

# 直接中频正交采样的 Bessel 内插实现

朱荣新, 方姚生, 杨志敏  
(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**提出了一种新的中频正交采样和处理方法,即直接在中频对信号进行采样,然后利用数字信号处理的办法产生正交复基带信号。通过选取工程较易实现的中点 Bessel 内插函数,得到正交的两路基带 I、Q 信号,从理论与大量测试中表明相位误差比传统相干检波器小一个数量级,且无幅度误差,大大提高了检波器的性能。

**关键词:**中频采样;相干检波;数字滤波器

**中图分类号:**TN957.51 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2002)05-0069-03

现代电子信息系统中普遍采用相参信号处理,而如何获得高精度基带数字正交 I、Q 信号是整个系统信号处理成败的关键,传统的方法是采用双通道处理技术,通过两路正交的相位检波器得到 I、Q 视频信号,经视放和低通滤波器后,由两路 A/D 变换器转换成 I、Q 数字信号。在模拟相位检波器之后,I、Q 两支路的低通滤波器和视放(宽带运放)很难做到增益匹配和无零点漂移,两路输出信号的相位误差一般只能做到  $2^\circ \sim 3^\circ$ ,幅度误差约为 0.5 dB,这就限制了信号处理器性能的进一步提高。

近几年来,随着高速、高位 A/D 的研制成功和普遍应用,使得直接对中频信号采样成为可能。只用一路 A/D 变换器,直接对中频信号进行采样和量化,利用数字信号处理的办法进行相干检波。这样得到的 I、Q 信号,一致性好、精度高,而且具有数字电路的其它优点,从而在很大程度上提高了系统的性能。

## 1 直接中频正交采样原理

为实现直接中频采样,考虑到 A/D 的速度,被采样的中频通常设计为小于 10 MHz,它具有如下形式:

$$\begin{aligned} S(t) &= A(t) \cos[2\pi f_0 t + \varphi(t)] = \\ &= A(t) \cos\varphi(t) \cos 2\pi f_0 t - A(t) \sin\varphi(t) \sin 2\pi f_0 t = \\ &= I(t) \cos 2\pi f_0 t - Q(t) \sin 2\pi f_0 t \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $A(t)$ 、 $\varphi(t)$ 、 $I(t)$ 、 $Q(t)$  各代表振幅、相位、同相分量和正交分量,  $f_0$  为信号中心频率。

令  $f_s$  为采样频率,满足 Nyquist 准则,且有约束关系:

$$f_0 = \left( \frac{M}{2} - \frac{1}{4} \right) f_s \quad (M \text{ 为正整数}) \quad (2)$$

由于采样间隔  $\Delta t = \left( \frac{M}{2} - \frac{1}{4} \right) \frac{1}{f_s}$ ,令式(1)中的  $t = n\Delta t$ ,则式(1)变为

$$S(n\Delta t) = \begin{cases} (-1)^{\frac{n}{2}} I(n\Delta t) & (n \text{ 为偶数}) \\ (-1)^{\frac{n-1}{2}} Q(n\Delta t) \cdot (-1)^M & (n \text{ 为奇数}) \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可见,中频信号经上述采样后,可交替得到  $I(n\Delta t)$ 、 $Q(n\Delta t)$  的值,但两者时间上相差一个采样周期  $\Delta t$ ,符号也需要修正。要得到完整的 I、Q 双路信号,则需经过后续的数字信号处理来实现,这种数字化方法,既完成了正交化处理,又实现了信号的检波。

## 2 内插滤波器的选择

目前已经出现了多种中频采样的具体实现方法。Rice 首先使用 Hilbert 变换实现了信号单边化<sup>[1]</sup>,但是他使用的采样频率为  $2b$  ( $b$  为信号带宽); Water 使用  $4b$  采样率<sup>[2]</sup>,以奇数采样点作为 I 路信号,通过对偶数采样点进行内插得到 Q 路信号; Rader 使用  $4b$  采样率<sup>[3]</sup>,用 IIR 滤波器产生 I、Q 信号; Pellon 把多相滤波器引入中频采样<sup>[4]</sup>,杜永强等使用最小二乘法设计了最优滤波器<sup>[5-6]</sup>;曾涛等提出可变的信号归一化带宽<sup>[7]</sup>,滤波器的系数可根据实际信号带宽计算等。以上方法虽各有其特点,但大多实现较为复杂,而且 I、Q 精度要求越高,滤波器的阶数就越高。

本文决定采用内插法,对于带通信号  $S(t)$ ,在满足 Nyquist 准则的情况下,经采样后的一系列样本中包含着有关信号的全部信息。换句话说,用内插法可以精确地复现原信号  $S(t)$ :

$$S(t) = \sum_n S(n\Delta t) T(t - n\Delta t) \quad (4)$$

式中  $T(t)$  为内插函数,需要内插的 I、Q 值是通过对中频信号  $S(t)$  的内插来实现的,由于 A/D 转换得到的样本经过简单的符号变换就可以交叉得到所需的 I、Q 值,因而可采用已取得的 I (或 Q) 样本内插另一半的 I (或 Q) 值。在数学上,这样的内插公式是很多的,通过对比,采用工程上较易实现的中点 Bessel 内插公式:

$$P\left(\frac{x_0 + x_1}{2}\right) = \frac{1}{2}(y_0 + y_1) + \frac{1}{16}(-y_{-1} + y_0 + y_1 - y_2) + \frac{3}{256}(y_{-2} - 3y_{-1} + 2y_0 + 2y_1 - 3y_2 + y_3) \\ + \frac{1}{2048}(-y_{-3} + 5y_{-2} - 9y_{-1} + 5y_0 + 5y_1 - 9y_2 + 5y_3 - y_4) + \dots \quad (5)$$

式中  $y_i$  为内插节点值,  $P$  为内插值。

为了选取合适的内插滤波器阶数,需要对式(5)余项(内插误差)进行分析,把 Bessel 内插误差公式应用于工程,则有如下表达式:

$$E_{\max} = \frac{h^n}{4n!} \left(\frac{1}{4} - l^2\right) \dots \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{n}{2} - 1\right)^2\right) \cdot (2 - N) \quad (6)$$

式中  $h = 4\pi f_b / f_s$  为归一化的采样间隔,  $f_b$  为信号的频偏,  $n$  为内插滤波器的阶数。

以  $f_0 = 5$  MHz,  $f_s = 4$  MHz 为例,当  $f_b = 300$  KHz 时,对于 4 阶 ( $n = 4$ ) Bessel 内插公式,可求得内插误差  $E_{\max} = 0.01849$ ,由此引起的 I、Q 相位误差为  $1^\circ$ ; 对于 6 阶 Bessel 内插公式,可求得内插误差  $E_{\max} = 0.00342$ ,由此引起的 I、Q 相位误差为小于  $0.2^\circ$ 。本文选取滤波器阶数为 6 阶,6 阶中点 Bessel 内插公式为:

$$P\left(\frac{x_0 + x_1}{2}\right) = (3y_{-2} - 25y_{-1} + 150y_0 + 150y_1 - 25y_2 + 3y_3) / 256 \quad (7)$$

## 3 中频采样系统的实现

图 1 为基于 Bessel 内插中频正交采样的实现框图,它的关键部分是模拟信号的数字化和数字滤波器两部分,另外还有一些附加电路,如时序产生电路和为了便于观察而设计的 D/A 转换电路。

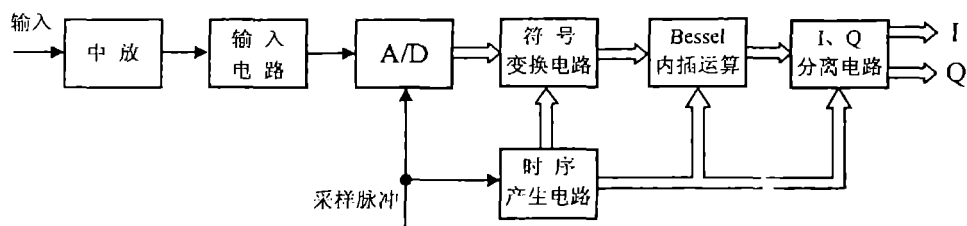


图 1 基于 Bessel 内插的实现

中频信号由输入电路加到 A/D 转换器量化为数字信号,此信号经过符号变换后便得到 I、Q 两路信号的内插运算样本值, I、Q 信号在内插运算电路中进行内插,最后进入 I、Q 分离电路,同时输出 I、Q 两路正交数字信号。整个电路的时序都是靠采样脉冲来同步。

为了实现直接中频采样,考虑 A/D 的速度,被采样的中频通常设计为小于 10 MHz 的低中频。本电路选

用的 A/D 器件为 CA3318,其采样速率可达 15 MHz,具有锁存式三态输出。A/D 电路部分的设计要求很高,它将直接影响到信号量化误差的大小。

符号变换电路可以采用异或门 74LS86 和加法器 74LS283 来完成,输出信号采用补码方式。

将前面确定的滤波器应用于本文涉及的实际情况,则内插运算公式为

$$I(2n+1) = [3I(2n-4) - 25I(2n-2) + 150I(2n) + 150I(2n+2) - 25I(2n+4) + 3I(2n+6)]/256 \quad (8)$$

$$Q(2n) = [3Q(2n-5) - 25Q(2n-3) + 150Q(2n-1) + 150Q(2n+1) - 25Q(2n+3) + 3Q(2n+5)]/256 \quad (9)$$

由于 I 支路是通过偶数点上的数据内插奇数点上的数据,而 Q 支路由奇数点上的数据内插偶数点上的数据,因而 I、Q 内插运算可由一套内插电路来完成。

根据上面内插公式的系数形式,可采用移位相加技术完成内插运算。实际使用移位寄存器 74LS164,加法器 74LS283。最后用 74LS157 进行 I、Q 分离,并同时输出 I、Q 两路正交数字信号。

以上电路也十分适合于通用可编程器件实现。

## 4 结论

输入一中频信号  $f_0 = 5$  MHz,采样频率  $f_s = 4$  MHz,带宽为 300 KHz 时,得到的 I、Q 数字信号输入计算机,经分析,测得正交相位误差为  $0.2^\circ$ ,无幅度误差,与传统的模拟式 I、Q 通道相比,其精度提高了一个数量级以上,且无零漂的影响。中频正交采样及处理方法具有许多优点,完全可以代替传统的正交双通道处理方法,它的出现必将大大提高现代电子系统的性能。

### 参考文献:

- [1] Rice D W, Wu K U. Quadrature sampling with high dynamic range[J]. IEEE Trans on AES, 1982, 18(4): 736 - 739.
- [2] Waters W M, Jarrett B R. Bandpass signal sampling and coherent detection[J]. IEEE Trans on AES, 1982, 18(4): 95 - 100.
- [3] Rader C M. A simple method for sampling in - phase and quadrature components[J]. IEEE Trans on AES, 1984, 20(6): 821 - 824.
- [4] Pellon L E. A double nyquist digital product detector for quadrature sampling[J]. IEEE Trans on ASSP, 1992, 40(7): 1670 - 1680.
- [5] Ho K C, Chan Y T. A digital quadrature demodulation system[J]. IEEE Trans on AES, 1996, 32(4): 1218 - 1226.
- [6] 杜永强. 直接中频采样数字正交输出的最小二乘实现[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 8 - 11.
- [7] 曾涛,龙腾,毛二可. 一种新的中频采样滤波器的设计与实现[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 51 - 54.
- [8] 王吉滨,孟宪德,冀振元. 直接中频采样实现正交相干检波的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(1): 116 - 119.

(编辑:门向生)

## The Bessel Interpolation Implementation of Direct IF Signal Quadrature Sampling

ZHU Rong - xin, FANG Yao - sheng, YANG Zhi - min

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper provides a new IF quadrature sampling and processing approach by sampling IF signal directly and produces quadrature complex signal by digital signal processing. Digitized in - phase(I) and quadrature(Q) components are obtained through choosing middle point Bessel interpolation function implemented easily in engineering project. Its phase errors derived from theory and a lot of tests are an order of magnitude less than conventional detectors, and no amplitude errors. This approach provides improved accuracy. A basic hardware scheme and a typical experimental result are also given.

**Key words:** IF sampling; coherent detection; digital filter