

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.07.022



基于扩展收敛域指数 CORDIC 算法的超声 时间增益补偿技术

邓鹰飞¹, 刘桂雄²

(1. 梧州学院机械与材料工程学院, 广西 梧州 543002; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对经典超声时间增益补偿增益范围有限问题, 该文提出一种基于扩展收敛域指数 CORDIC 算法的超声时间增益补偿技术。首先, 通过指数 CORDIC 算法计算信号原始放大倍数; 然后, 利用乘法器组将 A/D 采样后的超声回波数字信号与放大倍数相乘; 最后, 经 D/A 转换器输出补偿后的模拟信号。实验表明: 扩展收敛域指数 CORDIC 算法计算超声回波增益最高相对误差不高于 0.014%, 该算法的超声时间增益补偿模块能准确检出检测块内不同深度处缺陷, 准确度高、实时性好、增益范围大, 具有很好的实际应用效果和重要研究价值。

关键词: 时间增益补偿; CORDIC 算法; FPGA; 超声实验平台

中图分类号: TH878

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)07-0116-05

Ultrasonic time gain compensation technology based on extended convergence index CORDIC algorithm

DENG Yingfei¹, LIU Guixiong²

(1. School of Mechanical and Material Engineering, Wuzhou University, Wuzhou 543002, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the problem of the limited gain range of classical ultrasonic time gain compensation, an ultrasonic time gain compensation technique based on extended convergence index CORDIC algorithm is proposed. First, the original signal magnification is calculated through index CORDIC algorithm. Then the ultrasonic echo digital signal after A/D sampling is sent to the multiplier group to multiply with the magnification. Finally, the compensated analog signal is exported after the D/A conversion. Experimental results demonstrate that the highest relative error of ultrasonic echo gain based on extended convergence index CORDIC algorithm is less than 0.014%. The defects in the test block were detected accurately, which has the characteristics of high accuracy, good real-time performance and large gain range, and it has good practical application effect and important research value.

Keywords: time gain compensation; CORDIC algorithm; FPGA; ultrasonic experimental platform

收稿日期: 2018-01-03; 收到修改稿日期: 2018-02-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ230575); 2018年度广西高校中青年教师基础能力提升项目(2018KY0536)

作者简介: 邓鹰飞(1979-), 女, 广西南宁市人, 讲师, 硕士, 主要从事超声无损检测研究。

0 引言

超声相控阵技术是工业无损检测领域中极为重要的手段^[1-2], 可灵活控制声束形状、焦点位置和扫描路径等。在相控阵检测中, 超声信号强度会随其在介质中传播而衰减, 影响检测图像质量, 需对回波信号进行时间增益补偿 (TGC), 而基于传统串行处理的 CPU 或数字信号处理技术 (DSP) 难以满足相控阵大量数据实时处理要求。故本文将解决三角函数、指数函数等运算的经典 CORDIC 算法^[3-4]用于超声相控阵时间增益补偿, 研究指数 CORDIC 算法收敛域扩展方法及其 FPGA 实现技术, 并采用该算法计算超声相控阵时间增益 (dB) 曲线对应的原始放大倍数, 设计基于 CORDIC 算法的 dB-倍数求解器, 实现超声回波信号的实时、高精度补偿, 最后对超声 TGC 系统性能进行仿真和试验。

1 指数 CORDIC 算法原理及收敛域扩展

指数 CORDIC 算法仅通过移位、加减操作即可实现对指数函数求解, 但该算法收敛域太小, 因此需研究其收敛域扩展方法才能使之满足工业应用需求。

1.1 指数 CORDIC 算法原理

图 1 为双曲系统向量旋转模型图, 向量 \mathbf{OV}_1 沿双曲线函数 $x^2 - y^2 = C^2$ 旋转至 \mathbf{OV}_n 。若 \mathbf{OV}_1 、双曲线和 x 轴围成面积的 2 倍为 λ , \mathbf{OV}_n 、双曲线和 \mathbf{OV}_1 轴围成面积的 2 倍为 θ ^[5]。则 $V_1(x_1, y_1)$ 和 $V_n(x_n, y_n)$ 两点的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_n = C \cdot \cosh(\lambda + \theta) = x_1 \cosh \theta + y_1 \sinh \theta \\ y_n = C \cdot \sinh(\lambda + \theta) = x_1 \sinh \theta + y_1 \cosh \theta \end{cases} \quad (1)$$

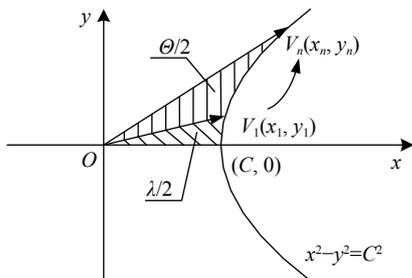


图 1 双曲系统 CORDIC 旋转模型

若将 θ 分解成一系列微角度相加的形式, 即 $\theta = d_1\theta_1 + d_2\theta_2 + \dots + d_n\theta_n$, 其中 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 是微角度集, 满足 $\tanh \theta_i = 2^{-i}$ 。每进行一次微角度相加, 就相当于对图 1 中旋转向量进行一次基本旋转 (迭代),

d_i 是控制向量旋转方向的参数, 可取 ± 1 , 当 $d_i=1$ 时向量逆时针旋转, 当 $d_i=-1$ 时向量顺时针旋转。式 (1) 可表示为

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^n \left\{ \cosh \theta_i \cdot \begin{pmatrix} 1 & \tanh \theta_i \\ \tanh \theta_i & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \right\} = \prod_{i=1}^n \left\{ \begin{pmatrix} 1 & d_i \cdot 2^{-i} \\ d_i \cdot 2^{-i} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \cdot K \right\} \quad (2)$$

$$K = \prod_{i=1}^n \cosh \theta_i = \prod_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{1 - \tanh^2 \theta_i}} = \prod_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{1 - 2^{-2i}}}$$

其中 K 是缩放因子, 当向量旋转次数足够多时, 它趋于一个常数 1.207 5。

指数 CORDIC 算法每次旋转迭代方程式为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + d_i y_i 2^{-i} \\ y_{i+1} = y_i + d_i x_i 2^{-i} \\ z_{i+1} = z_i - d_i \tanh^{-1} 2^{-i} \\ d_i = \text{sign}(z_i) \end{cases} \quad (3)$$

要满足迭代收敛, 必须在第一次迭代之后, 每隔 3 次迭代, 重复一次当前旋转角度^[6-7], 即 $i=1, 2, 3, 4, 4, 5, 6, 7, 7, \dots, n$ 。

若初始输入 $x_1=y_1=1/K$, $z_{in}=\theta$, 则经过足够次迭代后有:

$$\begin{cases} x_{n+1} = K[x_1 \cosh(z_{in}) + y_1 \sinh(z_{in})] \\ y_{n+1} = K[x_1 \sinh(z_{in}) + y_1 \cosh(z_{in})] \\ z_{n+1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Rightarrow x_{n+1} = y_{n+1} = \cosh z_{in} + \sinh z_{in} = e^{z_{in}} = e^{\theta}$$

即可求出 θ 的指数幂, 且从式 (2) 中可以看出, CORDIC 算法将指数函数求解过程分解为多次迭代, 每次迭代中只需进行移位和加减操作, 极大提升硬件计算速度, 降低硬件实现复杂度。

1.2 指数 CORDIC 算法收敛域扩展方法

由双曲系统指数 CORDIC 算法原理及角度序列表达式可知, 若旋转向量一直往同一个方向迭代, 可得到 CORDIC 算法能够计算的最大输入角度, 即双曲线系统 CORDIC 算法的收敛范围:

$$|z_{in}| \leq \theta_{\max} = \sum_{i=1}^N \tanh^{-1}(2^{-i})|_{N=\infty} \approx 1.118 2 \quad (5)$$

由于算法收敛范围太小, 无法满足超声相控阵时间增益控制系统信号处理需求, 因此需对算法收敛域进行扩展处理。

对任意输入角度 z_{in} , 可用 z_{in} 除以 $\ln 2$ 取整得到 Q , 取余得到 φ , 则有:

$$z_{in} = Q \cdot \ln 2 + \varphi \Rightarrow e^{z_{in}} = 2^Q \cdot e^{\varphi} (\varphi < \ln 2) \quad (6)$$

故只需用CORDIC算法求得 e^{α} ,再移 Q 位即可^[8]。

2 基于CORDIC算法的超声时间增益补偿实现架构及仿真

2.1 超声时间增益补偿原理及实现框架

图2为基于CORDIC算法的超声时间增益补偿原理图。首先读取存储在系统RAM中dB形式

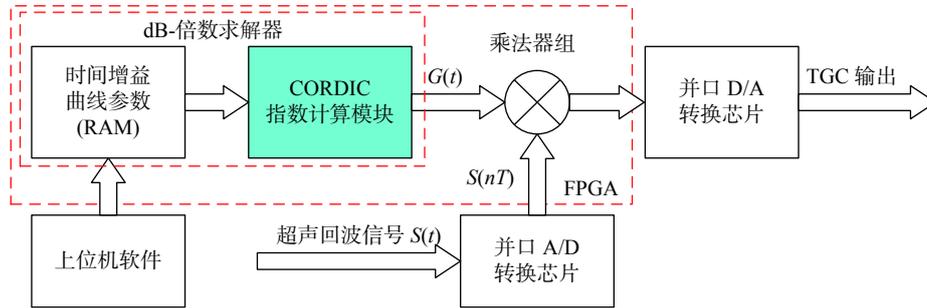


图2 基于CORDIC算法的超声时间增益控制原理图

2.2 基于CORDIC算法的dB-倍数求解器设计及仿真

图3为基于指数CORDIC算法的dB-倍数求解器原理图。将上位机软件生成的分贝数增益曲线转化为原始放大倍数曲线的计算速度、精度,设计基于扩展收敛域指数CORDIC算法的dB-放大倍数对应求解器,把对应不同深度检测位置的dB补偿增益实时转化为原始放大倍数,对超声回波信号进行数字补偿,提高增益范围、精度。其中dB-倍数对应求解器输入参数应为检测材料的衰减系数、当前聚焦检测深度(由上位机软件输入)。

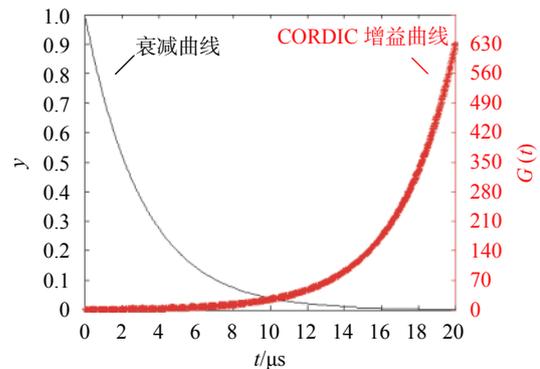


图3 基于CORDIC算法的dB-倍数求解器原理图

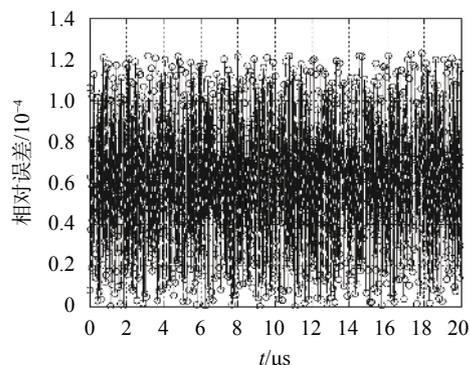
在Matlab上对基于指数CORDIC算法的dB-倍数求解器进行精度仿真,图4为基于CORDIC算法的dB-倍数求解器仿真结果。图4(a)是根据平面波超声信号在均匀介质中衰减情况模拟出的超声信号衰减曲线,再通过扩展收敛域指数CORDIC算法计算得到相应的回波信号实际增益补偿曲线,图中左纵坐标 y 表示衰减倍数,右纵坐标 $G(t)$ 表示经CORDIC算法计算得到的超声回波实际增益系数。模拟超声检测系统参数为:介质衰减系数 $\alpha=0.032$ dB/mm^[9-10],超声波中心频率5 MHz,采样频率50 MHz,增益补偿常数 $K=1$ 。通过CORDIC

的增益曲线,通过扩展收敛域指数CORDIC算法计算其原始放大倍数 $G(t)$,再通过乘法器组将A/D采样后超声回波数字信号与放大倍数相乘,最后经D/A转换器输出补偿后的模拟信号。本方法的重点在基于CORDIC算法的dB-倍数求解器设计、超声时间增益补偿FPGA实现。

算法计算不同时间到达的超声回波实际增益倍数,与实际补偿倍数相比,得到基于指数CORDIC算法的dB-实际倍数求解器计算的相对误差情况,可以看出CORDIC算法计算超声回波增益最高相对误差不高于0.014%,满足超声时间增益补偿精度要求。



(a) 指数CORDIC算法计算生成增益曲线



(b) CORDIC算法计算超声回波相对误差

图4 CORDIC算法dB-倍数求解器仿真结果图

2.3 超声时间增益补偿 FPGA 实现及仿真

为加快超声相控阵时间增益控制系统运算速度, 可采用流水线设计法在 FPGA 上实现扩展收敛域指数 CORDIC 算法, 如图 5 所示。

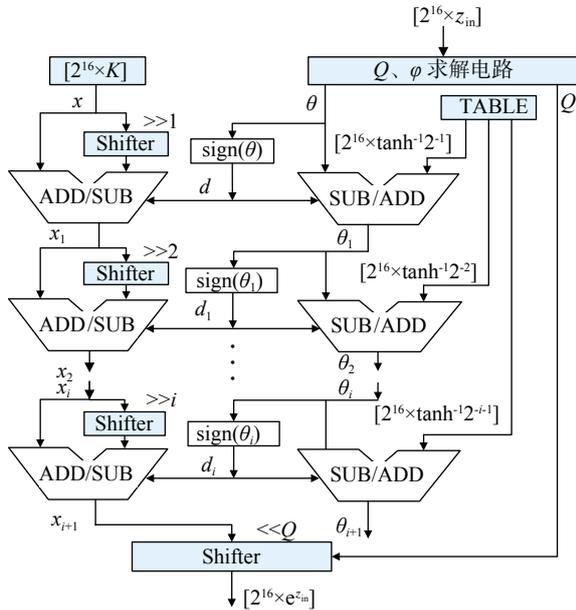


图 5 指数 CORDIC 算法 FPGA 实现图

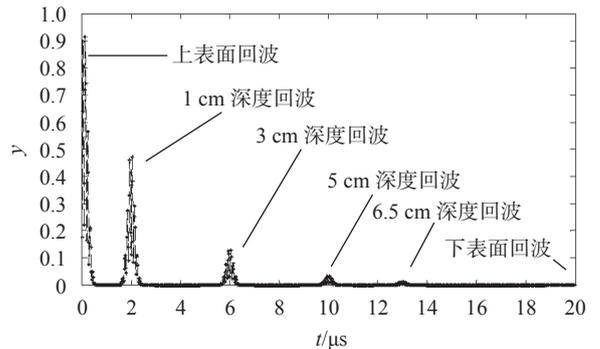
本文采用 FPGA 开发编程软件 Quartus II 进行仿真, 选用芯片为 Cyclone IV 系列 EP4CE15F17A7, 仿真时钟频率为 100 MHz。为验证 CORDIC 算法在 FPGA 上计算指数函数输出精度, 在 Modelsim 软件上对 CORDIC 算法指数计算模块进行编译仿真。采用 15 级流水线 CORDIC 算法结构, 将 Modelsim 仿真数据导出分析, 取部分浮点求其指数的仿真计算结果, 并与实际值进行对比, 如表 1 所示。

表 1 CORDIC 算法 Modelsim 仿真结果

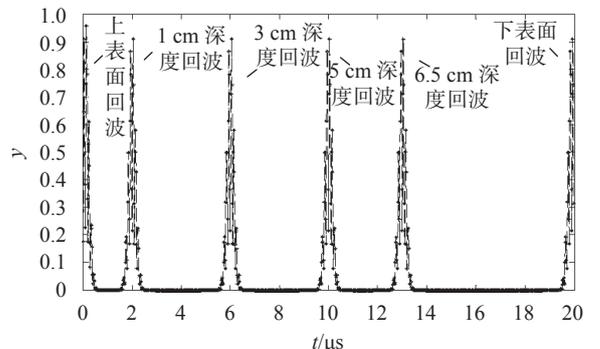
z_{in}	$e^{z_{in}}$ 实际值	$e^{z_{in}}$ 计算值	相对误差/%
0.5	1.648 72	1.648 81	0.005 5
1.5	4.481 68	4.481 43	-0.005 6
2.5	12.182 49	12.181 98	-0.004 2
3.5	33.115 45	33.115 81	0.001 1
4.5	90.017 13	90.018 02	0.001 0
5.5	244.691 93	244.690 95	-0.000 4
6.5	665.141 63	665.139 49	-0.000 3
7.5	1 808.142 41	1 808.145 88	0.000 2

可以看出, 算法在 FPGA 上实现计算指数函数平均最大相对误差不超过 0.01%, 足以满足超声相控阵时间增益补偿系统精度的要求。

在 Matlab 上对基于指数 CORDIC 算法的超声相控阵时间增益控制系统工作情况进行仿真。模拟超声检测参数分别为: 探头中心频率 5 MHz, 采样频率 50 MHz, 被测物体(固)厚度 10 cm, 超声波速 5 000 m/s, 介质衰减系数 $\alpha=0.032$ dB/mm。模拟被测物体内部深度为 1, 3, 5, 6.5 cm 处分别有大小相同的缺陷。图 6 为基于 CORDIC 算法的超声回波信号增益控制仿真结果, 从图 6(a) 可看出, 虽然被测物体内部缺陷大小相同, 但受超声波衰减特性影响, 回波信号幅值随探测深度增加而明显降低, 在 6.5 cm 处的缺陷回波能量几乎完全被耗散, 无法真实反映缺陷大小; 从图 6(b) 可看出, 不同深度处大小相同的缺陷回波强度也保持一致, 验证了基于指数 CORDIC 算法的超声回波信号增益控制系统对超声回波信号时间增益控制的准确性和可靠性。



(a) 未经过 TGC 的超声回波信号



(b) 经过 TGC 后的超声回波信号

图 6 基于 CORDIC 算法的超声回波增益补偿仿真

3 基于 CORDIC 算法的超声时间增益补偿试验

本文具体试验方案为: 在超声相控阵上位机软

件上根据被测材料输入其声波衰减系数 α ;上位机软件生成的 dB 增益曲线 $20\lg G(t)$ 通过 PCIe 接口送入主板 FPGA 上 dB -放大倍数求解单元进行计算,生成原始放大倍数曲线;原始放大倍数曲线再与超声回波经 ADC 采样后的数字信号相乘,实现超声回波信号数字增益控制;将补偿后信号回送上位机软件进行图像重建,生成检测图像。

图 7 为搭建的试验平台,采用超声相控阵仪器作为下位机,基于 FPGA+CORDIC 算法实现模式,实现超越函数 CORDIC 算法硬件求解。检测对象为 B 型标准试块纵向分布的 8 个直径为 2 mm 的圆孔。

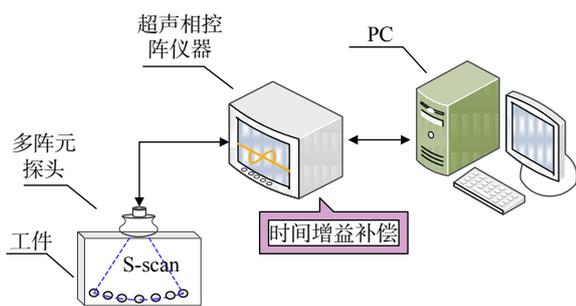


图 7 试验平台搭建图

图 8 为时间增益补偿试验检测成像图,其横、纵坐标分别为水平方向检测距离 (mm)、纵向检测深度 (mm)。检测图像中纵向有效显示区红色像素越多表明超声回波幅值越大,即缺陷越大。由试验结果可看出,纵向分布的 8 个 2 mm 圆孔均被检出;根据红色像素点分布情况,对不同深度缺陷,超声时间增益控制模块能根据其所在位置进行相应补偿,达到精确检测缺陷大小的效果,验证基于 CORDIC 算法的超声时间增益补偿技术实际效果与价值。

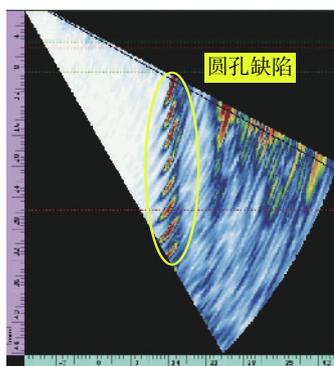


图 8 时间增益补偿试验检测成像图

4 结束语

1) 本文基于超声相控阵回波信号时间增益控制技术原理及需求,提出采用扩展收敛域指数 CORDIC 算法对 dB 增益补偿曲线转换为实际放大倍数 $G(t)$ 曲线的实时计算,再对超声回波采样信号进行数字补偿,降低时间增益控制模块硬件复杂度,提高时间增益控制精度,增大补偿范围。

2) 设计基于扩展收敛域的双曲系统指数 CORDIC 算法的 dB -放大倍数对应求解器并进行精度测试,结果表明基于该算法计算超声回波实际增益最大相对误差不超过 0.014%,精度满足超声相控阵时间增益控制需求。

3) 采用 CORDIC 算法 dB -增益倍数求解器计算超声回波信号实际增益倍数,对不同深度处大小相同的缺陷进行补偿,仿真结果表明经过基于 CORDIC 算法的时间增益补偿后,不同深度处相同大小的缺陷回波强度保持一致,准确反映物体内部缺陷真实大小,提高超声相控阵检测准确性。

参考文献

- [1] 张宇,王雪梅,倪文波.基于 DDS 和 FPGA 的数字式多脉冲激励超声检测系统设计[J].中国测试,2016,42(6):74-79.
- [2] 陆铭慧,胡梦雪,孙霓,等.基于 FPGA 的超声相控阵接收系统的研究[J].压电与声光,2015,37(5):855-857.
- [3] VOLDER J E. The CORDIC trigonometric computing technique[J]. Electronic Computers Ire Transactions on, 1959, EC-8(3): 330-334.
- [4] GARRIDO M, KÄLLSTRÖM P, KUMM M, et al. CORDIC II: a new improved CORDIC algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2016, 63(2): 186-190.
- [5] 陈旭文,刘桂雄,唐文明.扩展收敛域任意对数 CORDIC 算法与 FPGA 实现[J].中国测试,2015,41(7):108-111.
- [6] 唐文明,刘桂雄.指数函数 CORDIC 算法的 FPGA 定点化技术[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(7):9-14.
- [7] AGGARWAL S, MEHER P K, KHARE K. Scale-free hyperbolic CORDIC processor and its application to waveform generation[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2013, 60(2): 314-326.
- [8] 牟胜梅,李兆刚.一种面向 FPGA 的指/对数函数求值算法[J].计算机工程与应用,2011,47(33):59-61.
- [9] 董世运,李浩宇,徐滨士,等.HT250 材料超声探伤中的衰减性探究[J].中国测试,2016,42(3):123-127.
- [10] 董志勇,胡金榜.超声波衰减系数法评估材料损伤的研究[J].化工机械,2007,34(3):139-143.

(编辑:商丹丹)