

文章编号:1000-582X(2007)05-0075-04

基于 FPGA 的快速 LADT 压缩算法的改进及其实现

刘俊刚,杨永明,韦建敏

(重庆大学 电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:提出了一种应用于心电图像的改进折线逐次逼近(LADT)压缩算法。该算法既减少了数学运算量又适用于硬件实现。通过仿真实验验证,采用该算法,既保持了压缩比较高和失真小的优点,又得到了良好的实时压缩效果。设计了基于FPGA的心电信号压缩处理硬件电路,实现了改进的压缩算法,并进行了心电信号数据压缩实验,实验结果验证了该方法的有效性。

关键词:LADT算法;改进;数据压缩;FPGA

中图分类号:R311; R319; R540.4

文献标志码:A

LADT (Linear Approximation Distance Thresholding)方法是一种用折线来拟合曲线的数据压缩方法。它只要求曲线上的每一点到折线之距离不超过容限 ϵ ,这样就可以在曲线较陡的时候保持较高的压缩比,而且恢复出来的曲线与原曲线在形状上也不会有大的差异,因此,到目前为止,LADT方法的压缩比在时域压缩方法中是最高的^[1]。但是,原始的LADT算法的计算量大是国外研究人员在过去很少采用这种方法的主要原因,因此也就不选择此方法作为硬件实时实现的算法了。

为此,有人对原来的算法进行了改进,提出了一种快速LADT算法,用数值开方和查表开方的压缩算法^[2]。经过一定的改进之后,有的研究人员又实现了一种更加简洁实用的LADT算法,这种方法不用进行开方运算处理,也能很好的对数据进行压缩。但是这种方法同样涉及到了平方运算。文中在此基础上,结合心电信号的特点和FPGA的优势^[3],对其算法做了进一步的改进,消掉了LADT快速拟合中的平方和开方运算,将全部计算化为一次运算。通过仿真实验对比验证了改进后的快速LADT算法的有效性。并在FPGA内部采用硬件描述语言(VHDL)对该算法进行了设计,实现了心电信号的压缩,进一步在实测试验中验证了改进后的压缩算法的有效性。

1 快速 LADT 算法原理

LADT算法的压缩效果好于其它时域的算法,尤其失真小,但存在计算量大的问题:每条拟合折线即使一次拟合成功,每个采样点要做2次反正切,一次正弦,一次余弦和6次乘除运算。于是快速LADT算法被提了出来^[1,2,5]。

LADT压缩算法的拟和过程如图1所示,步长为 k ,以 $E(i)$ 为一段折线的起点, $E(i+k)$ 为候选终点,则有

$$\theta_{1j} = \tan^{-1}[(E(i+j) - E(i))/j \cdot T], \quad (1)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}[(E(i+k) - E(i))/k \cdot T]. \quad (2)$$

于是每一点到折线的距离可按照下式计算:

$$d_j = \frac{|jT \sin(\theta_2 - \theta_{1j})|}{|\cos \theta_{1j}|}, \quad (3)$$

其中 T 为采样间隔

$$d_{j_{\max}} = \max(d_j) = E(i + j_{\max}). \quad (4)$$

若 $d_{j_{\max}} > \epsilon$,则未拟合成功并以 $E(i + j_{\max})$ 为终点重复以上过程,直至 $d_{j_{\max}} < \epsilon$ 。则拟合成功,记录 k 、 $E(i+k)$ 并以 $E(i+k)$ 为新起点,开始拟合另一段曲线。由于需要计算三角与反三角函数,所以不能直接按照上式实时实现。在此基础上,还以此图为示意图对其进行改进。方法如下:

根据图1有:

收稿日期:2007-01-20。

作者简介:刘俊刚(1982-),男,重庆大学硕士研究生,主要从事EDA技术与测检技术研究。杨永明(联系人),女,教授,博士(Tel)023-65112636;(E-mail) yangyym@cqu.edu.com。

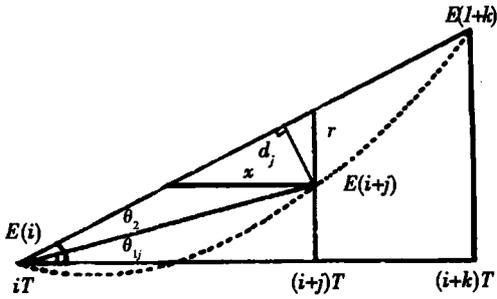


图1 LADT 算法改进原理图

$$\frac{y + E(i+j) - E(i)}{jT} = \frac{E(i+j) - E(i)}{kT}, \quad (5)$$

于是

$$y = \frac{j}{k} \Delta_k - \Delta_j, \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_k &= E(i+k) - E(i), \\ \Delta_j &= E(i+j) - E(i), \end{aligned} \quad (7)$$

又

$$x = \frac{kT}{\Delta_k} y = \left(j - \frac{\Delta_j}{\Delta_k}\right) T, \quad (8)$$

根据三角形的相似性, 还有

$$\frac{d_j}{y} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (9)$$

于是

$$d_j^2 = \frac{(j\Delta_k/k - \Delta_j)^2 (j - k\Delta_j/\Delta_k)^2 \cdot T^2}{(j\Delta_k/k - \Delta_j)^2 + (j - k\Delta_j/\Delta_k)^2 \cdot T^2} = \frac{(j\Delta_k - k\Delta_j)^2 T^2}{\Delta_k^2 + k^2 T^2}. \quad (10)$$

要比较 $d_j, j=1, 2, \dots, k$ 与 ε 的大小关系, 只须比较 d_j^2 与 ε^2 之间的大小关系, 因为 $a, b > 0$ 时, $a > b$ 等价于 $a^2 > b^2$. 故可取 $D = \max \cdot d_j^2, j=1, 2, \dots, k$, 若 $D < \varepsilon^2$ 则拟和成功, 否则失败, 从而实现了 LADT 压缩算法的简化。

2 快速 LADT 算法的改进及性能分析

笔者在此基础上, 对算法做了改进研究, 取消了 LADT 快速拟合中的平方和开方运算, 简化了运算。

2.1 快速 LADT 算法改进原理

为了使算法简化和便于 FPGA 实现, 笔者对快速 LADT 算法进行了研究和改进。

在式(10)中得出 $d_j^2 = \frac{(j\Delta_k - k\Delta_j)^2 T^2}{\Delta_k^2 + k^2 T^2}$, 其中, k 为探测步长, T 为采样时间间隔。

因为通常在进行心电图数据压缩时 $0 < k \leq 10$, 而 T

约为 0.001 s , 就有 $0 < k^2 T^2 < 10^{-4}$, 而 $\Delta_k^2 > 1$, 所以 $\Delta_k^2 > k^2 T^2$; 式(10)的分母 $\Delta_k^2 + k^2 T^2 \approx \Delta_k^2$,

所以:

$$d_j^2 \approx \frac{(j\Delta_k - k\Delta_j)^2 T^2}{\Delta_k^2}, \quad (11)$$

即

$$d_j \approx \left| \frac{(j\Delta_k - k\Delta_j) T}{\Delta_k} \right|. \quad (12)$$

这样计算 d_j 时就取消了平方项, 从而使得计算变得简便。为了更大得减少运算量, 还可以从检验拟合是否成功的方式上做进一步改进, 从而去掉除法运算。

不妨取 $D = d_{j_{\max}}, j=1, 2, \dots, k$, 若 $D < \varepsilon$ 则拟和成功, 否则失败。

设

$$D = d_m = \left| \frac{(j\Delta_k - k\Delta_m) T}{\Delta_k} \right|; 1 \leq m \leq k. \quad (13)$$

即在检验是否拟和成功时, 检查是否满足条件 $D < \varepsilon$, 因为在每一次拟和过程中, Δ_k 都为一个确定的值, 所以, 可以对下式进行等效变换:

$$\left| \frac{(j\Delta_k - k\Delta_m) T}{\Delta_k} \right| < \varepsilon, \quad (14)$$

$$|(j\Delta_k - k\Delta_m) T| < |\Delta_k| \varepsilon. \quad (15)$$

由于在每一次拟和过程中, Δ_k 都是一个确定的值, 所以不妨设

$$\varepsilon' = |\Delta_k| \cdot \varepsilon,$$

$$D' = D_{j_{\max}} = D_m = |(j\Delta_k - k\Delta_m) T|. \quad (16)$$

所以只需比较 ε' 与 D' 即可, 从而可以取消掉除法运算。

通过对比可以发现, 经过改进后, 该算法的计算量得到减化, 从而可以减少硬件实现时器件资源占用量和降低硬件实现的难度, 并可大大提高压缩实时处理速度。

2.2 仿真及性能分析

文中对算法的改进前后都进行了仿真实验。仿真结果如图2所示, 其中图(a)为原始图像, 图(b)采用的是消除三角和反三角函数后的算法, 图(c)采用的是改进之后的算法(消掉平方和除法运算)。其中测量参数为: 阈值为 0.008, 探测步长为 7, 压缩比为 6, 前者所用时间为 0.062 s, 后者所用时间为 $< 10^{-6} \text{ s}$ (计算机主频为奔腾 2.2 GHz)。

通过仿真可以看出, 从压缩图恢复的图像与原始图像有些不同, 但保证了心电图的基本特征不变, 这些差异不会对心电图的信息造成影响。所以, 采用改进后的算法完全可以保证原始数据压缩重建后失真较

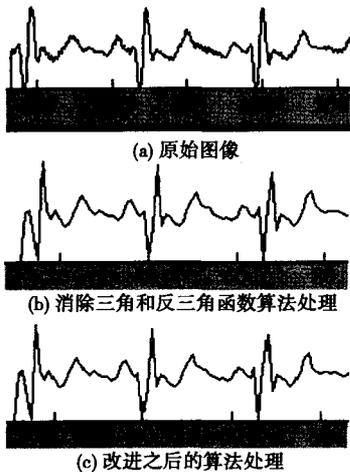


图2 LADT算法两次改进后的压缩效果对比

小,而在处理同一组数据时所需要的时间更少,实时性更高。

3 改进后快速LADT算法的硬件实现

前文已经介绍了这种压缩算法,并针对其进行了改进,使得在硬件上实现更加容易,实时性更强。在FPGA内部也就是要对将AD转换后送来的心电数据进行压缩处理。

在实际编程过程中做了如下处理:

1) 在处理绝对值运算时,采用先比较后计算,即先比较两个值的大小,然后再进行运算;

2) 对于多位乘法器的设计,文中采用了ISE中丰富的IP资源,利用Multiplier Generator的IP核生成了本算法中所需要的所有乘法器,使得该算法的实现更加方便快捷;

3) 寻求最大值的方法,如C语言中一样,本文采用冒泡法,与C语言不同的是,该方法必须在一个过程语句中实现;

4) 由于 ε 、 T 均为小数,而且每个心电数据均要与这个值相乘,如果直接使用实数类型来进行运算,就会造成消耗资源过大。因此将这两个系数进行量化,将系数由小数转换为整数。具体的设计方法是这两个系数同时扩大 N 倍后作为新的系数去运算,在判别拟合是否成功的运算式 $D_{jmax} < \varepsilon'$ 中,相当于两边均乘了一个 N ,从而不会影响判别结果。经过前文的仿真阈值 $\varepsilon = 0.0008$,时间间隔 $T = 0.001$,在本文中选择的 $N = 212 = 4096$,所以在实际运算当中选择 $\varepsilon = 0.0008 \times 4096 \approx 3$, $T = 0.001 \times 4096 \approx 4$;这样所有的运算就变为整数运算,从而很大的提高了运算速度,经过MATLAB仿真,此中方法可以与原来的那种方法可以取得同样的效果,仿真结果如图3所示,其中,

(a)为原始图像,(b)为实系数处理后的结果,(c)为量化系数处理后的结果。

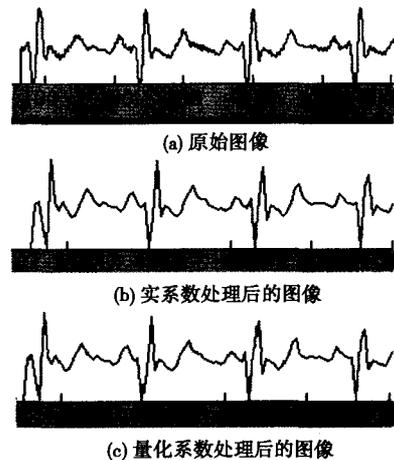


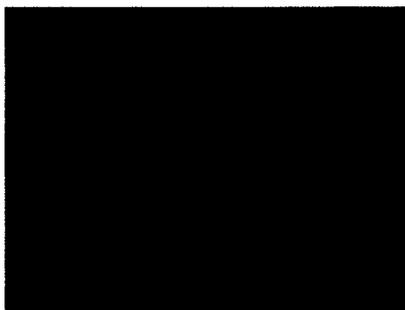
图3 系数量化前后压缩效果对比

解决了上述4个硬件实现问题后,该心电压缩算法的FPGA实现就变得容易了^[6-8],所有得运算都已变为整数运算,提高了时势性。通过上面该算法实现原理得介绍,本文在FPGA内部采用硬件描述语言VHDL设计了实现心电数据压缩的LADT模块,其顶层图输入端口有3个,分别为数据输入端口 $dsp_data_in < 11; 0 >$ 、系统时钟端口 dsp_clk 和全局停止信号 rst ;输出端口有两个,数据输出端口 $dsp_data_out < 11; 0 >$ 和送给SRAM的地址信号 $dsp_addr < 17; 0 >$ 。

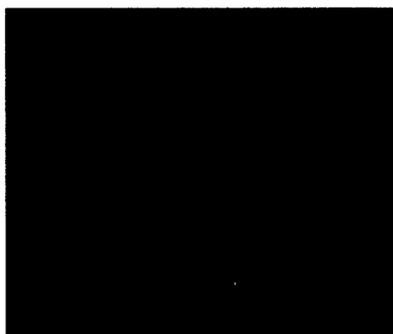
数据输入端口 $dsp_data_in < 11; 0 >$ 用来接收SRAM中的数据,为了能正确的从SRAM中读取所需要的数据,这里必须给出读SRAM数据的地址信号,即 $dsp_addr < 17; 0 >$ 地址信号;系统时钟信号 dsp_clk 为该算法运行时钟,在文中选择的是50MHz,由时钟产生模块提供;全局停止信号 rst 用于控制模块的启停,当其为“1”时,内部所有的信号不动作,输出数据信号 $dsp_data_out < 17; 0 >$ 为“0000000000000000”。

该算法实现的主要难点在于乘法器的设计,在实际编程过程中,文中设计了4个乘法器模块,分别为 dsp_mul_a 、 dsp_mul_b 、 dsp_mul_a1 和 dsp_mul_a2 ,前2种是与固定值相乘,后2个是两个数据相乘,在IP属性设置的过程中,应该注意设置数据位数时应留有一定的裕量,本文用到的乘法IP模块支持输入数据宽度为1~64位,输出数据宽度支持1~129位的宽度,所以完全可以满足本文数据乘法的要求。 dsp_mul_a 、 dsp_mul_b 是数据与固定值相乘,所以只需要有一个数据接口,在内部直接与所设定的固定值相乘即可; dsp_mul_a1 和 dsp_mul_a2 是两个数据相乘,所以有两个数据输入端口A和B。

最后通过对 FPGA 芯片程序下载,从而实现采集的心电数据的实时压缩处理。先对从人体采集的心电信号进行前期的预处理,然后经 A/D 转换送至 FPGA 内部进行压缩处理。实验结果如图 4 所示,其中示波器 1 通道(图 a 上)为心电信号未经 A/D 转换前



(a) 人体心电信号压缩前后对比



(b) 放大效果图

图 4 实验结果

的信号,2 通道(图 4(a)下)为心电信号经 FPGA 压缩处理后,D/A 转换后得到的心电信号;图 4(b)为心电信号放大后的压缩效果对比。可以看出,压缩重建后的信号明显比压缩前的信号要干净一些,这原因在于,采用 LADT 压缩算法后,对原始信号的高频干扰有一定的抑制作用。从图中可以看出该算法对心电信号压缩重构后的信号具有较高的保真度,并且基本上看不出压缩重构后对心电信号的延迟,说明本文对该算法

的改进对于心电信号的压缩是很适合的。经过实际测量得出,心电数据压缩比为 6,压缩前后信号延迟大概为 10 ms 左右,完全可以满足心电压缩的实时性要求。

4 结 语

笔者在前人研究的基础上就心电信号实时压缩的方法进行了研究,对压缩算法进行了改进,提出了一种可以避免复杂数学运算的实时实现的算法,从而使得算法的硬件实现变得简单,并且实时性也有了很大的提高,并在此研究基础上成功用于基于 FPGA 的心电数据压缩应用。通过仿真和实验的结果可以得出,本文所提出的基于 FPGA 的快速 LADT 改进算法完全可以满足心电数据压缩的性能指标,而且可以极大的减小运算量,从而使得心电数据硬件压缩的实现变得简单,实时性更高。

参考文献:

- [1] 赵勇,吕维雪. 评 LADT 心电数据压缩算法[J]. 生物医学工程学杂志, 1996, 13(1): 47-50.
- [2] 李刚,冯静,林凌. LADT 心电数据压缩算法的快速实现[J]. 中国生物医学工程学报, 1995, 14(3): 236-240.
- [3] Spartan-3 FPGA Family: Complete Data Sheet[M]. [s. l.]: XILINX Corporation, DS099 March 4, 2004.
- [4] M BERTINELLI. Data compression applied to dynamic electrocardiography[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 1989(27): 33-40.
- [5] 漆进,莫智文. LADT 快速拟合的改进[J]. 四川师范大学学报, 2002, 25(5): 445-448.
- [6] UWE MEYER-BAESE. 数字信号处理的 FPGA 实现[M]. 刘凌,胡永生 译. 北京:清华大学出版社, 2003: 9-10.
- [7] 杨恒,李爱国,王辉,等. FPGA/CPLD 最新实用技术指南[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [8] 任晓东,文博. CPLD/FPGA 高级应用开发指南[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

Application of Improved Fast-LADT Arithmetic Based on FPGA

LIU Jun-gang, YANG Yong-ming, WEI Jian-min

(Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper puts forward an improved fast-LADT arithmetic in application of electrocardiogram (ECG) compression. The arithmetic has much less mathematical operation and much easier to be implemented in hardware. With the artificial and experimental verification, it turns to be that the arithmetic keeps rather high compress ratio, has the advantages of small distortion and has the nicer results in real time. The hardware system of ECG data compression is designed, implements the improved fast-LADT arithmetic, the experiment of ECG data compression also has been carried out, and the experiment results prove the validity of the arithmetic.

Key words: LADT arithmetic; improved; data compression; FPGA

(编辑 张小强)