

声表面波式小波变换器件的三次行程反射信号的研究

卢文科¹, 朱长纯², 刘清洪², 刘君华², 方建安¹, 文常保²

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049)

摘要: 本文提出了用同相位法减小三次行程反射信号的方法. 当信号频率与叉指换能器中心频率相等, 并且主信号的相位等于三次行程反射信号的相位时, 从可达到减小三次行程反射信号的影响. 并且探讨了双接收叉指换能器并联法, 要求双接收叉指换能器要完全对称, 否则声表面波式小波变换器件频率特性曲线不光滑.

关键词: 声表面波; 小波变换器件; 三次行程反射信号; 叉指换能器

中图分类号: O426 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2008)02-0346-04

Study of Triple Transition Reflection Signal for Wavelet Transform Element of SAW Type

LU Wenke¹, ZHU Changchun², LIU Qinghong², LIU Junhua², FANG Jianan¹, WEN Changbao²

(1. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: The method of reducing triple transition reflection signal with the same phase method is proposed in the paper. When the frequency of the signal equals the center frequency of interdigital transducer (IDT), the phase of the main signal equals the phase of triple transition reflection signal, so that the triple transition reflection signal is reduced. And the parallel method of the double receiving IDTs is studied. The double receiving IDTs are absolutely symmetrical, otherwise the frequency characteristic curve of wavelet transform element of SAW type is not smooth.

Key words: surface acoustic wave (SAW); wavelet transform element; triple transition reflection signal; interdigital transducer (IDT)

1 引言

现在小波分析的算法复杂, 其算法运算目前绝大部分是在计算机中完成的, 因而编程工作量大; 也有一些人正在研究利用大规模集成电路进行小波变换计算, 但还不成熟. 所以科学家和工程技术人员正在努力寻找一种简便的方法进行小波变换的计算, 企图避免复杂的、繁琐的数学计算. 当声表面波器件的指条重叠包络按照小波函数包络设计时, 得到声表面波器件的脉冲响应函数等于小波函数, 从而制造出了声表面波式小波变换器件及其重构器件, 为小波变换器件及其重构器件开辟了一种新的制造途径, 避免了小波变换及其重构中的复杂算法运算.

用声表面波器件实现小波变换的方法是我们课题组首次提出来的^[2-9]. 本文用同相位法减小三次行程反射信号的方法, 同时探讨了双接收叉指换能器并联法, 提出了双接收叉指换能器要完全对称, 否则其频率特性曲线不光滑.

2 用声表面波器件实现小波变换的理论和声表面波式小波变换器件的工作原理

2.1 二进小波变换及重构^[1]

二进小波可表示为

$$\Psi_{2^k, \tau}(t) = 2^{-k/2} \Psi\left(\frac{t-\tau}{2}\right) \quad (1)$$

如果小波函数为 $\phi(t)$, 其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$, 并且存在二常数 $0 \leq A \leq B < \infty$, 使得

$$A \leq \sum_{k \in \mathbb{Z}} |\Psi(2^k \omega)| \leq B \quad (2)$$

如果式(2)成立时, 式(1)的二进小波才有实用意义, 并且其逆变换存在, 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 $f \in L^2(\mathbb{R})$, 则二进小波变换为

$$\begin{aligned} WT_{2^k}(\tau) &= f(t) \otimes \Psi_{2^k, \tau}(t) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi_{2^k, \tau}(t) dt \\ &= 2^{-k/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \Psi\left(\frac{\tau-t}{2}\right) dt \end{aligned} \quad (3)$$

二进小波变换的重建公式为

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \int_R WT_2^k(\tau) \overline{\Psi}_{2^k, \tau}(t) d\tau \quad (4)$$

其中, $\overline{\Psi}_{2^k, \tau}(t)$ 为 $\Psi_{2^k, \tau}(t)$ 的对偶框架.

同离散小波框架相似, 当 $A = B$ 时,

$$\overline{\Psi}_{2^k, \tau}(t) = \frac{1}{A} \Psi_{2^k, \tau}(t)$$

当 $A \neq B$ 时, $\Psi_{2^k, \tau}(t)$ 的一阶近似为

$$\overline{\Psi}_{2^k, \tau}(t) = \frac{2}{A+B} \Psi_{2^k, \tau}(t)$$

当 B/A 接近 1 时, 其重构误差小.

2.2 声表面波式小波变换器件的理论及其工作原理^[2-5]

式(3)中所示的二进小波变换是 $f(t)$ 和 $\Psi_{2^k}(t)$ 的卷积, 即 $f(t)$ 和 $2^{-k/2} \Psi\left(\frac{t}{2^k}\right)$ 的卷积, k 是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 之间的整数, 这里 k 只取 $-1, -2, -3$.

当 $k = -1, -2, -3$ 时, 式(3)分别为

$$\begin{aligned} WT_{2^{-1}}(\tau) &= f(t) \otimes \Psi_{2^{-1}}(t) = 2^{1/2} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{\tau-t}{2^{-1}}\right) dt \\ &= \sqrt{2} \int_R f(t) \Psi[2(\tau-t)] dt \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} WT_{2^{-2}}(\tau) &= f(t) \otimes \Psi_{2^{-2}}(t) = 2 \int_R f(t) \Psi\left(\frac{\tau-t}{2^{-2}}\right) dt \\ &= 2 \int_R f(t) \Psi[4(\tau-t)] dt \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} WT_{2^{-3}}(\tau) &= f(t) \otimes \Psi_{2^{-3}}(t) = 2\sqrt{2} \int_R f(t) \Psi\left(\frac{\tau-t}{2^{-3}}\right) dt \\ &= 2\sqrt{2} \int_R f(t) \Psi[8(\tau-t)] dt \end{aligned} \quad (7)$$

从式(5)~(7)所表示的小波变换知道它们分别是 $f(t)$ 与 $\Psi_{2^{-1}}(t)$ 、 $f(t)$ 与 $\Psi_{2^{-2}}(t)$ 、 $f(t)$ 与 $\Psi_{2^{-3}}(t)$ 的卷积. 通过大量的分析研究, 发现如果声表面波器件脉冲响应函数 $h(t)$ 制作成某些小波函数 $\Psi(t)$, 就可以实现小波变换, 如图 1 所示.

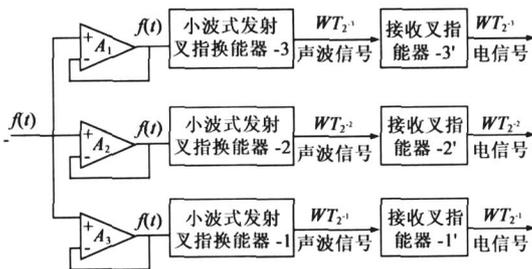


图 1 小波变换器

在图 1 中, 如果小波式发射叉指换能器 $-1, -2, -3$ 的脉冲响应函数 $h_{-1}(t), h_{-2}(t), h_{-3}(t)$ 分别等于 $\Psi_{2^{-1}}(t), \Psi_{2^{-2}}(t), \Psi_{2^{-3}}(t)$, 则小波式发射叉指换能器 $-1, -2, -3$ 可分别实现式(5)~(7)所示的小波变换 (即卷积). 小波式发射叉指换能器 $-1, -2, -3$ 输出的

小波变换 $WT_{2^{-1}}(\tau), WT_{2^{-2}}(\tau), WT_{2^{-3}}(\tau)$ 均为声波信号. 当这些声波形式的小波变换信号分别通过接收换能器 $-1', -2', -3'$ 时, 它们被转换为电信号形式的小波变换 $WT_{2^{-1}}(\tau), WT_{2^{-2}}(\tau), WT_{2^{-3}}(\tau)$. 只要图 1 中的小波式发射叉指换能器 $-1, -2, -3$ 的指条重叠包络分别按照小波函数 $\Psi_{2^{-1}}(\tau), \Psi_{2^{-2}}(\tau), \Psi_{2^{-3}}(\tau)$ 的包络设计时, 就可实现小波式发射叉指换能器 $-1, -2, -3$ 的脉冲响应函数 $h_{-1}(t), h_{-2}(t), h_{-3}(t)$ 分别等于 $\Psi_{2^{-1}}(t), \Psi_{2^{-2}}(t), \Psi_{2^{-3}}(t)$. 小波式发射叉指换能器件 $-1, -2, -3$ 和接收叉指换能器 $-1', -2', -3'$ 的设计^[2-4].

3 三次行程反射信号对叉指换能器的影响^[10]

发射换能器激发的声波到达接收叉指换能器时, 其中一部分到达接收叉指换能器转换成电信号输出, 该信号被称为主信号; 另一部分被反射到达发射叉指换能器, 然后再被反射到达接收叉指换能器, 并且从接收叉指换能器输出, 该信号比主信号多走两倍路程 (即它总共在基片上来回走了三次), 所以该信号被称为三次行程反射信号, 如图 2 所示.

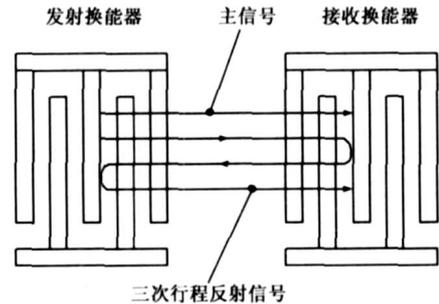


图 2 三次行程反射信号与主信号示意图

三次行程反射信号产生一个相位延迟, 它与主信号叠加, 使滤波器带通内产生波纹. 所以说三次行程信号是一个干扰信号.

减小三次行程反射信号的方法有三种: (1) 是同相位法, (2) 是双接收叉指换能器并联法; (3) 是涂吸声材料法. 本文只论述前两种方法.

3.1 同相位法

该方法只适应于信号频率与换能器中心频率相等的情况, 如图 3 所示.

当信号频率 f 等于换能器的中心频率 f_0 时, 得到

$$f = f_0 = \frac{V_s}{\lambda} = \frac{1}{T} \quad (8)$$

式中: V_s 为声表面波的传播速度; λ 为声表面波的波长; T 为叉指换能器的周期或信号周期.

从图 3 知道主信号的传播时间为

$$t = t_0 + t_1 + t_2 \quad (9)$$

而三次行程反射信号的传播时间为

$$t_3 = 3t = 3(t_0 + t_1 + T_2) = 2(t_0 + t_1 + t_2) + t_0 + t_1 + t_2 = kT + t_0 + t_1 + t_2 \quad (10)$$

式中: k 为正整数; T 为叉指换能器的周期或信号周期.

从式(10)知道只要 $kT = 2(t_0 + t_1 + t_2)$ 成立, 那么主信号的相位就等于三次行程的相位, 可达到减小三次行程反射信号的影响.

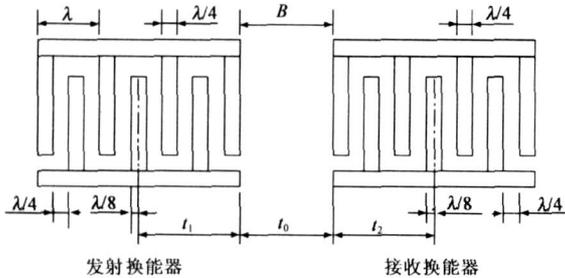


图 3 用同相位法减小三次行程反射信号示意图

从图 3 知道

$$t_1 = \left(n \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{8} \right) / V_s \quad (11)$$

$$t_0 = \frac{B}{V_s} \quad (12)$$

$$t_2 = \left(n \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{8} \right) / V_s \quad (13)$$

式(11)、式(12)和式(13)中: B 为发射和接收叉指换能器之间的距离; n 为叉指电极数目和指间数目之和.

将式(11)、式(12)和式(13)代入 $kT = 2(t_0 + t_1 + T_2)$ 得

$$kT = \frac{4 \left(n \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{8} \right)}{V_s} + \frac{2B}{V_s}$$

即:

$$B = \frac{1}{2} kV_s T - \frac{1}{2} \lambda \left(n + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \lambda \left(k - n - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

式中: k, n 为正整数; $T = \frac{\lambda}{V_s}$, 这里 T 是叉指换能器的周期或信号周期.

只要式(14)成立, 就可以达到减小三次行程反射信号的影响.

这里请注意: 当信号频率确定后, 根据信号频率来设计换能器的中心频率(即让换能器的中心频率等于信号频率).

3.2 双接收叉指换能器并联法

当两个接收叉指换能器是完全对称, 并且它们是并联的(如图4所示). 从两个接收叉指换能器反射回来的声信号在发射叉指换能器吸收(这是因为发射换能器是一个理想的吸收体), 所以输出端不再出现三次行程反射信号^[10]. 图 1 中的接收换能器 - 1' 是两个叉指换能器的并联. 这时对图 1 所示的小波式发射叉指换能器 - 1 和接收叉指换能器 - 1' 用 HP8712ET 网路分析仪进行测试, 其频率特性曲线如图 5 所示的上部曲线(其下部曲线为上部曲线的局部放大), 其上部曲线的纵坐标为 10.0dB/格, 下部曲线的纵坐标为 1.0dB/格. 从图 5 可以看出频率特性曲线不光滑, 其原因是两个接收叉指换能器没有做到完全对称. 在实际情况下很难做到两个接收叉指换能器完全对称, 但尽量做到完全对称.

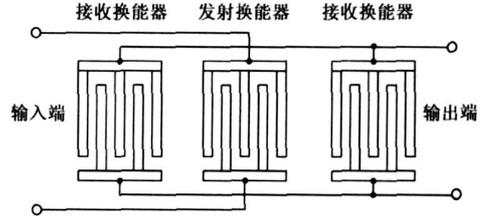


图 4 双接收叉指换能器并联法减小三次行程反射信号示意图

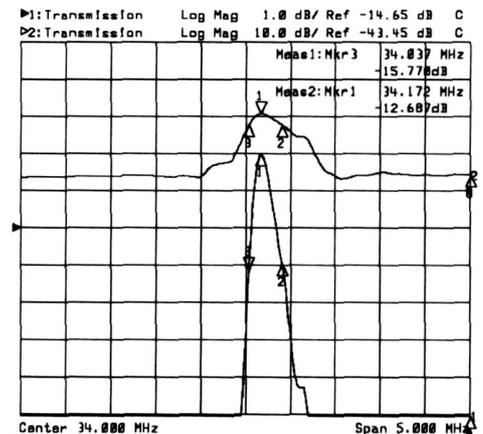


图 5 小波式发射叉指换能器 -1 和接收叉指换能器 -1' 的频率特性曲线(在 X112°-Y-LiTaO₃ 基片上制作, 这里的接收叉指换能器是两个接收叉指换能器的并联)

4 结论

当信号频率与换能器中心频率相等, 并且主信号的相位等于三次行程反射信号的相位时, 从而可达到减小三次行程反射信号的影响. 并且探讨了双接收叉指换能器并联法, 要求双接收叉指换能器要完全对称, 否则声表面波式小波变换器件频率特性曲线不光滑.

参考文献:

- [1] 彭玉华. 小波变及工程应用[M]. 北京: 科学出版, 1999, 9: 33- 34.
- [2] LU Wenke, ZHU Changchun. Implementing wavelet transform with SAW elements[J]. Science in China(Series E), 2003, 46 (6): 627- 638.
- [3] LU Wenke, ZHU Changchun. Study of new wavelet transform element of SAW type[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (6): 599- 602.
- [4] 卢文科, 朱长纯, 等. 声表面波式小变换及重构器件的实

现研究[J]. 电子学报, 2002, 30(8): 1156- 1159.

LU Wenke, ZHU Changchun, et al. Study on implementation of surface wave type of the wavelet transformation and reconstruction element[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(8): 1156- 1159. (in Chinese)

- [5] 卢文科, 朱长纯, 刘君华, 等. 新型声表面波式小波变换器件插入损耗的研究[J]. 电子学报, 2006, 34(2): 371- 373.

LU Wenke, ZHU Changchun, et al. Study of insertion loss for wavelet transform element of new SAW type[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 371- 373. (in Chinese)

- [6] 卢文科. 用声表面波器件实现小波变换的研究[D]. 西安

交通大学博士学位论文. 2004. 4.

- [7] 魏培永, 朱长纯, 刘君华, 等. 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(4): 394- 397.

- [8] WEI Pei yong, ZHU Chang chun, LIU Jur hua. Realization of wavelet transform using SAW devices[J]. Semiconductor photonics and technology, 2001, 7(2): 104- 107.

- [9] 魏培永, 朱长纯, 刘君华. 用声表面波器件实现小波变换[J]. 压电与声光, 2001, 23(3): 173- 176.

- [10] 武以立. 声表面波原理及在电子技术中的应用[M]. 国防工业出版社, 1983, 8: 244.

作者简介:



卢文科 男, 生于 1962 年 5 月, 教授, 博士生导师, 现在东华大学工作; 获西安交通大学电子科学与技术专业博士学位. 主要从事电子科学与技术、小波变换技术、仪器科学与技术、传感器等方面的研究工作.

E-mail: luwenke3@163.com



朱长纯 男, 1962 年毕业吉林大学物理系, 现任西安交通大学教授、博士生导师, 现任西安交通大学真空微电子与微电子机械研究所所长, 中国光学学会光电技术专业委员会委员, 中国电子学会真空电子学分会理事, 中国场发射与真空微电子学专业委员会主任. 研究方向为真空微电子与微电子机械、纳米材料与器件、光电子技术、传感器技术、半导体薄膜及小波变换技术.