

声表面波小波处理器的计算机模拟与仿真

刘守兵, 卢文科

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 由于缺乏基本的计算机模拟与仿真手段, 我们无法在试制样品前预估所设计的声表面波小波处理器的性能参数。因而, 一旦设计参数出现偏差, 所试制的样品的性能指标也就不可能满足设计要求, 这不但延长研发周期, 而且浪费大量不必要的研发经费。为此, 该文介绍了一种对声表面波小波处理器进行计算机模拟与仿真的模型, 并将其用于声表面波小波处理器的设计研制中, 以期在样品试制前对其进行计算机模拟与仿真, 直至模拟与仿真结果满足设计要求后再进行样品试制与测试, 以尽可能地缩短研究周期, 节约研究经费。理论与研究结果表明, 采用该文介绍的计算机模拟与仿真模型对声表面波小波处理器进行计算机模拟与仿真, 其模拟仿真结果与实测结果相比, 其误差小于 1%, 基本能满足设计研发工作的需要。

关键词: 声表面波; 小波处理器; 计算机模拟; 计算机仿真; 性能参数

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Computer Modeling and Simulation of Wavelet Processor Using Surface Acoustic Wave Devices

LIU Shoubing, LU Wenke

(School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The objective of this exploratory study is to investigate the computer modeling and simulation of wavelet processor using surface acoustic wave devices. The motive for this research was prompted by the long research and design cycle as well as huge research funding of the conventional design and research method of wavelet processor using surface acoustic wave devices. A computer modeling and simulation method of wavelet processor using surface acoustic wave device was discussed in this paper. The proposed method was used for the design of surface acoustic wave wavelet processor. Compared the measured results with the theoretical modeling and simulation results, the error was less than 1%, which was able to meet the requirements of design and development.

Key words: surface acoustic wave; wavelet processor; computer modeling; computer simulation; performance parameter

0 引言

声表面小波(SAW)处理器不但能够实现对信号进行小波变换^[1-3], 而且具有 SAW 器件所独有的优点^[4-5], 因而被广泛引用于气体检测、水位测量、雷达目标识别等领域^[6-8]。为此, 研究人员设计了一系列性能优良的 SAW 小波处理器^[9-10], 但是这些器件的设计研制都缺少必要的计算机模拟与仿真手段, 无法在试制测试前预估所设计器件的性能参数。因此, 每个 SAW 小波处理器的设计研发都需要经过

理论计算、试制样品和样品测试, 仅能通过测试数据判断设计成功与否, 这直接导致整个研发工作面临研发周期长、研发经费过高的缺陷。为了尽可能地缩短研发周期, 降低研发经费, 本文介绍了一种对 SAW 小波处理器进行计算机模拟与仿真的数学模型, 并将其用于 SAW 小波处理器的计算机模拟与仿真, 以期在试制样品前对所设计的 SAW 小波处理器进行计算机模拟与仿真, 预估该样品的性能参数, 减少样品试制和测试的次数, 尽可能地减小样品

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61274078); 国家教育部博士点专项基金资助项目(20120075110006); 上海教育委员会研究与创新基金资助项目(13ZZ049)

作者简介: 刘守兵(1981-), 男, 河南范县人, 博士生, 主要从事声表面波小波处理器设计与应用研究。通信作者: 卢文科(1962-), 男, 陕西西安人, 教授, 主要从事声表面波器件设计与应用研究。E-mail: luwenke1149182@163.com。

试制失败的概率,缩短研发周期,降低研发经费。大量实验研究发现,采用本文所研究的计算机模拟与仿真模型对 SAW 小波处理器进行计算机模拟与仿真,模拟仿真结果与实测效果误差小于 1%,基本可以满足设计研发工作的需要。

1 SAW 小波处理器的原理与设计

Morlet 小波函数的表达式^[7]为

$$\phi_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{s})^2} e^{i2\pi f_0 t} = E_s(t) e^{i2\pi f_0 t} \quad (1)$$

式中: s 为尺度; f_0 为中心频率; $E_s(t)$ 为 Morlet 小波函数的包络函数。

理论研究表明,只要我们根据 $E_s(t)$ 设计 SAW 器件的输入换能器,而输出换能器只保留几个等重叠的指条对,该 SAW 器件的脉冲响应函数就等价于 Morlet 小波函数,从而可得到一个 SAW 小波处理器^[11]。

SAW 小波处理器主要有单电极换能器式 SAW 小波处理器和双电极换能器式 SAW 小波处理器两种。

对于单电极换能器式 SAW 小波处理器,我们可根据 $E_s(t)$, 通过下式计算出输入换能器各条声孔径的长度:

$$W_i = \begin{cases} NW_{\min} e^{-\frac{1}{2s^2}(\frac{n+1}{2}-i)^2} (\frac{1}{2f_0})^2 & 1 \leq i \leq \frac{n+1}{2} \\ NW_{\min} e^{-\frac{1}{2s^2}(i-\frac{n+1}{2})^2} (\frac{1}{2f_0})^2 & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_{\min} = 2\lambda$ 为最小声孔径, λ 为 SAW 的波长; N 为最大声孔径与最小声孔径的比值; $i = 1, \dots, n$ 为输入换能器的声孔径序列, n 为声孔径数。

输入换能器各声孔径的位置可表示为

$$x_i = \frac{(i-1)v}{2f_0} \quad (3)$$

式中 v 为 SAW 在自由表面和金属电极间交替传播的加权波速。

输出换能器的声孔径长度为

$$W_j = NW_{\min} \quad (4)$$

式中 $j = 1, \dots, n$ 为输出换能器的声孔径序列。

输出换能器各声孔径的位置可表示为

$$x_j = \frac{(j-1)v}{2f_0} \quad (5)$$

对于双电极换能器式 SAW 小波处理器,每条声孔径的长度与相应的单电极换能器 SAW 小波处

理器各声孔径的长度保持一致,而各指条宽度和各指条间的间隙为对应单电极换能器的 SAW 小波处理器的各指条宽度和各指条间的间隙的 $\frac{1}{2}$ 。因此,双电极换能器式 SAW 小波处理器的输入换能器各声孔径长度可计算为

$$W_i = \begin{cases} NW_{\min} e^{-\frac{1}{2s^2}(\frac{n+1}{4}-[\frac{i+1}{2}])^2} (\frac{1}{2f_0})^2 & 1 \leq i \leq \frac{n+1}{2} \\ NW_{\min} e^{-\frac{1}{2s^2}([\frac{i+1}{2}]-\frac{n+1}{4})^2} (\frac{1}{2f_0})^2 & \frac{n+1}{2} < i \leq n \end{cases} \quad (6)$$

式中 $[\cdot]$ 为取整运算。

输入换能器各声孔径的位置可表示为

$$x_i = \frac{(i-1)v}{4f_0} \quad (7)$$

输出换能器的声孔径长度可采用式(4)计算。

输出换能器各声孔径的位置可表示为

$$x_j = \frac{(j-1)v}{4f_0} \quad (8)$$

2 SAW 小波处理器的计算机模拟与仿真

2.1 SAW 小波处理器频域响应的计算机模拟与仿真

由第 1 节可知,我们一般常用单电极换能器式 SAW 小波处理器的结构示意图(见图 1)作为所有 SAW 小波处理器的结构示意图,以视简化。由图可知,SAW 小波处理器只有一个换能器采用变迹结构,而另一个换能器采用不变迹结构,因此,该 SAW 器件的 δ 模型频域响应可表示为

$$H(f) = H_1(f) \cdot H_2^*(f) \quad (9)$$

式中: $H_1(f)$ 为输入换能器的频域响应函数; $H_2^*(f)$ 为输出换能器的频域响应函数 $H_2(f)$ 的共轭函数。

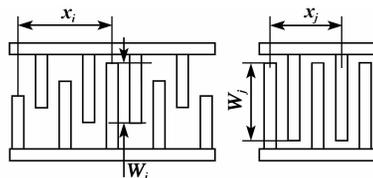


图 1 SAW 小波处理器结构示意图

任意一个叉指换能器的频域响应函数^[12]为

$$h(f) = \sum_{i=1}^n W_i F_i e^{-j\frac{2\pi f}{v} x_i} \quad (10)$$

式中 F_i 为对应指条所连接汇流条的极性。对于单电极换能器,则有

$$F_i = (-1)^i \tag{11}$$

对于双电极换能器,则有

$$F_i = (-1)^{\lfloor \frac{i-1}{2} \rfloor} \tag{12}$$

将由式(2)~(9)计算得到的 W_i, W_j 及其对应的位置 x_i, x_j 代入式(11),即可得到 $H_1(f)$ 和 $H_2(f)$,从而可根据式(10)得到整个 SAW 小波处理器的频域响应函数。

综上所述,SAW 小波处理器的频域响应函数主要由该器件的中心频率、尺度、最小声孔径(为了减少衍射对整个器件输出特性的影响,一般取该值为 2λ)、最大声孔径及声孔径的数目决定,通过改变上述参数可以调整所设计的 SAW 小波处理器的频域输出特性。另外,式(10)还可用于对所设计的 SAW 小波处理器频域输出特性进行计算机模拟与仿真。

2.2 SAW 小波处理器插入损耗的计算机模拟与仿真

SAW 小波处理器的插入损耗主要由输入换能器的插入损耗 (IL_1) 和输出换能器的插入损耗 (IL_2) 两部分组成,而信号在传输中的损耗基本可忽略。因此,整个 SAW 小波处理器的插入损耗为

$$IL = IL_1 + IL_2 \tag{13}$$

任意一个 SAW 换能器的插入损耗都可由下式计算^[13]:

$$IL_r = -10\log\left\{\frac{2G_a R_g}{(1 + G_a R_g)^2 + 4\pi^2 f_0^2 C_T^2 R_g^2}\right\} \tag{14}$$

式中: $R_g = 50 \Omega$ 为换能器的输入/输出电阻; $C_T = C_0 \sum W$ 为换能器的静态电容, $\sum W$ 为该换能器的声孔径的总长度, C_0 为单位长度下所选择基片材料的静态电容,对于单电极均匀叉指加权换能器,有

$C_0 = \epsilon_\infty$,对于双电极均匀叉指加权换能器,则有

$$C_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} \epsilon_\infty; G_a \text{ 为换能器的声辐射电导,则}$$

$$G_a = 8K^2 f_0 N_T C_T \tag{15}$$

式中: K^2 为所选择基片材料的机电耦合系数; N_T 为该换能器的指条数。

将由式(2)、(4)、(6)和式(8)计算得到的各个换能器的所有声孔径长度代入式(15),并将所求得的价值代入式(14)即可得到整个 SAW 小波处理器的插入损耗。

整个 SAW 小波处理器的插入损耗主要由该器件的中心频率、尺度、输入换能器最大声孔径长和最小声孔径长,输出换能器声孔径的条数和所选择基片材料的机电耦合系数与单位长度静态电容决定,恰当地选择上述参数,即可使所设计的 SAW 小波处理器的插入损耗达到理想状态;同理,上述理论也可用在样品试制前对所设计器件的插入损耗进行计算机模拟与仿真。

3 结果与讨论

为了验证本文设计的 SAW 小波处理器的计算机模拟与仿真模型,我们设计并制作了一个双电极换能器式 SAW 小波处理器,其设计参数如表 1 所示,理论性能参数、模拟计算性能参数和实测性能参数如表 2 所示。

表 1 SAW 小波处理器的设计参数

基片材料	$V_s /$ (m/s)	s	$f_0 /$ MHz	$K^2 /$ %	$\epsilon_\infty /$ (pF/cm)
X-112°Y LiTaO ₃	3 295	0.314 9	60	0.75	4.4

表 2 SAW 小波处理器小波处理器的性能参数

性能参数	插入损耗/dB	中心频率/MHz	带宽/MHz						
			-3 dB	-6 dB	-9 dB	-12 dB	-15 dB	-18 dB	-21 dB
理论	13.917 3	60.000	0.840 0	1.187 9	1.454 9	1.680 0	1.878 3	2.057 6	2.222 4
模拟	13.869 5	59.829	0.835 2	1.197 2	1.458 9	1.668 7	1.849 3	1.974 7	2.085 3
实测	13.878 5	59.822	0.834 2	1.207 1	1.467 0	1.669 1	1.830 3	1.973 6	2.074 2

由表 2 可知,该 SAW 小波处理器的计算机模拟和仿真结果与实测数据相比,其误差在 1% 以内。因此,该计算机模拟与仿真模型可用于 SAW 小波处理器的计算机模拟与仿真,在样品试制前对理论设计参数进行预估计算机模拟与仿真,待模拟与仿

真结果达到设计要求时再试制样品,避免多次制作本来就不符合设计要求的样品,以最大程度地缩短研发周期,节省研发经费。

另外,本文所研究的计算机模拟与仿真模型也可用于预判一些预选参数对性能参数的影响,绘制

该参数对某一性能参数的变化曲线,以指导一些预选参数的选择。本文以输出换能器声孔径的条数对插入损耗的影响为例,略作介绍。

改变输出换能器声孔径条数,保持其他参数不变,得到的曲线图如图2所示。由图可知,插入损耗随着声孔径条数的增加先减少、后增加,当条数等于24时,插入损耗最小。为了保证所有的SAW信号能够通过输出换能器转换为电信号,减小体声波对输出电信号的干扰,其声孔径的条数必须大于40条,而此时插入损耗随条数的增加而减少,因此,输出换能器的条数取40为宜。

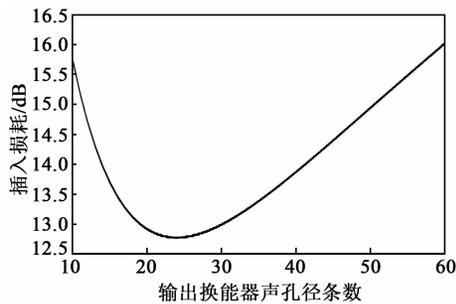


图2 输出换能器声孔径条数与插入损耗关系图

4 结束语

本文介绍了一种用于声表面波小波处理器计算机模拟与仿真的模型,并将其用于声表面波小波处理器的设计与研制。模拟仿真结果与样品实测结果对比发现,该模型的误差小于1%,足以达到实际声表面波小波处理器的设计与研制,可以最大程度地缩短研发周期,节省研发经费。

参考文献:

- [1] CHUI C K. An introduction to wavelets [M]. New York: Academic Press, 2014.
- [2] RAHBAR K, FAEZ K, ATTARAN-KAKHKI E. Robust estimation of wave-front aberration distribution function using invariant wavelet transform profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(3): 246-252.
- [3] CHEN X, LI X, WANG S, et al. Composite damage detection based on redundant second-generation wavelet transform and fractal dimension tomography algorithm of lamb wave [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5): 1354-1363.
- [4] 金剑,蒋欣,鄢秋娟.低损耗,高矩形度声表滤波器设计研究[J].压电与声光,2015,37(3):380-381.
JIN Jian, JIANG Xin, YAN Qiujuan. Investigation on low loss and high rectangle factor SAW filter based on hybrid structure [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(3): 380-381.
- [5] 李志鹏,李晓英,邵宪友.基于COMSOL声表面波扭矩传感器的有限元分析[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015(11):17-22.
LI Zhipeng, LI Xiaoying, SHAO Xianyou. Finite element analysis of torque sensor based on cosmol surface acoustic wave [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015(11): 17-22.
- [6] LU W, ZHU C, KUANG L, et al. Implementing single-scale wavelet transform processor with magnetostatic surface wave device [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1439-1444.
- [7] LU W, ZHU C, LIU Q, et al. Implementing wavelet inverse-transform processor with surface acoustic wave device [J]. Ultrasonics, 2013, 53(2): 447-454.
- [8] 刘良芳,张俊,刘晓琴,等. X454声表面波滤波器可靠性评估方法[J].四川兵工学报,2014(12):92-95.
- [9] LU W, ZHU C, ZHANG J, et al. Study of small size wavelet transform processor and wavelet inverse-transform processor using SAW devices [J]. Measurement, 2011, 44(5): 994-999.
- [10] LU W, ZHU C, KUANG L, et al. Solution to the influence of the MSSW propagating velocity on the bandwidths of the single-scale wavelet-transform processor using MSSW device [J]. Ultrasonics, 2012, 52(1): 145-150.
- [11] LU Wenke, ZHU Changchun. Solving three key problems of wavelet transform processor using surface acoustic wave devices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3801-3806.
- [12] ELKORDY M F, ELSHERBINI M M, GOMAA A M. A computer simulation for the response of an apodized SAW filter [J]. Journal of Electrical Engineering (JEE), 2012, 14(2): 213-219.
- [13] ELSHERBINI M M, ELKORDY M F, GOMAA A M. Towards a simple model for SAW delayline using CAD [J]. Am J Circuits Syst Signal Proc, 2015, 1(3): 86-92.