



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101972153 A

(43) 申请公布日 2011.02.16

(21) 申请号 201010538896.0

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

(22) 申请日 2010.11.10

代理人 刘国威

(71) 申请人 中国医学科学院生物医学工程研究所

(51) Int. Cl.

地址 300192 天津市南开区白堤路 236 号

A61B 8/06 (2006.01)

(72) 发明人 周盛 王晓春 王延群 王立伟
杨军 宋学东 李穗

权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 1 页

(54) 发明名称

彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法

均血流速度, A- 自相关函数的虚部; B- 自相关函数的实部。本发明主要应用于超声波检测血流速度估算。

(57) 摘要

本发明属于超声波检测技术领域。为提供一种资源占用量少准确可靠的彩色超声多普勒血流速度估算方法, 本发明采取的技术方案是, 彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法, 包括以下步骤: 在 LUT 查表方法中, 做第一象限的 LUT 表, 查得 $V = \arctan\left(\frac{A}{B}\right) = \arctan(C)$;

做 $0 \leq c < 1$ 的 LUT 表, 当 $1 \leq c < \infty$ 时, 先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$,

最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$ 同理, 在血流平均速度反正切函数的值域 $-\pi \sim \pi$ 范围内, 反正切运算可以转化为当 $0 \leq \frac{A}{B} = C < 1$

时, $V = \arctan(C)$;

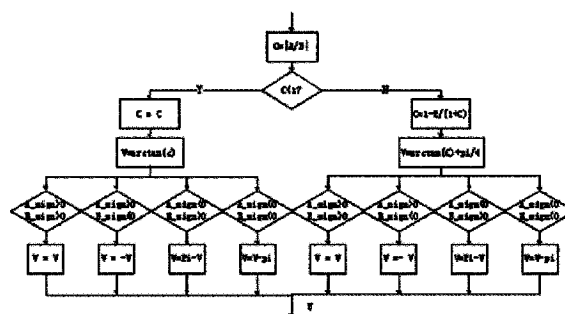
当 $1 \leq \frac{A}{B} = C < \infty$ 时, 先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$ 同理, 在血流平均速度反正切函数的值域 $-\pi \sim \pi$ 范围内, 反正切运算可以转化为当 $0 \leq \frac{A}{B} = C < 1$

$$\text{时}, V = \begin{cases} \arctan(C), A \geq 0, B > 0; \\ -\arctan(C), A \geq 0, B < 0; \\ \pi - \arctan(C), A < 0, B > 0; \\ -\pi + \arctan(C), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (3);$$

当 $1 \leq \frac{A}{B} = C < \infty$ 时, 先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$ 同理, 在血流平均速度反正切函数的值域 $-\pi \sim \pi$ 范围内, 反正切运算可以转化为当 $0 \leq \frac{A}{B} = C < 1$

$$V = \begin{cases} \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B > 0; \\ -\frac{\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B < 0; \\ \frac{3\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B > 0; \\ -\frac{3\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (4)。$$

前式中, V 是平



1. 一种彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法,其特征是,包括如下步骤:

在 LUT 查表方法中,做第一象限的 LUT 表,查得 $V = \arctan\left(\left|\frac{A}{B}\right|\right) = \arctan(C)$;

做 $0 \leq c < 1$ 的 LUT 表,当 $1 \leq c < \infty$ 时,先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$;

同理,在血流平均速度反正切函数的值域 $-\pi \sim \pi$ 范围内,反正切运算可以转化为

当 $0 \leq \left|\frac{A}{B}\right| = C < 1$ 时,

$$V = \begin{cases} \arctan(C), A \geq 0, B > 0; \\ -\arctan(C), A \geq 0, B < 0; \\ \pi - \arctan(C), A < 0, B > 0; \\ -\pi + \arctan(C), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (3)$$

当 $1 \leq \left|\frac{A}{B}\right| = C < \infty$ 时,

$$V = \begin{cases} \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B > 0; \\ -\frac{\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B < 0; \\ \frac{3\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B > 0; \\ -\frac{3\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (4)$$

前式中, V 是平均血流速度, A- 自相关函数的虚部 ;B- 自相关函数的实部。

彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法

技术领域

[0001] 本发明属于超声波检测技术领域、超声检测仪器,特别涉及一种彩色超声多普勒血流速度估算的反正切优化算法。

背景技术

[0002] 血流速度及其方向是彩色超声多普勒血流系统成像中最为基础、最为重要的参数。在彩色超声多普勒系统中,接收信号中的杂散信号(如肌肉组织以及血管壁反射的回波)对希望利用的血流信号有着严重的干扰,因此为了提高彩色血流成像质量,对其进行滤波抑制。由滤波输出的 I_i , Q_i 正交信号合成复数信号 $Z_i(n) = I_i(n) + jQ_i(n)$, 计算该复合信号的自相关函数,然后由自相关函数来计算平均血流速度。根据中外文献可知彩色超声多普勒成像系统中平均血流速度的计算公式为

$$[0003] \quad \bar{v} = \frac{c}{2w_0 \cos \theta} \overline{w_d} = F \arctan\left[\frac{A}{B}\right] \quad (1)$$

[0004] 其中, $F = \frac{c}{2w_0 \cos \theta}$; c — 声波在人体中的传播速度; w_0 — 声波的角频率; θ — 对应声速线的扫描角度; T — 脉冲发射时间间隔; A — 自相关函数的虚部; B — 自相关函数的实部。

[0005] 由公式 (1) 可知平均血流速度的计算关键是反正切运算,为了满足整个系统的实时性需求,设计一种简单易于硬件实现的反正切计算方法是相当必要的。为了简化问题,我们在计算过程中认为 $V = \arctan\left(\frac{A}{B}\right)$, 此处 V 的范围为 $-\pi \sim \pi$ 。

[0006] 目前硬件实现反正切运算的方法主要有查表法、泰勒公式展开法和 CORDIC 算法。传统的查表法需要的存储单元随着计算精度的增加或输入范围的增大而呈指数增加的趋势。为解决体积太大的问题, Basoglu 等提出了一种创建两个 LUT (look-up table, 查询表) 的方法, 一个包含反正切函数快速变化的范围, 这个 LUT 具有良好的量化性, 对细小变化的敏感性较好, 另一个 LUT 针对反正切函数变化缓慢的范围, 这个非线性的 LUT 具有较大的量化步长, 这样有效减少了 LUT 体积, 但这种减少依然不够; 泰勒公式展开法在自变量小于 1 时收敛比较快, 然而在自变量大于 1 时收敛慢, 需要大量乘法器, 耗费硬件资源, FPGA 不易实现; CORDIC 快速算法通过查找事先计算好 $\arctan 2$ 结果的 LUT 表格, 然后进行移位加法运算得出结果, 需要制定的 LUT 表同样庞大难于实现。

[0007] 可见上述都存在资源占用量大的问题。

发明内容

[0008] 为克服现有技术的不足, 提供一种资源占用量少准确可靠的彩色超声多普勒血流速度估算方法, 本发明采取的技术方案是, 彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法, 包括以下步骤:

[0009] 在 LUT 查表方法中, 做第一象限的 LUT 表, 查得 $V = \arctan\left(\left|\frac{A}{B}\right|\right) = \arctan(C)$;

[0010] 做 $0 \leq c < 1$ 的 LUT 表, 当 $1 \leq c < \infty$ 时, 先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$;

[0011] 同理, 在血流平均速度反正切函数的值域 $-\Pi \sim \Pi$ 范围内, 反正切运算可以转化为

[0012] 当 $0 \leq \left|\frac{A}{B}\right| = C < 1$ 时,

$$[0013] \quad V = \begin{cases} \arctan(C), A \geq 0, B > 0; \\ -\arctan(C), A \geq 0, B < 0; \\ \pi - \arctan(C), A < 0, B > 0; \\ -\pi + \arctan(C), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (3)$$

[0014] 当 $1 \leq \left|\frac{A}{B}\right| = C < \infty$ 时,

$$[0015] \quad V = \begin{cases} \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B > 0; \\ -\frac{\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B < 0; \\ \frac{3\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B > 0; \\ -\frac{3\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (4)$$

[0016] 前式中, V 是平均血流速度, A - 自相关函数的虚部 ; B - 自相关函数的实部。

[0017] 本发明具有如下技术效果 :

[0018] 本发明采用只需要做 $0 \leq c < 1$ 的 LUT 表, 当 $1 \leq c < \infty$ 时, 先计算 $\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 再查 LUT 表找 $\arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right)$, 因而本发明计算的反正切结果和理论值相比, 误差较小, 精度较高, 能够满足血流速度的计算需要。

附图说明

[0019] 图 1 反正切运算流程图。

[0020] 图 2 仿真波形图。

具体实施方式

[0021] 在 LUT 查表方法中, 我们考虑到反正切函数为 $-\Pi/2 \sim \Pi/2$ 范围内的奇函数, 那

么只需要做第一象限的 LUT 表, 查得 $V = \arctan\left(\left|\frac{A}{B}\right|\right) = \arctan(C)$ 便可以通过加减运算换算出

其他象限的值。

[0022] 由三角公式 $\tan(\frac{\pi}{4} + \alpha) = \frac{1 + \tan(\alpha)}{1 - \tan(\alpha)}$ ，我们可以知，当 $\Pi/4 \leq V < \Pi/2$ 时，设 $V =$

$\Pi/4 + X$, $Y = \tan(X)$ ，则 $C = \tan(V) = \tan(\pi/4 + X) = \frac{1+Y}{1-Y}$ ，从而 $Y = \frac{C-1}{C+1}$, $0 \leq Y < 1$ 。所以：

当 $1 \leq c < \infty$ 时，

$$[0023] \quad V = \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right) \quad (2)$$

[0024] 这样我们只需要做 $0 \leq c < 1$ 的 LUT 表，当 $1 \leq c < \infty$ 时，先计算 $(\frac{C-1}{C+1})$ ，再查 LUT

表找 $\arctan(\frac{C-1}{C+1})$ ，最后输出 $V = \frac{\pi}{4} + \arctan(\frac{C-1}{C+1})$ 。

[0025] 同理，在血流平均速度反正切函数的值域 $-\Pi \sim \Pi$ 范围内，反正切运算可以转化为

[0026] 当 $0 \leq \frac{A}{B} = C < 1$ 时，

$$[0027] \quad V = \begin{cases} \arctan(C), A \geq 0, B > 0; \\ -\arctan(C), A \geq 0, B < 0; \\ \pi - \arctan(C), A < 0, B > 0; \\ -\pi + \arctan(C), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (3)$$

[0028] 当 $1 \leq \frac{A}{B} = C < \infty$ 时，

$$[0029] \quad V = \begin{cases} \frac{\pi}{4} + \arctan(\frac{C-1}{C+1}), A > 0, B > 0; \\ -\frac{\pi}{4} - \arctan(\frac{C-1}{C+1}), A > 0, B < 0; \\ \frac{3\pi}{4} - \arctan(\frac{C-1}{C+1}), A < 0, B > 0; \\ -\frac{3\pi}{4} + \arctan(\frac{C-1}{C+1}), A < 0, B < 0; \end{cases} \quad (4)$$

[0030] 通过利用反正切函数本身的性质，我们将查表运算作了简化，这样只要产生一个较小的 LUT 查找表，便可以计算出 $-\Pi \sim \Pi$ 范围内的平均血流速度。

[0031] 根据上述分析，血流速度反正切运算在 FPGA 上实现的流程图如图 1 所示。

[0032] 在实际电路里为了便于计算，A 的数值位是通过 24 位二进制定点数来表示，B 的数值位是通过 16 位二进制定点数表示，从而使 A/B 的值扩大了 $2^8 = 256$ 倍，查表结果 $\arctan$ （弧度制）是利用 10 位二进制定点数表示，最后的计算结果 V（弧度制）用 13 位定点数表示，最高位为符号位，低 10 位为小数位，中间两位为整数位，相当于将理论值扩大了 $2^{10} = 1024$ 倍。

[0033] 表 $10 \leq A/B < 1$ 时的查表说明

[0034]

查表 地址	对应 A/B 值	查表值	对应 Φ 值 (弧度)	理论值 (弧度)	误 差 (弧度)
0	0	0	0	0	0
1	0.0039	4	0.0039	0.0039	0
2	0.0078	8	0.0078	0.0078	0
3	0.0117	12	0.0117	0.0117	0
4	0.0156	16	0.0156	0.0156	0
5	0.0195	20	0.0195	0.0195	0
...	...	...	...	...	...
251	0.9805	796	0.7773	0.7756	0.0017
252	0.9844	798	0.7793	0.7775	0.0018
253	0.9883	800	0.7813	0.7795	0.0017
254	0.9922	802	0.7832	0.7815	0.0017
255	0.9961	804	0.7852	0.7834	0.0018

[0035] 表 $2A/B \geq 1$ 时的查表说明

[0036]

查表 地址	对应 A/B 值	查表值	对应 Φ 值 (弧度)	理论值 (弧度)	误 差 (弧度)
0	1	0	0	0	0
1	1.0078	4	0.7893	0.7893	0
2	1.0157	8	0.7932	0.7932	0
3	1.0237	12	0.7971	0.7971	0
4	1.0317	16	0.8010	0.8010	0
5	1.0398	20	0.8049	0.8049	0
...	...	...	...	...	...
251	101.5641	796	1.5627	1.5610	0.0017
252	127.2051	798	1.5647	1.5629	0.0018
253	169.9402	800	1.5667	1.5649	0.0018
254	255.4103	802	1.5686	1.5669	0.0017
255	511.8205	804	1.5706	1.5688	0.0018

[0037] 理论值与实验结果比较如表 1,表 2 所示,其中 A/B 的值以 0.0039 精度对应于相应的 $\arctan(A/B)$ 的值,预先通过 MATLAB 工具计算好存储于 LUT 中的。查表结果与直接对 $\arctan(A/B)$ 进行计算的理论值误差如上表中所示,在超声多普勒血流速度计算公式 (1) 中,由于反正切运算结果作为一个乘积项出现,因此上述误差均可以接受。

[0038] 表 2 中,当 $A/B \geq 256$ 时,先计算 $\frac{2*256*256}{256+C} = 256 - \frac{131072}{256+C}$, $C=256*\left|\frac{A}{B}\right|$,再查表得出对应的反正切值,然后根据 A, B 的符号确定值所在的象限计算最后的结果,即第一象限结

果为 $\arctan + \Pi / 4$, 第二象限为 $-\arctan - \Pi / 4$, 第三象限为 $3 \Pi / 4 - \arctan$, 第四象限为 $\arctan - 3 \Pi / 4$ 。

[0039] 分析表 1, 表 2 可见, 该方法计算的反正切结果和理论值相比, 误差较小, 精度较高, 能够满足血流速度的计算需要。

[0040] 下面结合附图和实施例进一步详细说明本发明。

[0041] 本发明在 quartusII6.0 软件环境下设计完成, 并在 cyclone 系列芯片 EP2C35U484C8 上实现, LUT 占用的 ROM 空间为 2560bits (对于 FPGA 来说完全可以接受), 运算速度可达 111.21MHZ, 能够满足 40MH 或 80MHz 超声系统的速度需求。图 2 为反正切运算的时序仿真图。这里 a_sign, b_sign 为 A, B 的符号位, 用于判断结果所在的象限, 自相关计算后的 A, B 值是以二进制有符号数的形式, 输入到该反正切计算模块。此外, 输入数据 a_data 相当于扩大了 256 倍, 输出结果 atan 扩大了 1024 倍, 并延迟了 3 个时钟周期, 精度为 0.0039 (弧度制), 与设计预期的输出结果相一致, 可以直接用于后期运算。

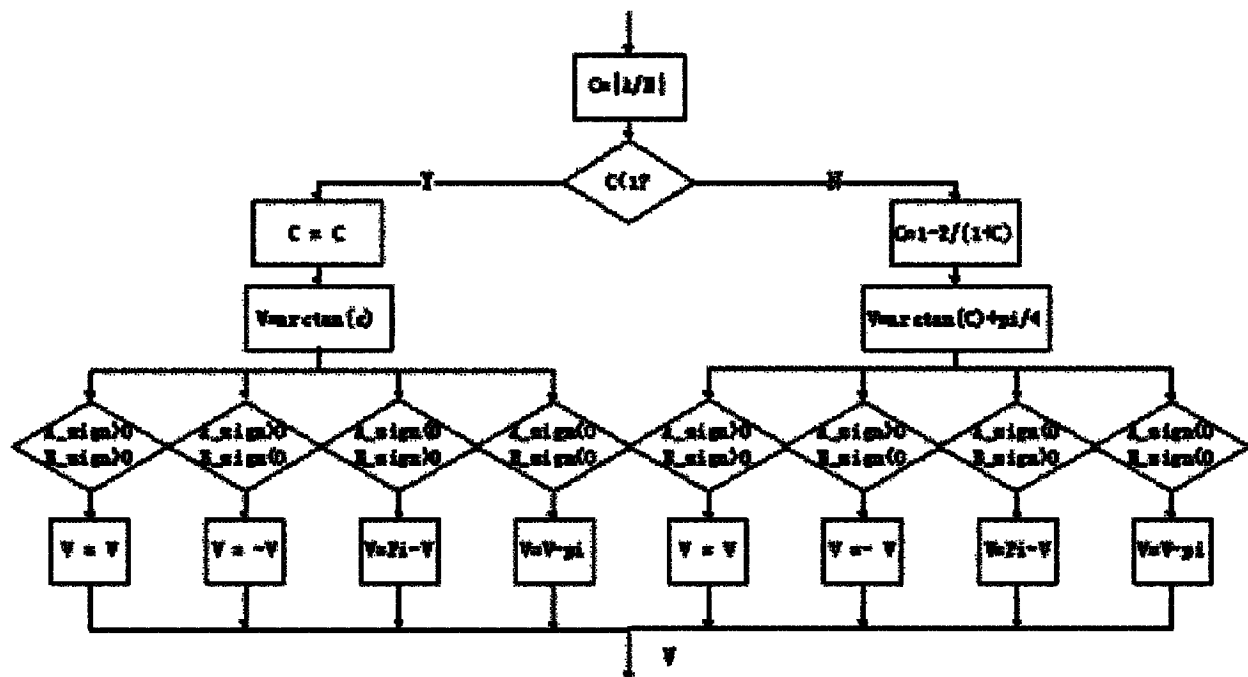


图 1

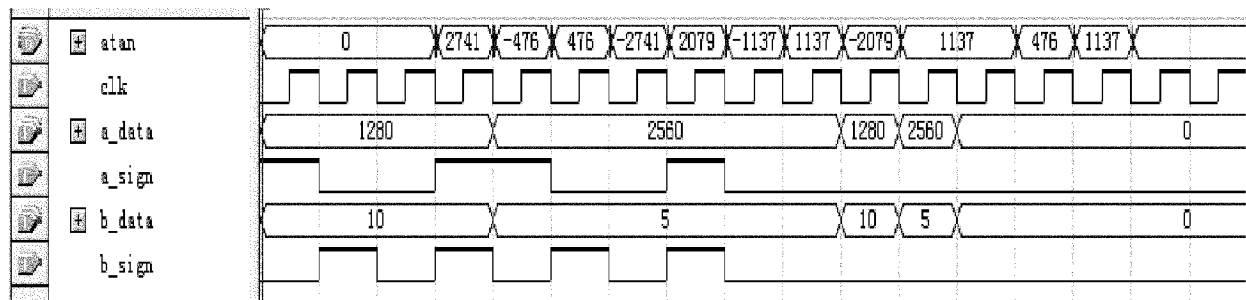


图 2

专利名称(译)	彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法		
公开(公告)号	CN101972153A	公开(公告)日	2011-02-16
申请号	CN201010538896.0	申请日	2010-11-10
[标]申请(专利权)人(译)	中国医学科学院生物医学工程研究所		
申请(专利权)人(译)	中国医学科学院生物医学工程研究所		
当前申请(专利权)人(译)	中国医学科学院生物医学工程研究所		
[标]发明人	周盛 王晓春 王延群 王立伟 杨军 宋学东 李穗		
发明人	周盛 王晓春 王延群 王立伟 杨军 宋学东 李穗		
IPC分类号	A61B8/06		
代理人(译)	刘国威		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明属于超声波检测技术领域。为提供一种资源占用量少准确可靠的彩色超声多普勒血流速度估算方法，本发明采取的技术方案是，彩色超声多普勒血流速度估算反正切优化算法，包括以下步骤：在LUT查表方法中，做第一象限的LUT表，查得；做 $0 \leq c < 1$ 的LUT表，当 $1 \leq c < \infty$ 时，先计算，再查LUT表找，最后输出；同理，在血流平均速度反正切函数的值域 $[-\pi \sim \pi]$ 范围内，反正切运算可以转化为当时；当时，。前式中， V 是平均血流速度，A-自相关函数的虚部；B-自相关函数的实部。本发明主要应用于超声波检测血流速度估算。

$$V = \begin{pmatrix} \frac{\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B > 0; \\ -\frac{\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A > 0, B < 0; \\ \frac{3\pi}{4} - \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B > 0; \\ -\frac{3\pi}{4} + \arctan\left(\frac{C-1}{C+1}\right), A < 0, B < 0; \end{pmatrix}$$