with Hogenaur cascaded integrated comb filters. Besides, when change the output rates, the redundant circuit can be shut down to save more power consumption.

Key words: low power; decimation filters; alternative-rate outputs; CIC; non-recursive

1 引言

抽取滤波器多用于以过采样和噪声整形技术为基础的 Sigma-delta ADC 芯片中. Sigma-delta ADC 芯片主要用于高精度的模数转换场合中, 如 HiFi 音频、精密仪器测量、医学分析等. 随着社会的进步, 对 Sigma-delta ADC 的性能要求不仅局限于精度、速度方面, 对其功耗和面积也提出了更严格的要求^[1]. Sigma-delta ADC 主要包括 Sigma-delta 调制器和抽取滤波器两部分, Sigma-delta 调制器采集模

拟信号并将其变为高速、噪声信号与目标信号相互分离的数字信号; 抽取滤波器通过滤除 Sigma-delta 调制器输出的噪声信号并将输出速率降至信号的 Nyquist 频率, 从而输出高精度、低速率的数字信号. 且为适应不同场合的需求, 抽取滤波器需具备可变抽取倍数的特性^[2]. 在 Sigma-delta ADC 中, 其精度主要由 Sigma-delta 调制器决定, 面积和功耗则主要由抽取滤波器决定. 因此设计优化抽取滤波器不仅可提高 Sigma-delta ADC 的整体性能, 能够节省面积和功耗, 使低功耗的 Sigma-delta ADC 芯片更

收稿日期: 2013-10-13; **修回日期:** 2013-12-02

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金助项目(12JJ4064); 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ2036); 教育部科学技术研究重点项目(212125)

具市场竞争力。

本文提出的方法基于可变抽取速率滤波器组并对其进行功耗和面积的系统级优化设计. 该滤波器组包括 4 阶 16 或 48 倍可变抽取速率的梳状滤波器 (CIC), 2 倍抽取率的补偿滤波器 (CFIR) 和半带滤波器 (HBF). 文中采取非递归、多相分解变换方法对 Hogenaur 结构的 CIC 进行改进, 在减少功耗的同时减少处于高频带的寄存器数量。

2 抽取滤波器组的系统级设计

本文的滤波器组为 4 阶 CIC 滤波器进行 16/48 可变倍数的滤波抽取动作, 数据经过 CIC 后接 CFIR 和 HBF. 其中 CFIR 用于补偿 CIC 的通带衰减并进行 2 倍的滤波抽取动作, HBF 作为最后一级的滤波抽取动作, 该滤波器组的系统框图如图 1 所示. 其中 R_1 、 R_2 、 R_3 为抽取倍数, $R_1 = 16/48$ 可变, $R_2 = R_3$ 为固定值 2. 下面针对此滤波器组进行优化设计。

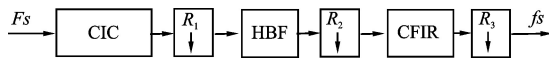


图 1 抽取滤波器组的系统框图

3 CIC 的优化设计:

由 Hogenaur 理论, 对于一个 L 阶、降采样率为 K 的 CIC 滤波器, 其传输函数可表示为^[3]

$$H_{\text{cic}}(z) = \frac{1}{K^L} \left(\frac{1 - z^{-K}}{1 - z^{-1}} \right)^L \quad (1)$$

对其进行变换, 将传输函数分解为

$$\begin{aligned} H_{\text{cic}}(z) &= \frac{1}{K^L} \left(\frac{1 - z^{-K}}{1 - z^{-1}} \right)^L = \\ &= \frac{1}{K^L} (1 - z^{-K})^L \cdot \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} \right)^L = \\ &= \frac{1}{K^L} M(z) \cdot N(z) \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$M(z) = (1 - z^{-K})^L, N(z) = \left(\frac{1}{1 - z^{-1}} \right)^L \quad (3)$$

由上式可知, $M(z)$ 由 L 个 $(1 - z^{-K})$ 级联而成, 每一级均是一个 1 阶差分器电路, 如图 2(a) 所示。

$N(z)$ 由 L 个 $(1 - z^{-1})^{-1}$ 级联而成, 每一级均是一个 1 阶积分器, 电路图如图 2(b) 所示. 其中, z^{-1} 代表一个一位的寄存器, z^{-K} 代表 K 个一位的寄存器。

针对本文的 4 阶 R_1 倍的 CIC, 令 $L = 4$, $K = R_1$, 得到传输函数:

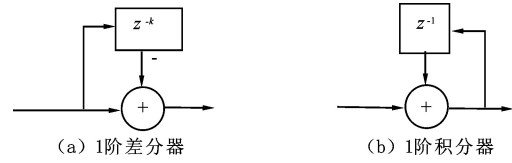


图 2 1 阶差分器与 1 阶积分器

$$H_{\text{cic}}(z) = \frac{1}{R_1^4} \left(\frac{1 - z^{-R_1}}{1 - z^{-1}} \right)^4 \quad (4)$$

利用 Hogenaur 结构实现此传递函数^[4], 系统结构框图如图 3 所示。

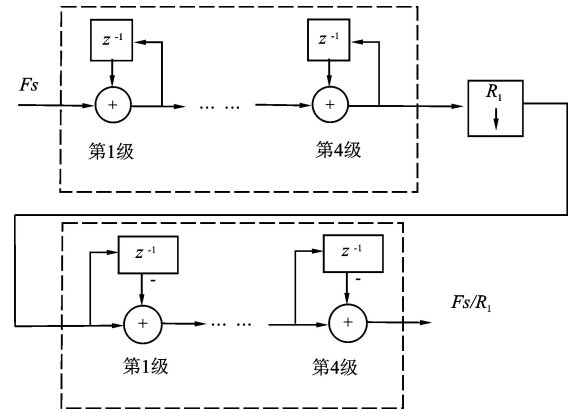


图 3 Hogenaur 结构的 CIC 滤波器

由图 3 可知, 采样器前面为 4 级递归形式的积分器, 采样器后面为 4 级差分器. 由图 3 注意到, 该 CIC 滤波器的递归结构在电路实现时, 会因其累加作用使滤波器处理的字长变长, 且由 Hogenaur 字长增长定理, Hogenaur 结构的 CIC 滤波器的每一级最大字长推导如下^[3]:

$$G_j = \begin{cases} 2^j (j = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{2^{(2n-j)} R_1 (j - n)}{R_1} (j = n + 1, n + 2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (5)$$

$$W_j = (B_{\text{in}} + \log_2 G_j) \quad (6)$$

式中, G_j 为第 j 级积分器或微分器的增益; B_{in} 为输入数据的字长; W_j 为第 j 级积分器或微分器的字长。

由式(5)、式(6)和图 3 可知, 该结构的积分器工作在高频率 F_s 下, 微分器工作在低频率 F_s/R_1 下, 由于积分器的字长增长效应, 工作在高频率处的寄存器的功耗将会远大于微分器的功耗。

基于此, 本文采用非递归形式的 CIC 结构来对此进行优化设计. 将式(1)中的 CIC 的传递函数展开, 并得到非递归形式的 CIC 传递函数^[5]:

$$H_{\text{cic}}(z) = \frac{1}{R_1^4} \left(\frac{1 - z^{-R_1}}{1 - z^{-1}} \right)^4 =$$

$$\frac{1}{R_1^n} (1 + z^{-1} + \dots + z^{-(R_1-2)} + z^{-(R_1-1)})^n =$$

$$\frac{1}{R_1^n} \left(\sum_{i=0}^{R_1-1} z^{-i} \right) = \begin{cases} \prod_{i=0}^{r-1} (1 + z^{-2^i})^n (R_1 = 2^r) \\ \prod_{i=0}^{r-1} (1 + z^{-3^i} + z^{-2 \cdot 3^i})^n (R_1 = 3^r) \end{cases}$$

$$(7)$$

对本设计的传输函数(式(4)),且 $R_1 = 16/48$, $n = 4$,依据上式,可将 CIC 的传输函数改写为

$$H_{cic}(z) = \frac{1}{R_1^4} \left(\frac{1 - z^{-R_1}}{1 - z^{-1}} \right)^4 =$$

$$\frac{1}{R_1^4} (1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(R_1-2)} + z^{-(R_1-1)})^n =$$

$$\frac{1}{R_1^4} \left(\sum_{i=0}^{R_1-1} z^{-i} \right) =$$

$$\begin{cases} (1 + z^{-1})^4 (1 + z^{-2})^4 (1 + z^{-4})^4 (1 + z^{-8})^4 \\ (R_1 = 16) \\ (1 + z^{-1})^4 (1 + z^{-2})^4 (1 + z^{-4})^4 (1 + z^{-8})^4 \cdot \\ (1 + z^{-16} + z^{-32})^4 (R_1 = 48) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)中的非递归结构以电路框图形式实现,并结合 Noble 采样率变换定理^[6],得到系统框图如图 4 所示。

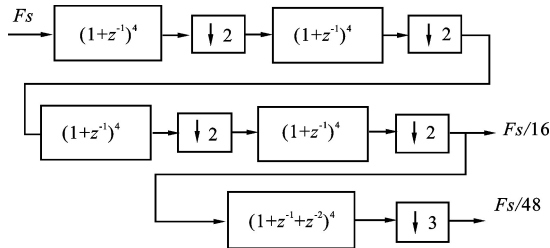


图 4 非递归形式的 CIC 结构

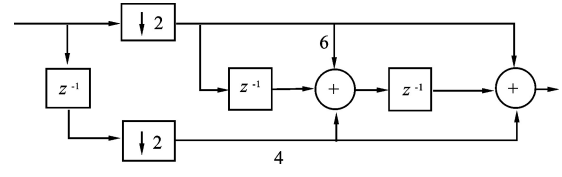
与 Hogenaur 相比,此结构优点在于采用非递归结构,每一级的字长会有所减少,但缺点在于资源消耗过多。为解决资源消耗问题,利用多相分解原理,将上述结构改写为

$$(1 + z^{-1})^4 = (1 + 6z^{-2} + z^{-4}) + z^{-1}(4 + 4z^{-2}) \quad (9)$$

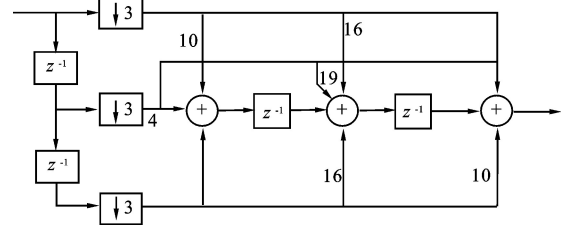
奇数次降频的积分器电路结构 $(1 + z^{-1} + z^{-2})^4$ 可作如下变化:

$$(1 + z^{-1} + z^{-2})^4 = (1 + 16z^{-3} + 10z^{-6}) + z^{-1}(4 + 19z^{-3} + 4z^{-6}) + z^{-2}(10 + 16z^{-3} + z^{-6}) \quad (10)$$

电路如图 5(a)、(b)所示,与上述结构相比,多相变换后的 CIC 更加节省资源。将两者结合起来,得到非递归、多相分解的 CIC 电路结构。



(a) 偶数次降频的多相分解电路图



(b) 奇数次降频的多相分解电路图

图 5 偶数次、奇数次降频的多相分解电路图

针对图 3 的 Hogenaur 结构的 CIC 滤波器和图 6 所示的非递归、多相分解的 CIC 滤波器,分别编写 RTL 代码,使用 Synopsys 公司 DC compile 综合此电路,采取同一工艺库综合得到对应的门级电路网表^[7],对此网表进行分析得到初步电路功耗、面积对比如表 1 所示。

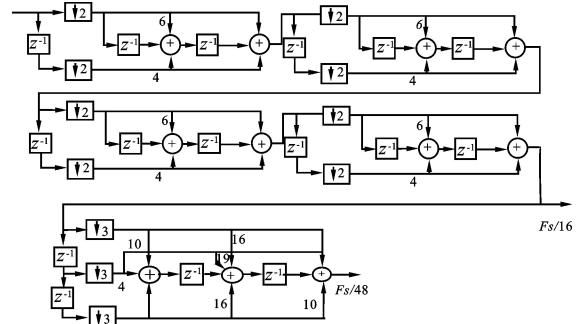


图 6 非递归、多相分解实现的 CIC 滤波器

表 1 Hogenaur 结构与非递归、多相分解结构的 CIC 滤波器功耗面积对比

	Hogenaur 结构 CIC 滤波器	非递归、多相分 解 CIC 滤波器
标准单元面积	11 684	11 052
功耗/ μ W	196.815 5	154.024 8

由上述对比,可看出对于同一传递函数的 CIC 滤波器,采用非递归、多相分解的 CIC 滤波器具有更少的面积和功耗消耗。

4 CFIR 滤波器与 HBF 的设计

由于 CIC 滤波器的通带衰减较大,为保证良好的通带特性,需采用 CFIR 与 HBF 作为 CIC 滤波器后续的滤波抽取动作,它们均属于 FIR 滤波器。本设计采用已经广泛应用的多相分解结构、CSD 系数

实现, CFIR 补偿 CIC 滤波器的衰减并具备 2 倍抽取滤波特性, 且 HBF 频谱具备关于中心频率对称的特性, 使得有一半的系数为 0, 与普通 FIR 滤波器相比, HBF 具备更少的资源消耗^[8], 从而从整体上减少整体滤波器组的消耗。

5 结束语

本文提出一种降低抽取滤波器组功耗、面积的系统级设计及电路实现方法, 在保证系统性能的前提下大大节省了功耗和面积, 经过对比得出本文的方法相对于 Hogenaur 结构的 CIC 减少了 21% 的功耗和 5% 的面积消耗。对应到整个滤波器组而言, 由于 CIC 工作在高频处, 后续滤波器的工作频率相对较低, CIC 的功耗优化对整个滤波器的功耗减少也有相当的意义。

参考文献:

- [1] Koen Cornelissens, Michiel Steyaert, "Design Considerations for Cascade ADC. [J]. IEEE Transactions On Circuits And Systems—II: Express Briefs, 2008, 55 (5):389-393.
- [2] Norsworthy S, Schreier R, Temes G, Delta-sigma data converters: theory, design, and simulation [M]. New York, NY, USA: IEEE Press, 1996.

- [3] Hogenauer E B. An economical class of digital filters for decimation and interpolation [J]. IEEE Tran, 1981, 29(2):155-162.
- [4] 蔡友. Sigma-Delta ADC 中抽取滤波器的研究与实现 [D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
- [5] Jang Y, Yang S. Non-recursive cascaded integrator-comb decimation filters with integer multiple factors [C]// Proc 44th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. [s. l.]: IEEE, 2001: 130-133.
- [6] A V 奥本海姆, R W 谢弗, J R 巴克. 离散时间信号处理 [M]. 刘树棠, 黄建国, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [7] Himan shu Bhatnagar. 高级 ASIC 芯片综合-使用 Synopsys Design Compiler Physical Compiler 和 Primitime [M]. 张文俊, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [8] 马绍宇, 韩雁, 蔡友. ADC 中数字抽取滤波器的多级实现 [J]. 天津大学学报, 2007, 40(12): 1421-1425.

作者简介:

- 王龙生 男, (1988-), 硕士. 研究方向为信号处理与系统建模.
- 谢亮 男, (1982-), 博士研究生. 研究方向为 ASIC 设计、ADC、红外传感方向.
- 金湘亮 男, (1974-), 博士, 教授. 研究方向为 SOC 设计、系统设计.

(上接第 150 页)

表 2 几种算法的积分结果对比

积分方法	分割点数目	积分值	相对误差
复化梯形法 ^[7]	16	0.250 343 3	0.001 373 2
粒子群算法 ^[7]		0.250 178 5	0.000 714 0
布谷鸟算法		0.250 152 4	0.000 152 1
本文算法		0.250 012 7	0.000 011 4
复化梯形法 ^[7]	64	0.250 021 4	0.000 085 7
粒子群算法 ^[7]		0.250 013 8	0.000 055 3
布谷鸟算法		0.250 011 5	0.000 010 8
本文算法		0.250 000 9	0.000 000 1

积分. 通过 4 个典型实例的数值仿真结果表明, 本文算法能用较少的分割点就可得到精度相对较高的积分值, 并且收敛速度快, 算法稳定, 在数值计算和工程实际应用领域有一定的参考和应用价值。

参考文献:

- [1] 周永权, 张明, 赵斌. 基于进化策略方法求任意函数的数值积分 [J]. 计算机学报, 2008, 21(2): 196-206.
- [2] 韦杏琼, 周永权. 基于粒子群算法的数值积分方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 117-119.

- [3] 张明. 基于进化计算的数值方法研究 [D]. 南宁: 广西民族大学, 2007.
- [4] YANG Xin-shen, DEB Suash. Cuckoo search via levy flights [J]. Proceedings of World Congress on nature & Biologically Inspired Computing, India: IEEE Publications, 2009: 210-214.
- [5] Zheng Hongqiang, Zhou Yongquan, Luo Qifang. A hybrid cuckoo search algorithm-GRASP for vehicle routing problem [J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(3): 821-829
- [6] 王雷, 凌翔, 胡剑浩. 异构多核协作系统的混沌离散粒子群 NoC 映射算法 [J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 287-303.
- [7] 韦杏琼, 周永权. 基于粒子群算法的二重积分方法研究 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(20): 4705-4707.

作者简介:

- 凌巍高 (1984-), 硕士. 研究方向为计算智能及其应用.
- 欧旭 (1979-), 硕士. 研究方向为计算智能和模式识别.
- 罗德相 (1980-), 硕士. 研究方向为计算智能和数据挖掘.