

# 宽带CIC抽取滤波器的一种改进方法

姚远程<sup>1</sup>, 蔡晓丽<sup>1</sup>, 李湘鲁<sup>2</sup>, 黄嵩<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学信息工程学院 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所 四川 绵阳 621900)

**【摘要】**经典CIC抽取滤波器处理宽带信号时幅频响应不理想, 满足带外衰减指标时, 通带衰减过大, 难以满足抗混叠性能要求。针对该问题, 提出了一种改善性能的方法, 在已有的分级抽取滤波器的基础上利用锐化技术提高滤波器阻带衰减, 并利用补偿滤波器在采样率降低后对通带进行额外补偿, 减少计算量的同时使带内更平坦。仿真分析表明, 改进后的滤波器的通带衰减度均大于 $-0.002$  dB, 阻带衰减小于 $-57$  dB, 抗混叠性能优良。

**关键词** 算法; 数字滤波器; 多速率处理; 锐化技术

中图分类号 TN911

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.007

## Improved Method for Wideband CIC Decimation Filters

YAO Yuan-cheng<sup>1</sup>, CAI Xiao-li<sup>1</sup>, LI Xiang-lu<sup>2</sup>, and HUANG Song<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621010;

2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900)

**Abstract** The decimation filters of better performance is demanded in multi-rate process when wideband signal with high sample rate is processed by digital IF receiver. The frequency response of classic CIC decimation filters does not meet the requirement when it process wideband signal. The problem is that it has to increase pass-band attenuation to achieve the necessary stop-band attenuation with poor alias rejection. For solving the problem, the paper proposes an improved method which improves alias rejection by taking advantage of sharpening technique on the two-stage comb filter, and applies compensator filters in low sample rate with low computation to improve pass-band characteristics. The simulation result indicates that pass-band attenuation of proposed filter is over than  $-0.002$  dB, stop-band attenuation is less than  $-57$  dB, and anti-aliasing performance is better.

**Key words** algorithms; digital filters; multi-rate process; sharpening technique

多速率处理系统是软件无线电接收机的关键组成部分之一。它根据子信道的信号带宽, 为与子信道带宽所匹配的较低数据率, 改固定采样所获得的数据率, 以达到减少计算量和存储量的目的<sup>[1-2]</sup>。抽取过程容易产生信号混叠, 抽取前需加抗混叠滤波器电路<sup>[3-4]</sup>。CIC抽取滤波器是性能较好的一种抗混叠滤波器, 由微分器、抽取器、积分器构成, 整个滤波过程只进行加法即可完成<sup>[1]</sup>。

经典CIC抽取滤波器存在两个问题: 1) A/D采样率高, CIC抽取的滤波器中梳状滤波器部分工作在最大采样速率; 2) 处理宽带信号时, 抗混叠性能变差, 即阻带衰减与带内容差达不到要求<sup>[5]</sup>。文献[4]提出一种改进的两级锐化梳状滤波器。将靠近A/D的梳状滤波器由多相结构实现, 缓解高采样率的操作压力, 使后面的抽取部分工作在降速后的采样率, 同

时改善频谱特性。但该方法在处理宽带信号时, 仍不能满足频响要求。文献[6]提出一种宽带CIC抽取滤波器, 主要是通过补偿改进频谱响应, 但无法解决靠近A/D采样率高计算量大的问题。

本文针对特定多速率处理系统的要求, 提出一种改进型抽取滤波器。主要是结合文献[4-5]中提出改进方法, 以适当增加计算量来换取频谱响应性能, 对经典抽取滤波器进行改进, 经过性能对比分析, 具有较好的效果。

## 1 CIC抽取滤波器的设计

### 1.1 经典的CIC抽取滤波器

抽取滤波器的抗混叠性强, 反应在频率响应上要求通带内尽量平坦, 即带内容差 $\delta_s$ 足够小及阻带衰减 $\alpha_s$ 足够大<sup>[7]</sup>。根据CIC抽取滤波器幅频特性, 通

收稿日期: 2010-06-11; 修回日期: 2011-11-25

基金项目: 国家自然科学基金NSAF联合基金(10876035)

作者简介: 姚远程(1962-), 男, 教授, 主要从事雷达及通信收发系统等方面的研究。

带截止频率  $w_1$  处的衰减幅度为通带内幅度衰减最大值; 阻带截止频率  $w_2$  处的幅度衰减是阻带内衰减的幅度最小值。衡量滤波器的抗混叠性能优劣主要以这两个点的衰减情况为参考。令信号带宽为  $f_1$ , 固定采样率为  $f_s$ ,  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $\delta_s$ 、 $\alpha_s$  分别为:

$$w_1 = \frac{2\pi f_1}{f_s} \quad (1)$$

$$w_2 = \frac{2\pi}{D} - w_1 \quad (2)$$

$$\delta_s = 20 \lg \left| \frac{H(e^{j0})}{H(e^{jw_1})} \right| \quad (3)$$

$$\alpha_s = 20 \lg \left| \frac{H(e^{j0})}{H(e^{jw_2})} \right| \quad (4)$$

经典的CIC抽取滤波器是由积分器、加法器、微分器组成。该滤波器的频谱性能与参数  $K$  和  $D$  相关, 频谱响应为:

$$H(e^{jw}) = \left( \frac{1}{D} \frac{\sin(wD/2)}{\sin(w/2)} \right)^K \quad (5)$$

当  $D$  一定时可以通过增加级数  $K$  获得需要的阻带衰减  $\alpha_s$ , 但是增加级数同时也会增加通带衰减  $\delta_s$ 。且当  $f_1$  很大时通带内的平坦性会随  $K$  的增加急剧变差。以下将针对这些问题进行改进。

### 1.2 基于分级抽取的滤波器

文献[4]提到一种改进的CIC抽取滤波器。将整数倍抽取分成两部分实现, 即  $D = D_1 \times D_2$ 。将经典CIC抽取滤波器的频率响应  $H(e^{jw})$  改进为:

$$H_m(z) = [H_1(z^{D_1})]^K [H_2(z)]^L \quad (6)$$

$$H_1(z^{D_1}) = \frac{1}{D_2} \left( \frac{1 - z^{-D_1 D_2}}{1 - z^{-D_1}} \right) \quad (7)$$

$$H_2(z) = \frac{1}{D_1} \left( \frac{1 - z^{-D_1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (8)$$

为了增加阻带衰减, 对  $[H_2(z)]^L$  进行锐化变形。利用  $[H_2(z)]^L$  代替  $(3H^2 - 2H^3)$  中的  $H$ , 则改进后的滤波器的Z变换为:

$$H_{sh,m}(z) =$$

$$H_2(z)^L [H_1(z^{D_1})]^{2k} \{3z^{-D_1(D_2-1)K/2} - 2[H_1(z^{D_1})]\}^K \quad (9)$$

式中, 参数  $K$ 、 $L$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  取值详见文献[4]。

通过改进, 将前级抽取降低采样率, 减少第二级中抽取和锐化过程的计算量和能量消耗。同时利用多相结构实现滤波器  $H_2(z)$ , 并利用子结构分享技术将乘以系数的操作转换为移位操作, 进一步减少计算量<sup>[8-9]</sup>。但改进后的滤波器在处理信号带宽大而抽取倍数  $D$  很小的情况时, 滤波器的通带衰减仍

然很大, 不能得到相对理想的频率响应, 该现象将在性能对比分析中给出具体说明。

### 1.3 基于带通补偿的滤波器

文献[5]提到一种利用锐化技术针对通带补偿的方法。该补偿方式是将经典CIC抽取滤波器的频率响应函数乘上一个补偿函数  $G(e^{j\theta D})$  后, 以幅度改变函数ACF(amplitude change function)进行一个多项式组合。幅度改变函数的一般表达式为:

$$H_0 = H^{n+1} \sum_{s=0}^m \frac{(n+s)!}{n! s!} (1-H)^s = H^{n+1} \sum_{s=0}^m C(n,s) (1-H)^s \quad (10)$$

式中,  $C(n,s)$  为二项式分布系数;  $m$ 、 $n$  的选择以及对应的多项式组合见表1。

补偿函数为:

$$G(e^{j\theta D}) = 1 + \varepsilon \times \sin^2 \left( \frac{D\theta}{2} \right) \quad (11)$$

文献[5]提到的改进方法是取  $m=1$ 、 $n=0$  的情况, 改进的滤波器的Z变换为:

$$H_p(z) = 2H_c(z) - H_c^2(z) = \quad (12)$$

$$H_c(z) [2z^{-\tau} - H_c(z)]$$

$$H_c(z) = H(z)G(z^D) \quad (13)$$

表1 幅度变化函数多项式形式

参数 $m$	参数 $n$	多项式 $H_0$
1	0	$2H - H^2$
1	1	$3H^2 - 2H^3$
2	0	$H^3 - 3H^2 + 3H$

该改进方法可以使滤波器的通带变得很平坦, 弥补了经典CIC抽取滤波器处理宽带信号时通带衰减过大的缺点。但是通带衰减得到补偿的同时, 阻带衰减也得到了补偿, 阻带衰减也相应减少。所以为了得到较好的阻带衰减, 需要将式(10)中的  $m$  和  $n$  值取得比较大, 无疑会增加更多的计算量。

### 1.4 本文所提出的改进方法

根据上面提到的两种改进方法, 本文提出另一种改进型的CIC抽取滤波器。利用文献[4]中提到的将整个抽取分两级实现的结构, 即  $D = D_1 \times D_2$ , 则整个滤波器的Z变换为:

$$H_N(z) = [H_{N1}(z^{D_1})]^K [H_{N2}(z)]^L \quad (14)$$

利用多项结构实现前级抽取部分  $(H_{N2})^L$ , 并利用文献[10-11]中的子结构分享技术将系数乘法改成移位实现减少计算量。沿用文献[4]中使用的ACF函

数,取 $m=1, n=1$ ,分两级实现,经过前级的抽取,增加 $m、n$ 的值计算量不会有明显增加。用 $[H_{N1}(z^{D_1})]^K$ 代替 $(3H^2 - 2H^3)$ 中的 $H$ ,并在后面加一级补偿滤波器 $G(z^D)$ 。则将式(14)中的 $[H_{N1}(z^{D_1})]^K$ 改进为:

$$H_{\text{new}}(z^{D_1}) = (3[H_{N1}(z^{D_1})]^{2K} - 2[H_{N1}(z^{D_1})]^{3K})G(z^D) \times [H_{N1}(z^{D_1})]^{2K} (3z^{-\tau} - 2[H_{N1}(z^{D_1})]^K)G(z^D) \quad (15)$$

式中,延时因子 $\tau = D_1(D_2 - 1)K/2$ ,是为保证改进后的滤波器为线性相位而引入的;为了让延时是整数,通常 $K$ 取偶数,即 $K=2k(k$ 是整数); $G(z^D)$ 是由 $G(e^{j\theta D})$ 的 $Z$ 变换后经过一定处理得到,具体处理方法见文献[5]。

$$G(z^D) = B[z^D + A + z^{-D}] \quad (16)$$

$$B = -2^{-(b+2)}, A = -(2^{(b+2)} + 2) \quad (17)$$

式中, $b$ 为整数,取值范围 $[-1,2]$ ,与 $K$ 相关<sup>[12]</sup>,对应关系如表2所示。因此,由式(14)~式(17)得到本文进一步改进的CIC抽取滤波器的 $H_N(z)$ 为:

$$H_N(z) = H_{\text{new}}(z^{D_1})[H_{N2}(z)]^L = [H_{N2}(z)]^L \frac{B}{D_2^{4k}} H_{C11}(z^{D_1}) H_{C12}(z^{D_1 D_2}) z^1 \quad (18)$$

其中,

$$H_{N2}(z) = \frac{1}{D_1} \left( \frac{1 - z^{-D_1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (19)$$

$$H_{C11}(z^{D_1}) = \left( \frac{1}{1 - z^{-D_1}} \right)^{4k} \quad (20)$$

$$H_{C12}(z^{D_1 D_2}) = (1 - z^{-D_1 D_2})^{4k} z^2 \quad (21)$$

$$z^2 = (1 + Az^{-D} + z^{-2D}) \quad (22)$$

$$H_{C21}(z^{D_1}) = \left( \frac{1}{1 - z^{-D_1}} \right)^{2k} \quad (22)$$

$$H_{C22}(z^{D_1 D_2}) = (1 - z^{-D_1 D_2})^{2k} \quad (23)$$

$$\text{式中, } z^1 = \left\{ 3z^{-\tau} - 2 \frac{1}{D_2^{2k}} H_{C21}(z^{D_1}) H_{C22}(z^{D_1 D_2}) \right\} \quad (24)$$

根据式(19)~式(24),该滤波器的结构如图1所示。

表2 参数 $K$ 与 $b$ 的对应关系表

参数 $K$	参数 $b$
1	2
2,3	1
4,5	0
6,7	-1

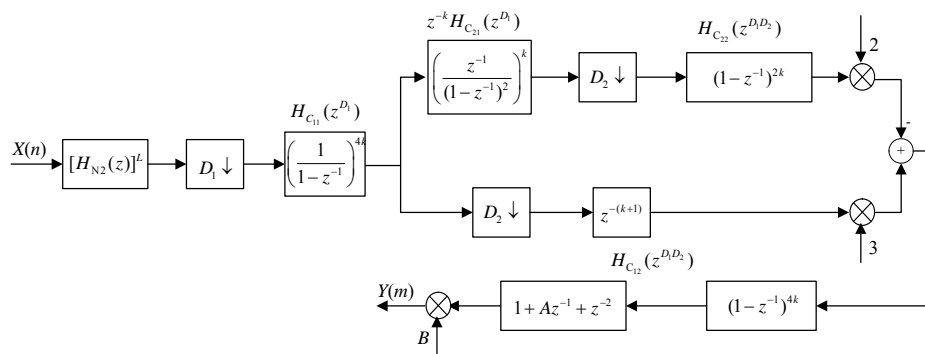


图1 改进的CIC抽取滤波器

## 2 性能对比分析

引言中提到之前的CIC滤波器主要是在处理信号带宽大,抽取倍数小时频谱响应难以满足要求。以这些特性的信号举例,输入采样率 $f_s = 160$  MHz,需要匹配的数据率由 $x$ 表示,且 $x = [2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5]$  Mb/s等。由于滤波器的结构不同,其中的参数计算也不相同。经典的CIC抽取滤波器的级数,通过满足阻带衰减牺牲通带衰减决定级数。滤波器中的 $K$ 和 $L$ 是按照下面的规则决定的。

- 1) 当需要匹配的数据率小于或者等于3 Mb/s时, $K=2, k=1, L=4$ ;
- 2) 当需匹配的数据率大于3 Mb/s时, $K=4, k=2,$

$L=8$ 。

令经典CIC的级数为 $N_{\text{CIC}}$ ,改进型的滤波器参数为 $K、L、b$ 。根据以上规则和进行抽取后需要匹配的数据率,配置参数如下:

$$N_{\text{CIC}} = [4 4 4 7 7 6 7]; K = [2 2 2 4 4 4 4];$$

$$L = [4 4 4 8 8 8 8]; b = [1 1 1 0 0 0 0];$$

$$D_1 = [5 4 2 1 5 4 4]; D_2 = [2 2 3 11 2 2 2]$$

此时,对比滤波器的性能:

- 1) 在 $w_1、w_2$ 处的衰减情况对比

分别以经典CIC抽取滤波器、两级抽取的CIC滤波器、利用ACF函数进行改进CIC抽取滤波器和本文提出的CIC滤波器在处理 $X$ 时 $w_1、w_2$ 处的衰减情况进行对比,如表3所示。

表3 几种CIC滤波器在特殊频率处衰减情况的比较

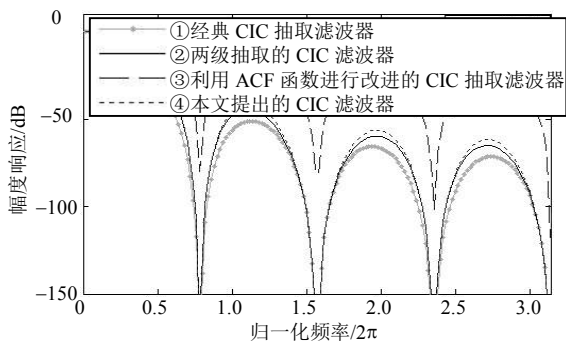
X/Mb·s <sup>-1</sup>	D	w <sub>1</sub> 处的衰减/dB				w <sub>2</sub> 处的衰减/dB			
		经典CIC抽取滤波器	两级抽取的CIC滤波器	利用ACF函数进行改进CIC抽取滤波器	本文CIC滤波器	经典CIC抽取滤波器	两级抽取的CIC滤波器	利用ACF函数进行改进CIC抽取滤波器	本文CIC滤波器
2	10	-0.888	-0.25	-0.003 3	0.362	-68	-58	-27	-58
2.5	8	-0.883	-0.24	-0.003 4	0.360	-67	-58	-27	-57
3	6	-0.706	-0.24	-0.009 0	0.411	-71	-61.8	-64	-61.3
3.5	11	-5.857	-2.39	-7.5×10 <sup>-7</sup>	0.950	-75	-76	-33	-73
4	10	-6.322	-3.45	-0.000 9	0.063	-72	-73	-32	-70
4.5	8	-4.346	-2.56	-0.002 0	0.491	-68.0	-81	-36	-78
5	8	-6.286	-3.41	-0.000 5	0.103	-72.3	-73	-31	-69

从通带衰减方面看,经典CIC抽取滤波器的匹配数据率大于3 Mb/s时 w<sub>1</sub> 处的衰减已经大于2 dB, 而通带衰减通常要求在0.5 dB左右; 故经典CIC抽取滤波器在这种情况下是不可以取用的。对两级抽取的CIC滤波器, 当匹配数据率大于3.5 Mb/s时存在同样的问题, 通带内衰减幅度过大; 相比较后两种滤波器的效果要好得多。

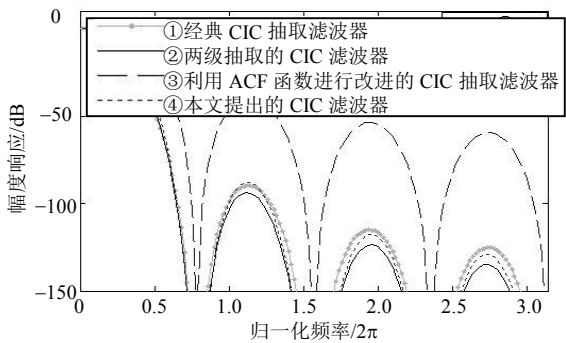
从阻带衰减方面看,除了利用ACF函数进行改进的CIC抽取滤波器外,其他3种滤波器的阻带相应都满足要求,阻带衰减幅度大于50 dB。

2) 频率响应对比分析

参数配置带入各滤波器频率响应式作图,频率w取值范围为[0, π], 图2为4种滤波器的频率响应。



a. 4种滤波器的频率响应对比(D=11, k=z, L=4)



b. 4种滤波器频率响应对比(D=8, k=4, L=8)

图2 4种滤波器的频率响应对比图

由对比情况可知,以经典的CIC抽取滤波器为原型,利用ACF函数进行改进CIC抽取滤波器可以很好的改善通带处的衰减幅度,使通带内很平坦;但是阻带衰减幅度减小,在频率响应对比分析中可以看到其第一旁瓣与主瓣的幅度值相差不大,抗混叠性能不好;而利用两级实现抽取改进的滤波器,阻带衰减满足要求,但通带衰减幅度过大。本文提出的改进的滤波器能很好地满足通带衰减和阻带衰减要求,抗混叠性能好。

3 结束语

本文提出一种的新的CIC抽取滤波器。该滤波器分两级实现抽取,第一级抽取滤波采用多项滤波器的结构,利用子结构分享技术将系数乘法改用移位和加减实现,从而解决了靠近A/D采样率高计算量大的问题;为了提高滤波器的抗混叠性,利用锐化技术将第二级抽取部分的频率响应函数以幅度改变函数(ACF)方式进行组合,同时为避免通带衰减幅度过大,在两级抽取之后加上补偿滤波器提高滤波器的通带性能。通过MATLAB仿真平台,用几种改进型的滤波器分别处理列举的宽带信号,对比几种滤波器的通带衰减度,阻带衰减度,得出本文提出的滤波器通带衰减幅度最小,阻带衰减幅度与分级抽取滤波器相当,抗混叠性能优良。

参 考 文 献

[1] 杨小牛, 楼才义, 徐建良, 等. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.  
 YANG Xiao-niu, LOU Cai-yi, XU Jian-liang, et al. Software radio principle and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.  
 [2] HAND T, FETTWEIS G. Sample rate conversion for software radio[J]. IEEE Communications Magazine, 2000, 10: 142-150.

(下转第226页)

- strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. IEEE Trans on AES, 2009, 45(2): 564-591.
- [7] WILLIE N J, RICHARD T L, ANDREW J W. The use of a frequency domain stepped frequency technique to obtain high range resolution on the CSIR X-band SAR system [C]//Africon Conference in Africa. Africa: [s.n.], 2002.
- [8] 白露, 毛士艺, 袁运能. 时域合成宽带方法: 一种0.1米分辨率SAR技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 472-477.  
BAI xia, MAO Shi-yi, YUAN Yun-neng. Time domain synthetic bandwidth methods: a 0.1 m resolution SAR technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 472-477.
- [9] 丁海林, 李亚超, 高昭昭, 等. 线性调频步进信号的三种合成方法的对比与分析[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(4): 10-16.  
DING Hai-lin, LI Ya-chao, GAO Zhao-zhao, et al. Comparison and analysis to three synthesis methods of linear FM stepped-frequency signal[J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(4): 10-16.
- [10] 黄平平, 邓云凯, 徐伟, 等. 基于频域合成方法的多发多收星载SAR技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 401-406.  
HUANG Ping-ping, DENG Yun-kai, XU Wei, et al. The research of multiple-input and multiple-output SAR based on frequency synthetic[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 401-406.
- [11] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 786-799.
- [12] 黄平平, 邓云凯, 祁海明. 多发多收星载SAR回波处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1056-1060.  
HUANG Ping-ping, DENG Yun-kai, QI Hai-ming. Echo processing method for multiple-transit and multiple-receive space-borne SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1056-1060.

编辑 税红

-----  
(上接第211页)

- [3] SHEIKH F, MASUD S. Sample rate conversion filter design for multi-standard software radio[J]. Digital Signal Process, 2009, 4(14): 1-10.
- [4] GORDANA J D, SANJIT K. A new two-stages sharpened comb decimator[J]. IEEE Trans, Circuit and System-I, 2005, 52(7): 1414-1420.
- [5] GORDANA J D, HARRIS F. Design of wideband CIC compensator filter for a digital IF receiver[J]. Digital Signal Processing, 2009, 3(13): 1-11.
- [6] GORDANA J D. Simple wideband CIC compensator[J]. Electronics Letters, 2009, 45(24): 1-4.
- [7] ABOUSHAD H, DUMONTEIX Y, LOERAT M, et al. Efficient polyphase decomposition of comb decimation filters in  $\Sigma-\Delta$  analog-to-digital converters[J]. IEEE Trans, Circuit and System II, 2001, 48(10): 898-903.
- [8] ASCARI L, PIERAZZI A, MORANDI C, et al. Low power implementation of a sigma-delta decimation filter for cardiac application[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology, 2001, 21(23): 750-755.
- [9] GORDANA J D, MITRA S K. Simple method for compensation of CIC decimation filter[J]. Electronics Letters, 2008, 44(19): 1162-1163.
- [10] ALFONSO F V, GORDANA J D. A general method to design GCF compensation filter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2009, 56(5): 409-413.
- [11] GORDANA J D, MITRA S K. A new two-stage sharpened comb decimator[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2005, 52(7): 1414-1420.
- [12] YEUNG K S, CHAN S C. The design and multiplier-less realization of software radio receivers with reduced system delay[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 2004, 51(12): 2444-2445.

编辑 税红