

数字存储示波器中的插值算法研究*

张 慧

(东南大学 无线电工程系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 主要介绍了插值算法在数字存储示波器中的应用, 通过编程和仿真比较了正弦插值和线性插值对几种不同波形的恢复结果, 并计算和分析了相关的均方误差。

关键词: 数字存储示波器; 正弦插值; 线性插值; 均方误差

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A 文章编号: 1671-5322(2006)01-0044-04

数字示波器是利用高速的 A/D 芯片先将原来的模拟信号转换成数字形式(一串二进制数), 并存在内部的 RAM 中, 再进行显示和其它的相关处理。而在如今的高速数字系统中, 由于失配或未接终端传输线引起的反射、窜扰或地电位跳动、总线竞争产生的毛刺、震荡往往是非周期性的, 从而对于数字化示波器而言, 除了要求有高的实时采样速率外, 还要求有较高的波形分析细节。因此, 是否能很好的恢复和重建原信号对于数字存储示波器就显得很重要。在数字信号处理技术中, 就其逼近原始信号的精度是视具体情况而定的, 其中最为常用的方法分为两种: 一种是内插, 另一种是拟合^[1]。内插是通过已知数据点构造一个解析表达式, 由此计算数据点之间的函数值, 构造的曲线必通过原数据。拟合是选择一个最好的光滑曲线去逼近已知离散数据, 该曲线不一定通过原数据点。因为曲线拟合的波形不通过原数据点, 因此在示波器显示中会造成触发点不稳定的问题, 而导致显示不稳定。所以在这里采用内插的方法来恢复和重建原波形。

1 插值描述

内插算法有很多种, 例如: 线性插值、立方插值、正弦插值等。本文着重讨论线性插值和正弦插值。

1.1 线性插值

线性插值是在两个采样点之间插入一点, 用直线将采样点和插值点连接起来。插入点的数据 $y(t)$ 可用下式进行计算:

$$y(t) = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \times y(t_1) + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \times y(t_2)$$

其中 t_1, t_2 为相邻两采样点的时刻^[2-3]。

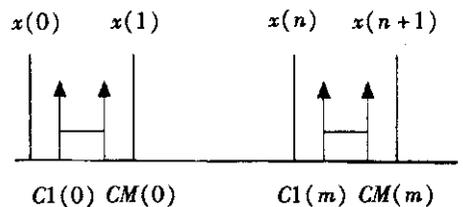


图1 内插示意图

Fig. 1 Sketch diagram of interpolation

1.2 正弦插值

$\sin x / x$ 插值又称正弦插值, 这种插值方法是对数据进行函数运算后用曲线将各个样点连接起来。设 $x(t)$ 是数字存储示波器的输入模拟信号, 对该信号进行采样, 采样周期为 T , 则得到等间隔采样的样点 $x(n) = x(nT)$, n 为 $1, 2, \dots, N$, 其中 N 是示波器记录长度, $x(n)$ 为以 T 为间隔采样得到的已知序列, 在两个采样点之间插入 M 个点, 构成长度为 M 的序列, 可推导得:

$$C_m(nT) = \sum x(nT) \text{sin}[(n-k) + m/(M+1)]$$

* 收稿日期 2005-10-22

作者简介: 张 慧(1977-), 女, 江苏盐城人, 东南大学信号与信息处理专业研究生。

$$T * P_i \mathcal{U}((n - k) + m / (M + 1) T * P_i]$$

上式就是正弦插值公式^[4],利用它来插值的方法为正弦插值法。因为这些滤波器的冲击响应在理论上是无限的,而在实际应用中只能用有限的滤波器。因此,就存在内插误差,这些误差在 $m = 0 \sim 2L$ 点上为 0,式中 T 为采样周期,可将其视为 1, k 为采样点数,可取 k 为 0 到 $N - 1$ 之间。

2 误差分析

采用插值算法恢复的波形和原始波形必然有

表 1 各种波形用线性插值所计算出的 RMS 误差值

Table 1 RMS errors of different waves computed by Linear interpolation

插值方法	每周期原始 采样点数 (q)	插值倍数 M	方波 均方根误差	正弦波 均方根误差	三角波 均方根误差
线 性 插 值	5	2	0.020 000	147.074	0.016 000
	10	2	0.002 000	9.659 11	0.000 001
	20	2	0.001 000	0.611 195	0.000 000
	30	2	0.000 074	0.250 718	0.000 000
	50	2	0.000 016	0.121 007	0.000 000

和三角波更适合用线性插值来恢复,但是当每周期原始采样点数达到 20 以上时,正弦波的误差也不大,此时这三种波形均可以用线性插值算法。因为线性插值计算更方便,程序更简单,所以当每周期原始采样点数达到一定值时,一般均可以选用线性插值算法。

2.2 正弦插值

表 2 是 C++ 语言编程,同时对方波、正弦波和三角波做了正弦插值实验而得出的计算结果,从表 2 可以看出每周期原始采样点数的增加,均方误差会随之减小,当其达到 20 左右时,误差就已经很小了,所以一般有 20 左右点数就够了。同时还可以看出正弦插值用来恢复正弦波和三角波效果好一些,而方波的误差稍大。

图 1 所示的是根据表 2 中方波正弦插值所计算的数值用 MATLAB 进行仿真得出的波形对比

表 2 各种波形用正弦插值所计算出的 RMS 误差值

Table 2 RMS errors of different waves computed by Sinc interpolation

插值方法	每周期原始 采样点数	计算所用 采样点数	插值倍数	方波 均方根误差	正弦波 均方根误差	三角波 均方根误差
正 弦 插 值	5	40	4	244.176 3	3.339 80E - 5	1.465.17E - 5
	10	40	4	17.092 90	0.672 48E - 5	107.937E - 5
	20	40	4	4.646 898	0.163 53E - 5	19.730 0E - 5
	30	40	4	1.795 894	4.427 66E - 5	14.740 5E - 5
	50	40	4	0.779 764	2.710 15E - 5	3.201 12E - 5

误差,下面分别采用方波、正弦波和三角波信号作为待插信号,采用线性插值法和正弦插值法进行插值运算,利用已知的公式进行编程和仿真,并将计算出的插值和原始波形进行比较,计算出 RMS (root mean square,平方根的缩写)误差值,并作出相关分析。

2.1 线性插值

表 1 是用 C++ 语言编程所计算的结果,从表 1 中可以看出用线性插值来恢复方波和三角波,误差较小,而正弦波的误差则较大,因此方波

图,其中图(a)是原始波形,图(b)、(c)和(d)是原始采样点数分别为 5、10 和 20 的插值恢复的波形。

表 2 中的方波是一个周期为 2,带有上升沿和下降沿的函数,并且它关于 y 轴对称,上升斜率和下降斜率分别为 4 和 -4。而由于方波本身存在上升沿和下降沿,方波中存在上升时间,为了精确测量上升时间,至少在上升沿有两个取样点,所以在一个周期内至少要采样 8 个点,只有在这种情况下,误差才会有明显的降低,从表 2 和图 1 中确实可以看到当每周期原始采样点达到 10 以上时误差下降比较明显,插值恢复效果才比较好,原始采样点数越多恢复效果越好。但是同时,在实验中可以看到计算所用的点数、边沿采样点数及边沿采样点的位置也会对计算结果有所影响。

表 3 是用 C++ 语言针对方波的正弦插值进

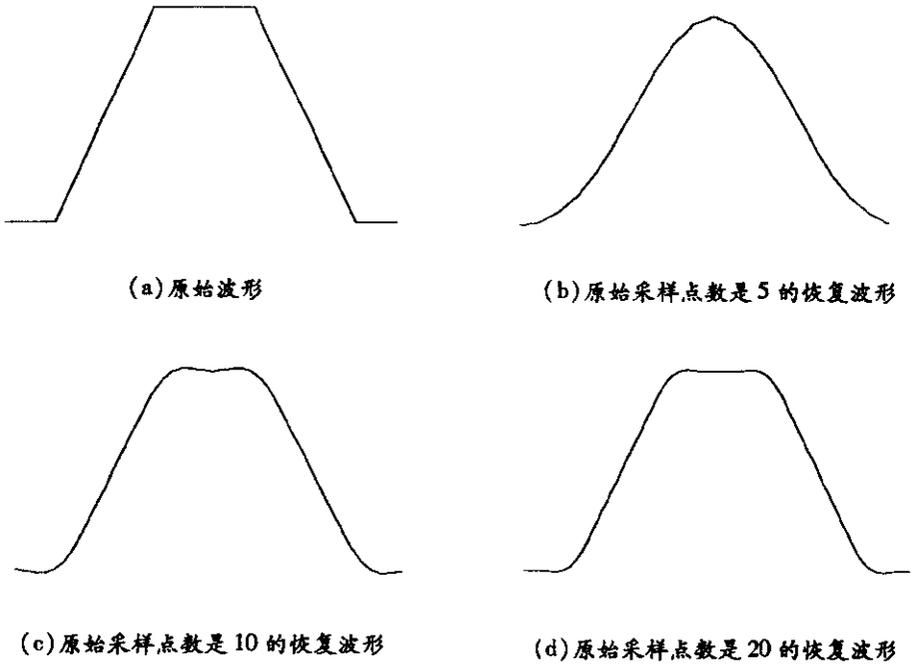


图 2 方波波形恢复效果图

Fig. 2 Different recovered waves of square wave

表 3 方波用正弦插值所计算的 RMS 误差值

Table 3 RMS errors of square wave computed by Sinc interpolation

每周期原始 采样点数	计算所用 采样点数	初始采样 点横坐标	插值倍数	边沿采样 点数	方波的 均方根误差
9	5	0	8	2	260.916 650
9	8	0	8	2	59.120 849
9	20	0	8	2	57.489 930
9	30	0	8	2	50.064 547
9	40	0	8	2	47.941 817
9	60	0	8	2	52.183 244
9	60	4/36	8	2	52.183 207
9	60	6/36	8	2	47.774 328
9	60	8/36	8	2	52.183 244
9	60	2/36	8	3	47.774 253
9	60	10/36	8	3	47.774 320

行编程而得出的计算结果,从表 3 中可以直观的得出以下结论:

(1) 在每周期的原始采样点数和插值倍数相同时,计算所用采样点数越多误差呈减小的趋势,这说明计算所用点数越多,恢复出的波形越接近原始波形,但当所用点数达到一定的限度时,误差变化减缓,波形基本稳定,这说明远处的波形对所恢复的波形影响不大,所以计算所用点数并不要求太多,太多有时反而有可能使得误差加大,因此计算所用点数一般在 40 左右即可;

(2) 在其原始采样点数、计算所用点数等条

件相同时,方波的边沿采样点数的增加也可以显著的改善插值恢复效果,在边沿采样点数也相同的基础上,采样点分布的位置不同,插值的均方误差也不同,从做的大量实验数据可以得出,边沿采样点分布的越均匀误差越小。

3 结束语

对于数字示波器来说,不仅需要超高速实时采样速率,还需要有较高的波形分析细节,为此需要在原始采样点之间进行插值,进行原始波形的恢复和重建。本文系统地研究了正弦插值和线性

插值在数字示波器中的应用,通过编程和仿真可以看出,针对不同波形选取适合的插值算法和适合的插值参数可以有效的改善波形恢复的误差过大问题,达到所希望的精度。

参考文献:

- [1] 刘益成,罗维炳. 信号处理与过抽样转换器[M]. 北京:电子工业出版社,1997.
- [2] 周培德. 算法设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [3] A. V. 奥本海姆,R W. 谢弗. 数字信号处理[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [4] 林茂六. 高速采样信号数字内插理论与正弦内插算法研究[J]. 电子学报,2000,28(12) 8 - 10.

Study on the Interpolation Algorithm for Digital Oscilloscope

ZHANG Hui

(Department of Electricity Engineering , Southeast University , Jiangsu Nanjing 210096 , China)

Abstract : This paper introduces the application of interpolation algorithm to digital oscilloscope. According to programming and simulation , the instauration results of sinc interpolation and linear interpolation for forming of some kinds of waves are compared and the RMS errors are computed and analyzed.

Keywords : digital oscilloscope ; sinc interpolation ; linearity interpolation ; RMS errors

(上接第 18 页)

参考文献:

- [1] 陈媛,杨武. 系统级故障诊断方法概述[J]. 计算机应用研究,1999,16(2):19 ~ 21.
- [2] 杨士元. 数字系统的故障诊断和可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [3] 杨龙祥,黄唯一. 数字电路板(DPCB)在线测试仪研制[J]. 微电子测试,1995,9(3):25 ~ 31.

Study on Hybrid Circuit Fault Simulation

HUA Feng

(CAD Center , Yancheng Institute of Technology , Jiangsu Yancheng 224003 , China)

Abstract : In this article , we introduce a technology about hybrid circuit fault simulation. We emphasize how to create the primary response and how to guarantee its validity. Meanwhile , we introduce how to handle analog signals in fault diagnose software. In this article , we use a test model to describe this method in detail.

Keywords : fault diagnosis ; fault simulation ; primary response