

## CIC 抽取滤波器

南京信息职业技术学院 刘楠 刘磊

[摘要]级联积分—梳状(Cascaded Integrator—Comb, CIC)滤波器,是一种高效的抽取滤波器,广泛应用于软件无线电接收机数字前端。介绍了抽取理论,以及CIC滤波器的结构和频率特性。通过计算机仿真,得到了CIC滤波器在软件无线电接收机信号处理过程中的时频域信号,验证了其功能。

## 1.引言

在数字信号处理过程中,常常需要降低数字信号处理器的计算量;或者满足不同的数字系统相兼容的要求,这就需要改变信号的采样速率。

采样率变换(Sampling Rate Conversion, SRC)必然会造成频谱的混叠或镜像效应,因此仅靠简单地改变系统的采样时钟是难以实现的,必须对采样的数据另行处理,即通过特殊的滤波器来尽可能地减弱频谱的混叠或镜像效应。在软件无线电通信系统中,发送端的数字上变频器(DUC)通常使用内插滤波器,接收端的数字下变频器(DDC)通常使用抽取滤波器。本章重点研究数字下变频器中的CIC抽取滤波器。

## 2.抽取

一个利用抽取来降低采样率的过程如图1所示。在已采样的数据中每隔M点取用一个数据,由图中的“↓M”完成。设输入采样数据率为 $f_s$ ,则抽取后输出数据率为 $\frac{f_s}{M}$ 。采样率降低后,它相对于原始输入信号的频带就成了欠采样,会产生频谱混叠。为了防止混叠,输入的采样数据必须预先进行抗混叠滤波,由图中的 $h(k)$ 完成。抗混叠滤波的结果是使信号所包含的最高频率分量低于 $\frac{f_s}{2M}$ 。图中,抗混叠滤波器的冲激响应为 $h(k)$ ,输入采样数据 $x(n)$ ,抗混叠滤波后的采样数据为 $w(n)$ ,抽取后输出采样数据 $y(n)$ 。抗混叠滤波器和降采样合称为抽取滤波器,简称抽取器。

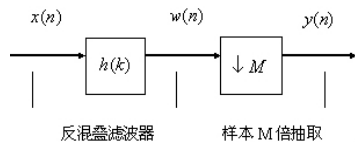


图1 M倍抽取的系统框图

图1中各信号与系统的频域表示符号分别为 $X(e^{j\omega})$ 、 $H(e^{j\omega})$ 、 $W(e^{j\omega})$ 和 $Y(e^{j\omega})$ 。M倍抽取过程中的信号的频域变化如图2所示。图中的 $\omega$ 和 $\omega'$ 分别对应抽取前后两个不同的采样率的数字域频率。

## 3.CIC滤波器

由上所述,抽取滤波器的功能是在完成采样率降低的同时,用滤波器防止频谱混叠的发生。当采样率转换因子很大时,如果应用普通结构的数字滤波器,需要大量的系数存储单元和乘法器,这将会消耗大量的硬件资源,而且运算效率难以提高。如果能找到一种特性的滤波器,它不需要乘法器,只需要很少的存储器,那么就易于硬件实现,并且是一种高效的滤波器。

级联积分—梳状(cascaded integrator-comb, CIC)滤波器就是此种高效滤波器。它是一种线性相位FIR滤波器,由工作在高抽样率的级联理想积分器和低抽样率的级联微分器组成,根据抗混叠和抗镜像的指标确定所需的级联数目。

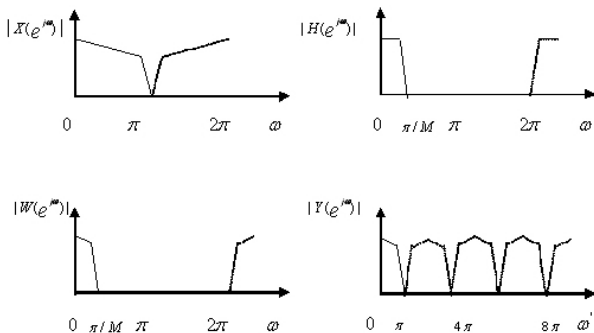


图2 M倍抽取过程中的信号频域变化

## 3.1 CIC滤波器的结构特点。

CIC抽取滤波器的基本结构如图3所示。

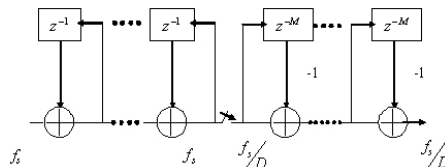


图3 CIC抽取滤波器

在级联积分器和级联微分器之间设置一个采样率转换开关,它从级联积分器输出数据中每隔R个数据选取一个数据,再输入到后续的级联微分器。

CIC滤波器的积分部分工作于高采样率 $f_s$ 。由图3,单个积分器的传输函数可以表示为:

$$H_i(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (2.1)$$

CIC滤波器的微分部分工作于低采样率 $f_s/D$ ,其中D是速率转换因子,以 $f_s$ 作为采样速率时,单个微分器的系统传递函数是 $H_c(z) = 1-z^{-DM}$ ,其中M是微分器的延时数,可以用来调节CIC滤波器的频率响应,其取值一般不大于2。这样,以 $f_s$ 作为抽样时钟,CIC滤波器的系统传输函数的递归形式可表示为:

$$H(z) = H_i^N(z) H_c^N(z) = \frac{(1-z^{-DM})^N}{(1-z^{-1})^N} \quad (2.2)$$

由图3可知,如果设计这样一种结构的CIC滤波器,每一个级联单元需要2个延时器和2个加法器,一共需要2N个延时器和2N个加法器。

(2.2)式可以转化成非递归形式如下:

$$H(z) = \left[ \sum_{k=0}^{DM-1} z^k \right]^N \quad (2.3)$$

从式(2.3)可知,CIC滤波器的非递归形式从功能上可以等效为N个抽头系数为1的FIR滤波器单元级联,如果设计这样一个包括N个级联单元的普通的FIR滤波器组,每一个级联单元需要DM个延时器和一个加法器,一共需要DMN个延时器和N个加法器。

非递归形式的CIC滤波器便于流水线运行。

由此可见,CIC滤波器的优点主要有:(1)无乘法器;(2)无系数存储器;(3)中间暂存单元少;(4)需要的外部控制和定时电路很少。

由于CIC具备这种特性,因此目前在通信系统中得到广泛运用。在目前的基于软件无线电概念的通信系统中,其数字上变频器(DUC)和数字下变频器(DDC)几乎无一例外地使用该种滤波器。

## 3.2 CIC滤波器的频率特性

CIC滤波器的频率特性可由(2.2)式求出。设 $Z = e^{j2\pi f}$ ,其中f是相对于抽样前的高抽样速率计算的。代入(2.2)求出它的幅频特性,如(2.4)。

$$H(f) = \left[ \frac{\sin DM\pi f}{\pi f} \right]^N \quad (2.4)$$

从式(2.4)可以发现,单级CIC滤波器的直流增益为DM,因此寄存器的字长随速率转换因子D的增大而增大;另外,在 $f=1/(RM)$ 的整数倍处出现零点,则M可以控制零点的位置。零点附近的区域将会折叠到通带内,若抽取则引起频谱混叠,若内插则生成频谱镜像。这些混叠和镜像带可以表示如下:

$$\left(-\frac{1}{DM} + f\right) \leq f \leq \left(\frac{1}{DM} + f\right), \quad i=1,2,\dots,[R/2] \quad (2.5)$$

在实际的设计中,最大的混叠或镜像干扰发生在第一个混叠带或镜像带的低频端,即 $f_{\text{min}} = \frac{1}{DM} - f$ ,设 $f \leq \frac{1}{2DM}$ ,这个条件在大部分的情况下是可以满足的。

由于混叠发生在 $f/(DM)$ 的频率附近,因此,为了获得较大的阻带衰减,降低混叠影响,在信号带宽一定的条件下,CIC应尽可能的采用小的抽取因子或增大采样率。增大采样率意味着CIC滤波器一般要用在降速率系统的第一级或增速率系统的末级。

一个应用 Matlab 工具设计的 16 倍抽取 梳状滤波器延时为 1 的 4 级 CIC 滤波器组的频率特性曲线如图 2.4 所示。从该图 我们可以将CIC 滤波器的频率特性可以归结为两点,第一,低通特性,第二,梳状特性。从图 4,我们发现,CIC 滤波器存在如下的缺陷(1)通带下垂(droop),级数越多越严重;(2)单级阻带衰减不充分。

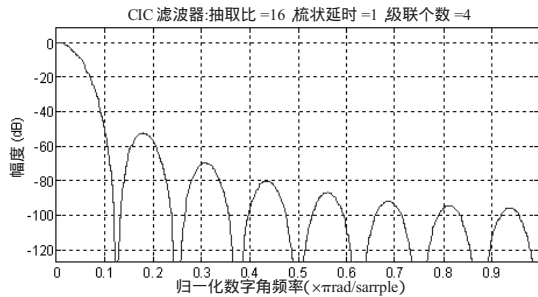


图 4 CIC 滤波器的幅频特性曲线

#### 4. 功能仿真

以上描述了 CIC 滤波器的特性,下面,我们对 CIC 滤波器的功能进行仿真验证。

##### 4.1 确立测试模型

为了验证 CIC 滤波器的功能,我们将它放到数字下变频器中作为系统的一部分,建立如图 5 所示的验证 CIC 滤波器功能的 MATLAB 仿真模型,其中 CIC 算法模型如图 6 所示。

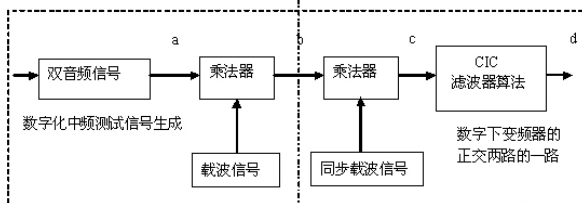


图 5 验证 CIC 功能的仿真模型



图 6 CIC 算法实现的仿真模型

##### 4.2 信号参数设置如下

- (1)基带信号:由两个正弦信号,频率分别为 4 和 8,幅度均为 1,合成一个双音信号;
- (2)数字化中频测试信号:用(1)形成的基带信号,与频率为 160 幅度为 1,初相为 0 的正弦载波信号相乘,形成双边带调制信号,作为中频测试信号;
- (3)输入信号采样速率:960;
- (4)CIC 滤波器:抽取因子为 8,微分器延时为 1,级联数为 4。用 MATLAB 显示的该 CIC 的幅频特性如图 7 所示。

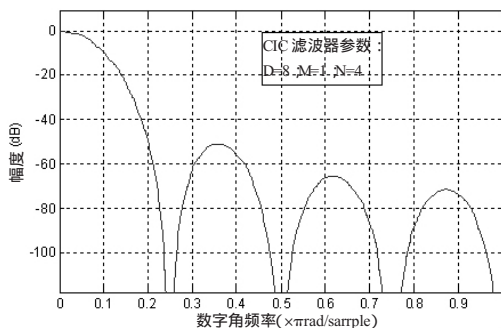


图 7 测试用的 CIC 滤波器幅频特性

##### (5)输出取样速率:960/8=120;

由于我们做的是纯理论仿真,不涉及物理层参数,故各参数未使用单位。

##### 4.3 验证 CIC 功能的仿真结果

图 5 所示的验证 CIC 功能的 MATLAB 仿真模型中各节点信号波形如图 8 所示,其对应的频谱如图 9 所示。

图 8(a)显示的是发送端基带信号波形,形状是光滑的双音信号波

形。图 8(b)显示的是发送端基带被调制成双边带(DSB)信号后的波形,作为数字化中频测试信号,图 8(c)显示的是接收端数字下变频器中,对图 8(b)所示的信号,与载波同步的数控振荡器(NCO)输出的离散正弦信号样本值相乘之后的波形,图 8(d)显示的是接收端对(c)所示信号经 CIC 滤波并抽取之后的波形;

图 9(a)(b)(c)(d)显示的是图 8(a)(b)(c)(d) 显示的波形相应的频谱。图 9(a)显示的是发送端基带信号频谱,处于低频段。图 9(b)显示的是发送端基带被调制成双边带(DSB)信号后的频谱,处于高频段,基带信号对称分布于载频两侧,图 9(c)显示的是接收端(b)所示信号,与载波同步的数控振荡器(NCO)输出的离散正弦信号样本值相乘之后的的频谱,结果是,将(b)所示的频谱向高低两个方向搬移,低端移到基带原始位置,高端移到两倍频处;图(d)显示的是接收端对(c)所示信号经 CIC 滤波并抽取之后的频谱,结果是,第一 2 倍频那个频谱被滤除,基带信号被完整恢复;二,频谱进行了 8 倍率的压缩,这是由 8 倍抽取所致,符合多速率信号处理理论。

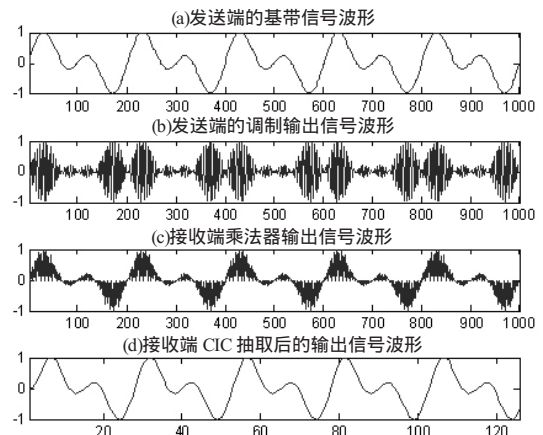


图 8 验证 CIC 功能的信号流程波形仿真结果

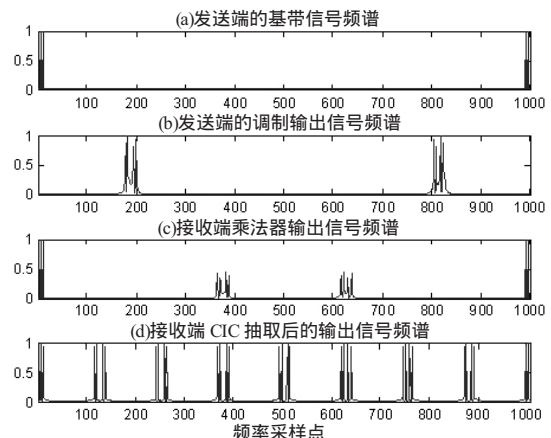


图 9 验证 CIC 功能的信号流程频谱仿真结果

#### 5. 结语

软件无线电接收机中通过抽取(decimate)降低数据的采样率,内插(interpolate)来提高数据的采样率。发送设备的数字上变频器(DUC)通常使用内插滤波器,接收设备的数字下变频器(DDC)通常使用抽取滤波器。CIC 滤波器是一种重要的用于采样率变换的高效率滤波器,结构整齐,运算简捷,硬件资源利用率很高,常用于高采样率数据端口和高变换比率的场合,即靠近模拟部分的一端。本文通过计算机仿真,得到了 CIC 滤波器在软件无线电接收机信号处理过程中的时频域信号,验证了其功能和性能。

#### 参考文献

- [1]Mitola J. The software radio architecture. IEEE Communication Magazine[J]. 1995, 33(5): 26-381.
- [2]杨小牛,楼才义,徐建梁. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2001, 1-20.
- [3]Mathew PD. CIC Filter Introduction [EB/L]. <http://www.users.snip.net/~donadio/2000-07-03>.
- [4]Ronald E. Crochiere and Lawrence R. Rabiner. Multirate Digital Processing. Prentice-Hall Signal Processing Series. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1983.