

声表面波式小波变换及重构器件的实现研究

卢文科^{1,2}, 朱长纯¹, 刘君华¹, 魏培永¹

(1. 西安交通大学电信学院真空微电子及微电子机械研究所, 陕西西安 710049; 2. 西安科技学院自动化系, 陕西西安 710054)

摘 要: 利用声表面波器件构造了小波变换及重构器件, 为小波变换及重构器件开辟了一种新的制造途径. 本文主要论述声表面波式小波变换及重构器件的工作原理, 并对信号源内阻对声表面波器件的影响和声电再生问题提出了解决方法.

关键词: 声表面波; 小波变换; 重构

中图分类号: O426.9; O29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1156-04

Study on Implementation of Surface-Acoustic-Wave Type of The Wavelet-Transformation and Reconstruction Element

LU Wen-ke^{1,2}, ZHU Chang-chun¹, LIU Jun-hua¹, WEI Pei-yong¹

(1. Institute of Vacuum Microelectronics & Microelectromechanical System, School of

Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. Department of Automation, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The surface-acoustic-wave elements are firstly used to make the wavelet-transformation and reconstruction element, and a new manufacturing way for the wavelet-transformation and reconstruction element is created. The principle of the wavelet-transformation and reconstruction element is elaborated, and the solutions for the following two problems are put forward: firstly, the effect of the inner impedance of the signal source on the surface-acoustic-wave element; and secondly, the problem of the sound-electricity-reclamation.

Key words: surface-acoustic-wave; wavelet-transformation; reconstruction

1 引言

小波变换是 80 年代后期发展起来的应用数学分支. 最近几年, 它已广泛应用于信号检测、特征提取、故障诊断与定位、数据压缩等方面, 是多学科关心的热点, 是信号处理的前沿课题. 我们知道研究稳定信号的理想工具是 Fourier 变换, 换句话说, 稳定信号可分解为正弦波的线性组合; 而研究非稳定信号的理想工具是小波变换, 其中瞬变事件不能事先知道在何时发生, 应与 Fourier 分析技术不同, 小波分析技术既适用于大多数具体的非稳定信号的分析, 也适用于具有分形结构的信号. 目前, 小波变换及重构工作大部分在计算机中进行, 并且计算工作量大. 现在的问题是我们能否把小波变换及重构制造成一种器件提供给使用者, 以减轻他们的计算工作量.

本文提出了一种利用声表面波器件来进行小波变换及重构的新概念. 其关键是如何来解决下面几个问题: (1) 信号源内阻对声表面波换能器的影响; (2) 声电再生问题; (3) 叉指电极的反射和三次行程反射问题; (4) 波形失真问题; (5) 体波的激发等问题.

2 二进小波变换及重构^[1]

二进小波可表示为

$$2^k \cdot (t) = 2^{-k/2} \left(\frac{t-z}{2^k} \right) \quad (1)$$

式(1)中小波函数 (t) , 其傅里叶变换为 (ω) , 若存在二常数 $0 < A < B$, 使得

$$A \leq \left| \int_{-\infty}^{\infty} (2^k \cdot (t)) e^{-j\omega t} dt \right| \leq B \quad (2)$$

此时式(1)二进小波才有实用意义, 即其逆变换存在, 这时称式(2)为二进小波的稳定条件; 若 $A = B$, 则称为最稳定条件.

若定义函数 $f \in L^2(R)$ 的二进小波变换为

$$\begin{aligned} WT_2^k(\omega) &= f(t) * 2^k \cdot (t) \\ &= 2^{-k/2} \int_R f(t) \left(\frac{t-z}{2^k} \right) dt \end{aligned} \quad (3)$$

二进小波变换的重建公式为

$$f(t) = \int_k \int_R WT_2^k(t) \tilde{2}^k \cdot (t) dt \quad (4)$$

其中, $\tilde{2}^k, (t)$ 为 $2^k, (t)$ 的对偶框架,其上、下框架界分别为 B^{-1}, A^{-1} .

同离散小波框架相似,当 $A = B$ 时,

$$\tilde{2}^k, (t) = \frac{1}{A} 2^k, (t)$$

当 $A \neq B$ 时, $2^k, (t)$ 的一阶近似为

$$\tilde{2}^k, (t) = \frac{2}{A+B} 2^k, (t) \quad (5)$$

当 B/A 接近 1 时,其重构误差小;当 $B/A \ll 1$ 时,采用高阶近似或递推的方法就可求得精确解,这里略谈.

注意:此上面定义的小波变换不同于内积形式,而是卷积形式,两种定义形式本质上没有区别,只是为了应用方便起见,当 $f(t) = f(-t)$ 时,两种定义是相同的.

3 二进小波变换及重构器件的工作原理^[1~5]

从式(3)、式(4)所示的小波变换及重构公式知道,它们是卷积形式,只要找到某器件(或网络)能进行卷积形运算,那么就可实现小波变换及重构.

我们从卷积分析网络响应的方 法中得到了小波变换及重构的启示.图 1 是一个网络, $F(s)$ 表示外加激励, $H(s)$ 表示网络函数,则网络响应为

$$R(s) = F(s) H(s)$$

求 $R(s)$ 的拉氏反变换,得到时域中的响应为

$$r(t) = L^{-1}[F(s) H(s)] = \int_0^t f(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

这里用了卷积定理,其中 $f(\tau)$ 为外加激励的时间函数,而 $h(t-\tau)$ 为网络的脉冲响应.这样,应用式(6)就可以直接求出时域中的网络响应;唯一需要知道的是网络的脉冲响应 $h(t)$,即时域中的网络函数.

从上面的分析可知道:求出时域中的网络响应,实际上是求卷积算法,这里只要寻找到某网络(或某器件)的网络函数 $h(t)$ 等于小波函数 $2^k, (t)$,则可实现小波变换及重构,其思路如图 2 所示.图 2 中只画出了三条支路,从理论上讲有无穷多条支路,但在实际应用时只取有限条支路,这里只取了三条支路.如果取支路数为有限值,会对小波变换的重构产生误差,其误差分析见本文第 5 条.

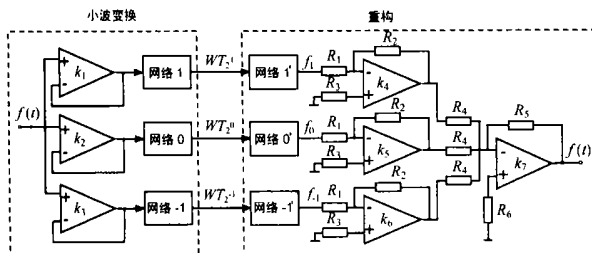


图 2 小波变换及重构构思图及原理图

从式(3)所示的小波变换公式知道, k 的取值范围是从 - 到 + 之间的所有整数,这里 k 取 - 1、0、1.

当 $k = - 1、0、1$ 时

$$WT_{2^{-1}}(f) = f(t) * 2^{-1}, (t)$$

$$= 2^{1/2} \int_R f(t) \left(\frac{-t}{2^{-1}}\right) dt$$

$$= \sqrt{2} \int_R f(t) [2(-t)] dt \quad (7)$$

$$WT_{2^0}(f) = f(t) * 2^0, (t) = 2^{-0/2} \int_R f(t) \left(\frac{-t}{2^0}\right) dt$$

$$= \int_R f(t) (-t) dt \quad (8)$$

$$WT_{2^1}(f) = f(t) * 2^1, (t) = 2^{-1/2} \int_R f(t) \left(\frac{-t}{2^1}\right) dt$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \int_R f(t) \left(\frac{-t}{2}\right) dt \quad (9)$$

只要分别令网络 - 1、0、1 的网络函数分别为

$$h_{-1}(t) = 2^{-1}, (t) = 2^{1/2} \left(\frac{-t}{2^{-1}}\right) = \sqrt{2} (-2t)$$

$$h_0(t) = 2^0, (t) = 2^{-0/2} \left(\frac{-t}{2^0}\right) = (-t)$$

$$h_1(t) = 2^1, (t) = 2^{-1/2} \left(\frac{-t}{2^1}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{-t}{2}\right)$$

则网络 - 1、0、1 就可实现式(7)、(8)、(9)所示的小波变换(即卷积).

将式(5)代入式(4)中得小波变换的重构公式为

$$f(t) = \frac{2}{A+B} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} WT_2^k(t) 2^k, d \quad (10)$$

式中的 k 取值范围是从 - 到 + 之间的所有整数,这里 k 取 - 1、0、1.

当 $k = - 1、0、1$ 时,式(10)分别为

$$f_{-1}(t) = \frac{2}{A+B} \int_R WT_{2^{-1}}(f) 2^{-1}, (t) d \quad (11)$$

$$f_0(t) = \frac{2}{A+B} \int_R WT_{2^0}(f) 2^0, (t) d \quad (12)$$

$$f_1(t) = \frac{2}{A+B} \int_R WT_{2^1}(f) 2^1, (t) d \quad (13)$$

只要分别令网络 - 1、0、1 的网络函数分别为

$$h_{-1}(t) = 2^{-1}, (t) = 2^{1/2} \left(\frac{-t}{2^{-1}}\right) = \sqrt{2} (-2t)$$

$$h_0(t) = 2^0, (t) = 2^{-0/2} \left(\frac{-t}{2^0}\right) = (-t)$$

$$h_1(t) = 2^1, (t) = 2^{-1/2} \left(\frac{-t}{2^1}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{-t}{2}\right)$$

则网络 - 1、0、1 就可实现式(11)、(12)、(13)所示的卷积(即重构).

将式(11)、(12)、(13)所示的 $f_{-1}(t)$ 、 $f_0(t)$ 、 $f_1(t)$ (即分别为网络 - 1、0、1 的输出)通过加法放大器后,其输出信号为

$$f(t) = f_{-1}(t) + f_0(t) + f_1(t)$$

$$= \frac{2}{A+B} \sum_{k=-1}^1 WT_2^k(f) 2^k, (t) d \quad (14)$$

这时,取式(14)中 $2/(A+B)$ 为加法放大器的放大倍数.

通过大量的分析和研究,发现声表面波换能器的网络函数 $h(t)$ 很容易制作成某些小波函数 $2^k, (t)$,如果用 6 个声表面波换能器分别代替图 2 中所示的 6 个网络(即网络 - 1、0、1、

-1、0、1)后,可实现式(3)、(4)所示的小波变换及重构的运算.因此,怎样设计性能良好的声表面波换能器是小波变换及重构的关键,下面重点论述声表面波换能器的设计.

4 声表面波换能器的设计^[3]

4.1 小波式叉指换能器脉冲响应模型的建立^[3]

知道叉指换能器的脉冲响应的包络与叉指换能器指条重叠的包络一一对应,并且知道指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器的脉冲响应模型为^[3]

$$h(t) = Ae^{j2f_0t} \quad (15)$$

由于指条相等重叠,式(15)中的 A 为常数;如果指条不相等重叠,那么 A 不为常数, A 为一个随时间变化的函数,即 $A(t)$,这时 $A(t)$ 变化决定着叉指换能器指条重叠的包络.

如果 $A(t)$ 为小波函数的包络,叉指换能器的脉冲响应 $h(t)$ 应为小波函数.

这里取 $A(t) = e^{-t^2/2}$
则换能器的脉冲响应为

$$h(t) = A(t)e^{j2f_0t} = e^{-t^2/2}e^{j2f_0t} \quad (16)$$

式中, $e^{-t^2/2}e^{j2f_0t}$ 是 Morlet 小波,这样就建造了一个小波式叉指换能器.

如果图 2 中网络 -1、0、1、用发射叉指换能器代替,而网络 -1、0、1 用接收叉指换能器代替,网络 -1、-1、0、0、1、1 的脉冲响应则分别为

$$h_{-1}(t) = h_{-1}(t) = 2^{-1}(t) = \sqrt{2}e^{-2t^2}e^{j2f_0t} \quad (17)$$

式中 $2f_0$ —— 换能器 -1 和 -1 的中心频率; $\sqrt{2}e^{-2t^2}$ 是 $h_{-1}(t)$ 、 $h_{-1}(t)$ 、 $2^{-1}(t)$ 的包络.

$$h_0(t) = h_0(t) = 2^0(t) = e^{-t^2/2}e^{j2f_0t} \quad (18)$$

式中 f_0 —— 换能器 0 和 0 的中心频率; $e^{-t^2/2}$ 是 $h_0(t)$ 、 $h_0(t)$ 、 $2^0(t)$ 的包络.

$$h_1(t) = h_1(t) = 2^1(t) = (1/\sqrt{2})e^{-t^2/8}e^{j2f_0t} \quad (19)$$

式中 $f_0/2$ —— 换能器 1 和 1 的中心频率; $(1/\sqrt{2})e^{-t^2/8}$ 是 $h_1(t)$ 、 $h_1(t)$ 、 $2^1(t)$ 的包络.

式(17)、(18)、(19)表示图 2 中 6 个网络(即 6 个小波式叉指换能器)的脉冲响应函数模型,6 个小波式叉指换能器的指条重叠的包络与式(17)、(18)、(19)所示脉冲响应函数的包络一一对应.

这里以图 2 中的网络 0 为例来说明小波式叉指换能器的设计.图 3 是网络 0(即小波式叉指发射换能器 0)的示意图,从此图可以看出:小波式叉指发射换能器 0 的指条重叠包络与式(18)所示的脉冲响应函数 $h_0(t)$ (即 $2^0(t)$)的包络一一对应,即图 3 所示的小波式叉指发射换能器 0 的指条重叠包络按照 $2^0(t)$ 的包络(即 $e^{-t^2/2}$)来设计.其中心频率为

$$f_0 = \frac{v_s}{2a+2b} = \frac{v_s}{4a} \quad (20)$$

式中 v_s —— 声表面波的传播速度; a —— 指宽; b —— 指间,通常取 $a = b$.

从式(20)可知道:中心频率 f_0 与声表面波的传播速度 v_s

及换能器的几何参数 a 、 b 有关,所以对于制作好的声表面波换能器来说, f_0 是一个固定不变的常数.

同理用上述的方法可以对图 2 中的网络 1、1、0、-1、-1(即小波式叉指换能器 1、1、0、-1、-1)进行设计,这里略谈.

4.2 小波式叉指换能器在设计中存在的问题及其解决方法^[3]

4.2.1 信号源内阻对小波式叉指换能器的影响^[3]

图 4 是一个小波式发射叉指换能器的示意图. V_s 为小波式发射叉指换能器的输入信号源的电压; $R_s = 1/G_s$ 为输入信号 V_s 的内阻; C_0 为换能器的静电容; G_a 和 B_a 分别换能器的声辐射电导和电纳.

设 $V_1(\omega)$ 为换能器的输入端电压; $V_2(\omega)$ 为换能器的输出电压; $H_1(\omega)$ 为换能器脉冲响应的傅里叶变换,则有

$$V_2(\omega) = H_1(\omega)V_1(\omega) \quad (21)$$

$$V_2(\omega) = \frac{H_1(\omega)V_s(\omega)}{1 + jC_0R_s + jB_a(\omega)R_s + G_a(\omega)R_s}$$

式(21)说明此换能器的频率响应 $V_2(\omega)$ 不仅与 $H_1(\omega)$ 、 $V_s(\omega)$ 有关,而且与 R_s 、 B_a 、 G_a 有关.显然当 R_s 很小, R_s 、 B_a 、 G_a 对换能器的影响小;当 $R_s = 0$ 时, R_s 、 B_a 、 G_a 对换能器不产生影响.

解决此问题的方法是在该换能器的输入端加入一个由放大器组成的电压跟随器,如图 5 所示.从图 5 知道电压跟随器的输出电压也为 V_s ,并且电压跟随器的输出电阻为

$$r_{of} = r_o / (1 + A_v) \quad (22)$$

式中 r_o —— 放大器本身的输出电阻,一般 r_o 很小; A_v —— 放大器的开环电压增益,一般 A_v 很大(如 $A_v = 10^6$).

根据式(22) r_o 很小, A_v 很大,这里可认为 $r_{of} \approx 0$,从而基本上消除了信号源内阻对换能器的影响.

4.2.2 声电再生问题^[3] 叉指换能器的声电再生效果是暂时地延迟或存储一些输入能量,从而使叉指换能器的性能变坏,并引起叉指换能器对入射声波反射.

声电再生的强弱与换能器基片材料的机电耦合系数 k^2 有关,因为 k^2 越大,声电耦合越强,叉指电极和通过它的声波相互作用也越大.另外声电再生还与换能器的电负载阻抗有关.负载阻抗越大,声电再生越强;负载阻抗越小,声电再生越弱.因为低的负载阻抗使声波通过叉指时在其上产生的再生电压接近短路,因此降低换能器的电负载阻抗和采用机电耦合系数 k^2 低的基片材料都可以使声电再效应减弱.

下面介绍一种降低小波式接收叉指换能器的电负载阻抗的方法,如图 6 所示.小波式接收叉指换能器的电负载 R_L 就是反相放大器的输入阻抗 r_{if} ,其阻抗为

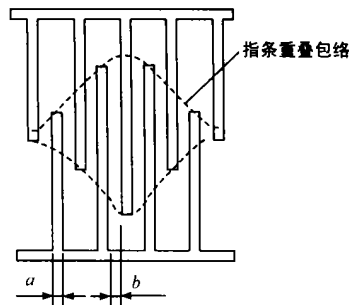


图 3 小波式叉指换能器 0 的示意图

$$r_{if} = R_1 + (R_2 / (1 - A_v)) \quad (23)$$

$$r_{if} = R_L \quad R_1 \quad (24)$$

式(23)中, A_v 为放大器的开环电压增益, 一般 A_v 很大 ($A_v = 10^6$), 所以 $R_2 / (1 + A_v)$ 很小, 认为 $R_2 / (1 + A_v) \approx 0$, 因此, 反相放大器的输入阻抗 (即小波式接收叉指换能器的负载) 为

由式(24)得到: 只要选取较小的 R_1 可以降低小波式接收叉指换能器的负载阻抗, 就能减弱声电再生的影响。

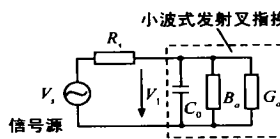


图 4 小波式发射叉指换能器与信号连接示意图

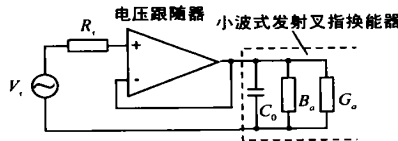


图 5 消除信号源内阻对小波式发射叉指换能器的影响

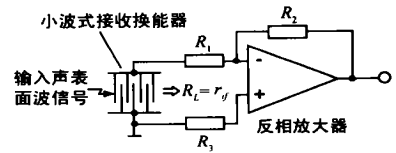


图 6 小波式接收换能器的电负载示意图

5 误差的分析

小波变换及其重构器件的误差主要包括两个方面: 一是小波变换及其重构算法本身产生的误差; 另一是声表面波换能器产生的误差。

5.1 小波变换及其重构算法本身产生的误差^[2]

从式(3)、(4)所示的小波变换及重构公式知道 k 的取值范围是从 $-$ 到 $+$ 之间的所有整数, 但我们在小波变换及重构时 k 只取了 $-1, 0, 1$, 所以给小波变换及重构产生了误差, 其误差的计算方法如下:

$$\tilde{2}^k = \frac{2}{A+B} 2^k \quad (25)$$

所以误差范数为

$$\left\| f - \sum_{k=0}^N \frac{1}{r} WT_2^k(\tilde{2}^k, (t)) d \right\| \leq \left(\frac{r}{2+r} \right)^{N+1} f \quad (26)$$

式中 $r = (B/A) - 1; N + 1 = 3$.

从式(26)知道: 只要选取 A 和 B 越接近, 则误差越小。

5.2 声表面波换能器产生的误差^[3]

在声表面波式小波变换及重构器件中所产生的误差主要是由声表面波换能器本身所产生的误差。声表面波换能器产生误差的原因如下: (1) 信号源内阻对声表面波换能器的影响; (2) 声电再生问题; (3) 叉指电极的反射和三次行程反射问题; (4) 波形失真问题; (5) 体波的激发问题。前两个问题已经提出了解决的方法, 后三个问题的解决方法请见参考文献 3, 虽然如此, 本文还不能完全补偿换能器产生的误差。

6 应用举例

该小波变换及重构器件已应用于可燃气体探测器和大电流测试仪中, 如图 7 所示。从图 7 知道可燃气体探测器或大电流测试仪的变换器部分放在现场, 其输出信号要通过较长的传输线传送到检测室, 在传送的过程中会受到干扰信号的影响, 这里可利用小波变换及重构器件来减弱干扰信号, 如图 8 所示。

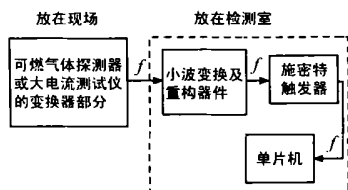


图 7 可燃气体探测器或大电流测试仪原理图

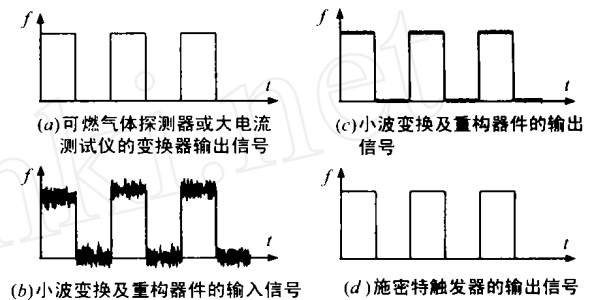


图 8 波形图

7 结论

本文首次利用声表面波器件来构造小波变换及重构器件, 为小波变换及重构器件开辟了一种新的制造途径。本文主要论述声表面波式小波变换及重构器件的工作原理, 并对信号源内阻对声表面波器件的影响和声电再生问题提出了解决的方法。

参考文献:

- [1] 彭玉华. 小波变换及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 33 - 34.
- [2] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000, 7: 48.
- [3] 武以立. 声表面波原理及在电子技术中的应用 [M]. 长沙: 国防工业出版社, 1983: 8.
- [4] 关连法. 声表面波器件及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1983: 12.
- [5] 魏培永, 朱长纯, 刘君华. 用声表面波器件实现小波变换的方法 [J]. 西安交通大学学报. 2001, 35(44): 394 - 397.

作者简介:



卢文科 男, 1962 年出生, 籍贯: 陕西, 副教授, 现在西安交通大学攻读博士学位。主要从事电子科学技术、仪器仪表、传感器技术及小波变换的研究, 已在英国及国内学术性刊物上共发表论文 70 余篇, 其中十余篇获奖, 著书 4 本, 完成了以国家“六五”计划项目“MGS2 数字钳形直流电流表”为代表的研究项目 15 项目, 近期从事国家自然科学基金项目的研究。