

# 声表面波式小波变换处理器衍射问题的研究

高丽丽, 卢文科

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

**摘要:**传统声表面波式小波变换处理器存在衍射问题。该文通过改变叉指换能器结构的方法解决衍射问题,即输入换能器存在衍射问题区域的指条采用宽度加权;不存在衍射问题的区域结构不变。推导了实现新结构无衍射问题的声表面波式小波变换处理器的函数关系。在压电基片材料  $X-112^\circ\text{YLiTaO}_3$  上设计和制作了尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  两种声表面波式小波变换处理器样品。通过数值计算和测量,论证了新结构声表面波式小波变换处理器不存在衍射问题。

**关键词:**声表面波;小波变换处理器;衍射;换能器;包络幅值;指条宽度

**中图分类号:**TN65;TP212 **文献标识码:**A

## Research on Diffraction of Wavelet Transform Processor Using Surface Acoustic Wave Device

GAO Lili, LU Wenke

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

**Abstract:** There exists a diffraction problem in the conventional wavelet transform processor using surface acoustic wave (SAW) device. The electrode-width-weighted (EWW) way is used in diffraction district for input interdigital transducer (IDT) to solve this problem in this paper while the structure of non-diffraction district is not changed. The functional relationship of the new structure wavelet transform processor using SAW device without diffraction is derived. The new wavelet transform processors using SAW devices for scales  $2^{-1}$  and  $2^{-2}$  are fabricated on  $X-112^\circ\text{YLiTaO}_3$  substrate. By calculation and measurement, it is proved that the novel structure wavelet transform processor using SAW device do not have diffraction.

**Key words:** SAW; wavelet transform processor; diffraction; IDT; envelope amplitudes; electrode widths

### 0 引言

小波变换是从事石油信号处理的法国工程师 J. Morlet 于 1974 年首先提出的<sup>[1-2]</sup>。小波变换是一个时间和频率的局部变换,具有叠加性、时移不变性、伸缩共变性、自相似性、冗余性的性质。小波分析特别适用于在实际应用中占绝大多数的非稳定信号的分析与处理,同时也用于具有分形结构的信号。小波分析在数学、信号分析、图象处理、医学成像与诊断、故障诊断等各学科、各领域都取得了重要的成果。为此,科学家们使用各种方法实现小波变换,包括硬件实现方法和软件实现方法。硬件实现方法优于软件方法。小波变换的硬件实现方法分为数字方

法和模拟方法,数字法又可分为现场可编程门阵列 (FGPA)<sup>[3-4]</sup>、数字信号处理 (DSP)<sup>[5-6]</sup>、超大规模集成电路 (VLSI)<sup>[7-8]</sup> 等方法,模拟法有光学器件、静磁波器件、声表面波 (SAW) 器件等不同硬件形式。

SAW 器件属于中频信号处理器件<sup>[9-12]</sup>,具有信号处理速度快,设计简便,价格较低,功耗小等优点,属于无源器件。该方法在用模拟器件实现小波变换领域取得了积极性的进展。SAW 式小波变换处理器的设计和制作工艺比 VLSI 式小波变换处理器和 DSP 式小波变换处理器简单。

传统 SAW 式小波变换处理器输入换能器的指条重叠包络是按照小波函数的包络设计,即叉指换

收稿日期:2016-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61274078);高等学校博士创新基金资助项目(CUSF-DH-D-2015061)

作者简介:高丽丽(1979-),女,河北唐山人,博士生,主要从事声表面波器件、小波变换处理器、传感器和仪器仪表的研究。通信作者:卢文科,教授,主要从事声表面波器件、小波变换处理器、传感器和仪器仪表的研究。E-mail:lwkjzd@sina.com。

能器(IDT)的指条长度与小波函数包络幅值成正比,称为指条包络加权型 SAW 式小波变换处理器。研究发现该类型处理器声孔径宽度  $H$  较小时存在衍射问题。

本文选用改变 IDT 结构的方法解决传统 SAW 式小波变换处理器存在衍射的问题。新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器设计时采用宽、均匀声孔径,即输入换能器存在衍射问题区域的指条采用宽度加权;不存在衍射问题的区域结构不变。输出换能器为指条相等重叠、均匀周期的 IDT。

### 1 衍射问题

指条包络加权型 SAW 式小波变换处理器输入换能器的结构,如图 1 所示。这种类型的 SAW 处理器实现了小波变换与 SAW 技术的结合,推动了 SAW 器件发展,并且在各领域得到了广泛应用。但在试验及实际应用中,发现指条包络加权型 SAW 式小波变换处理器存在衍射问题,即  $H$  较小时,如图 1 中的  $N_1, N_2$  区,该类型处理器存在衍射问题。 $M$  区为该处理器不存在衍射问题的区域,即  $H$  足够大。

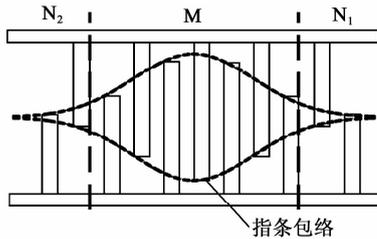


图 1 指条包络加权 SAW 式小波变换处理器输入换能器的结构示意图

经典光学的衍射方程为<sup>[13]</sup>

$$F = \frac{\lambda D}{H^2} \quad (1)$$

式中: $F$  为一个无量纲参数(菲涅耳); $D$  为从输入换能器声孔径到接收点的距离。 $F > 1$  时,对应的是夫琅和费或远场区域,如图 2 所示。 $F < 1$  时,对应的是菲涅耳或近场区域,SAW 的辐射图形基本上是平行声表面波束的形式,如图 3 所示。式(1)的不同形式,如表 1 所示。

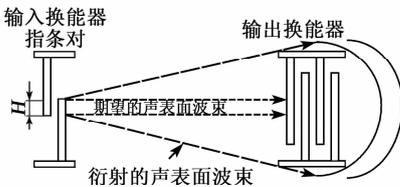


图 2 输入换能器指条对产生衍射的声表面波束

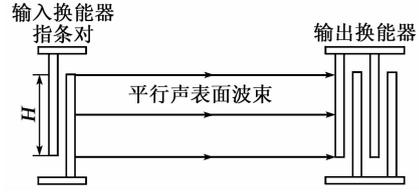


图 3 近场区的输入换能器和输出换能器

表 1 式(1)的不同形式

$F$	式(1)转化为	区域	波束形式	$H$	是否存在衍射	图形
$F > 1$	$\frac{H^2}{\lambda} < D$	夫琅和费(远场)	平行声表面波束和衍射波束	小	存在	图 2
$F < 1$	$\frac{H^2}{\lambda} > D$	菲涅耳(近场)	平行声表面波束	足够大	不存在	图 3

减小或解决衍射问题有许多方法:

- 1) 选择晶体最小衍射的切割取向。
- 2) 采用声波导、声聚集技术。
- 3) 改变 IDT 的结构,即采用宽孔径或不用声孔径加权。

4) 发射换能器声孔径非均匀时,使接收换能器的声孔径大于发射换能器的声孔径。

5) 通过校正指条声孔径和位置,预先对衍射进行补偿。

### 2 原理

Morlet 小波函数为

$$\psi_{2^k}(t) = 2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{2^k})^2} e^{j2\pi f_0(\frac{t}{2^k})} \quad (2)$$

式中: $2^k$  为 Morlet 小波函数的尺度, $k$  是从  $-\infty \sim +\infty$  的整数; $2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{2^k})^2}$  是 Morlet 小波函数的包络。

信号  $f(t)$  的小波变换为

$$WT_{2^k}(\tau) = f(t) * \psi_{2^k}(t) = \int_{\mathbb{R}} f(t) 2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\tau-t}{2^k})^2} e^{j2\pi f_0(\frac{\tau-t}{2^k})} dt \quad (3)$$

式中  $*$  为卷积。

尺度  $2^{-1}$  的小波变换函数为

$$\psi_{2^{-1}}(t) = \sqrt{2} e^{-2t^2} e^{j2\pi \cdot 2f_0 t} = P_s(t) e^{j2\pi \cdot 2f_0 t} \quad (4)$$

式中: $P_s(t) = \sqrt{2} e^{-2t^2}$  为小波函数的包络函数; $2f_0$  为中心频率。

从式(3)、(4)可得尺度  $2^{-1}$  二进小波变换为

$$WT_{2^{-1}}(\tau) = f(t) * \psi_{2^{-1}}(t) = \int_{\mathbb{R}} f(t) \sqrt{2} e^{-2(\tau-t)^2} e^{j2\pi \cdot 2f_0(\tau-t)} dt \quad (5)$$

以尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器为例详细论述解决指条包络加权型 SAW 式小波变换处理器衍射问题的方法,如图 4 所示。

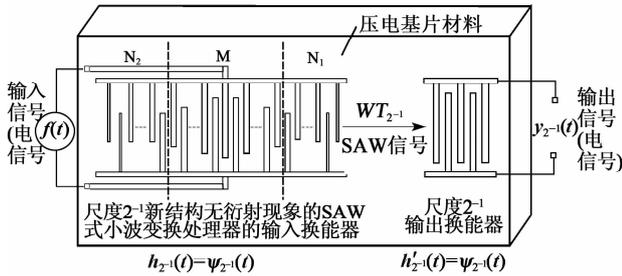


图 4 尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的结构示意图

图 4 中,SAW 式小波变换处理器输入换能器同样可分为 M 区、 $N_1$  区和  $N_2$  区。M 区不存在衍射问题,该区指条按照指条包络加权型 SAW 式小波

变换处理器设计方法设计,即指条长度按照小波函数的包络幅值设计(指条长度与小波函数  $\psi_2^{-1}(t)$  的包络幅值成正比); $N_1$  区和  $N_2$  区存在衍射问题,该区的指条采用新的加权设计方法,改变 IDT 结构,使声孔径变为均匀,即指条宽度按照小波函数的包络幅值设计(指条宽度与小波函数  $\psi_2^{-1}(t)$  的包络幅值成正比)。当输入信号为  $f(t)$  时,图 4 能够实现式(5)所示的尺度  $2^{-1}$  二进小波变换。

图 5 为尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器输入换能器的设计方案。图 5(a)中, $A_{-71}, \dots, A_{-30}, \dots, A_{-2}, A_{-1}, A_0, A_1, A_2, \dots, A_{30}, \dots, A_{71}$  为小波函数  $\psi_2^{-1}(t)$  的包络幅值, $t$  为 SAW 传播时间, $A'_j$  为 M 区的指条长度, $a_j$  为  $N_1$  区和  $N_2$  区的指条宽度, $b_j$  为  $N_1$  区和  $N_2$  区的指间距离。

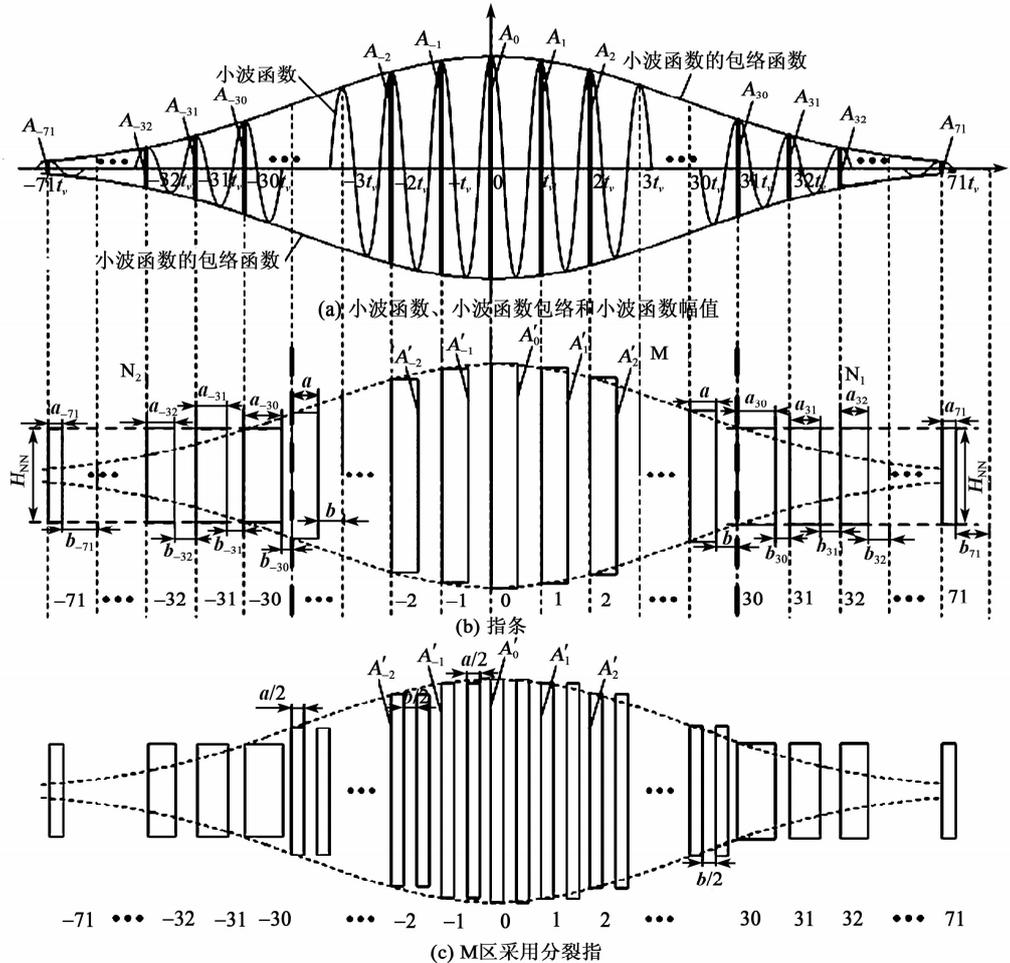


图 5 尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器输入换能器的设计方案

当  $t=t_v$  时,SAW 传播时间为

$$t_v = \frac{a+b}{v_s} \quad (6)$$

式中: $t_v$  为 SAW 在  $a+b$  距离之间的传播时间; $v_s$  为 SAW 传播速度, $X-112^\circ YLiTaO_3$  压电基片的  $v_s = 3\ 295\ \mu\text{m}/\mu\text{s}$ ;  $a$  为指条宽度;  $b$  为指间距离。

由图 5(a)可得 SAW 传播时间函数为

$$t_i = it_v \quad (7)$$

式中  $i=0\sim 71$ 。

根据图 5(a)和式(4)可得小波函数的包络幅值为

$$A_j = 2P_s(t) = 2\sqrt{2}e^{-2t_j^2} \quad (8)$$

式中  $j=0\sim 71$ 。

图 5(b)中, M 区的指条长度及  $N_1$  区和  $N_2$  区的指条宽度按照小波函数包络幅值设计, 因此可得 M 区的指条长度为

$$A'_n = kA_n \quad (9)$$

式中  $A_n$  为小波函数的包络幅值, 即式(8);  $n=0\sim 24$  为整数;  $k=0.5$ 。

$N_1$  区和  $N_2$  区的指条宽度为

$$a_r = \frac{A_r}{q} \quad (10)$$

式中:  $A_r$  为小波函数的包络幅值, 即式(8);  $r=25\sim 71$  为整数;  $q = 29.41626$ 。

为了减少指间反射, M 区指条采用分裂指, 如图 5(c)所示。

### 3 实现方案

表 2 为尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的设计参数。根据图 5 和式(6)~(10)可计算尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器输入换能器每根指条的具体参数, 如表 3~5 所示。用同样的方法也可计算  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器每根指条的具体参数。

表 2 在  $X-112^\circ\text{YLiTaO}_3$  压电基片材料上制作的尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的设计参数

尺度	中心频率/ MHz	$a_j + b_j /$ $\mu\text{m}$	$H_M / \mu\text{m}$ (M 区 $A_0$ )	$H_{NN} / \mu\text{m}$ ( $N_1, N_2$ 区)	$v / (\mu\text{m} / \mu\text{s})$	$t_v / \mu\text{s}$
$2^{-1}$	25.742	64	1 414.2	882.5	3 295	0.019 423 368
$2^{-2}$	51.484	32	2 000.0	672.7	3 295	0.009 711 684

尺度	小波函数的 包络函数	小波函数的 包络幅值	$n, r$	$q$	指条数	
					输入换能器	输出换能器
$2^{-1}$	$\sqrt{2}e^{-2t^2}$	$2\sqrt{2}e^{-2t^2}$	0~71	29.416 26	143	40
$2^{-2}$	$2e^{-8t^2}$	$4e^{-8t^2}$	0~70	48.052 65	141	40

注:  $H_M$  为 M 区指条  $A_0$  的声孔径值;  $H_{NN}$  为  $N_1$  区和  $N_2$  区声孔径设计值。

表 3 小波函数  $\phi_{2^{-1}}(t)$  的包络函数  $A_j$

$A_{-71} / \mu\text{m}$	...	$A_{-48} / \mu\text{m}$	...	$A_{-27} / \mu\text{m}$	...	$A_0 / \mu\text{m}$	...	$A_{27} / \mu\text{m}$	...	$A_{48} / \mu\text{m}$	...	$A_{71} / \mu\text{m}$
63.0	...	497.2	...	1 631.8	...	2 828.4	...	1 631.8	...	497.2	...	63.0

表 4 尺度  $2^{-1}$  M 区的指条长度  $A'_n$

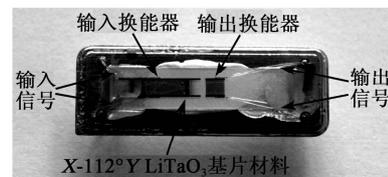
$A'_{-24} / \mu\text{m}$	...	$A'_{-20} / \mu\text{m}$	...	$A'_{-9} / \mu\text{m}$	...	$A'_0 / \mu\text{m}$	...	$A'_9 / \mu\text{m}$	...	$A'_{20} / \mu\text{m}$	...	$A'_{24} / \mu\text{m}$
915.7	...	1 045.8	...	1 311.4	...	1 414.2	...	1 311.4	...	1 045.8	...	915.7

表 5 尺度  $2^{-1}$   $N_1$  和  $N_2$  区的指条宽度度  $a_r$

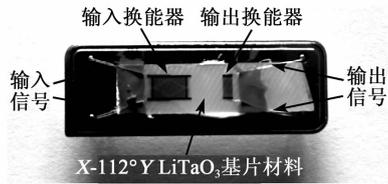
$a_{-71} / \mu\text{m}$	...	$a_{-54} / \mu\text{m}$	...	$a_{-39} / \mu\text{m}$	...	$a_{-25} / \mu\text{m}$	$a_{25} / \mu\text{m}$	...	$a_{39} / \mu\text{m}$	...	$a_{54} / \mu\text{m}$	...	$a_{71} / \mu\text{m}$
2.1	...	10.7	...	30.5	...	60.0	60.0	...	30.5	...	10.7	...	2.1

### 4 实验及论证

根据图 5, 表 3~5 和 SAW 器件制作工艺, 选用  $X-112^\circ\text{YLiTaO}_3$  压电基片材料制作出尺度  $2^{-1}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器, 同样地, 也可以制作出尺度  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器, 如图 6 所示。



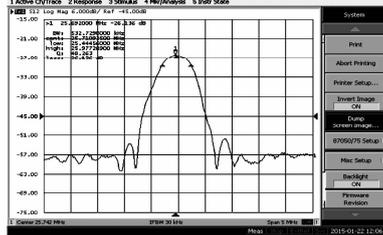
(a) 尺度  $2^{-1}$



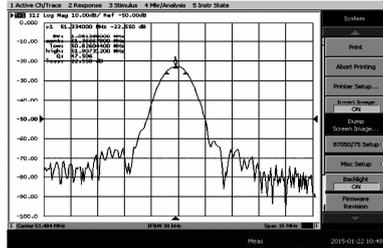
(b) 尺度 $2^{-2}$

图 6 在 X-112°YLiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器实物图

图 7 为使用网络分析仪 E5061A 分别测量尺度

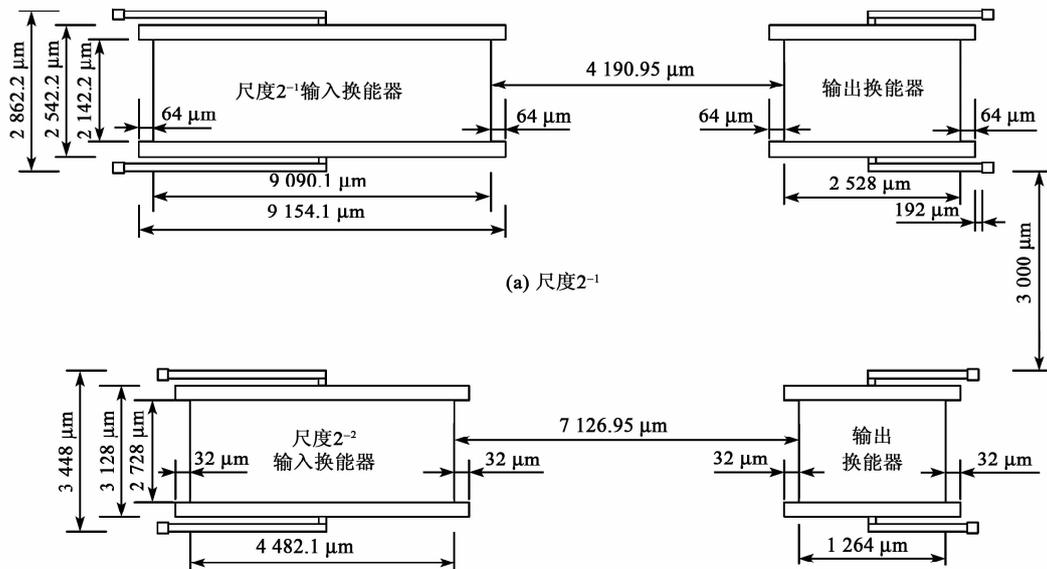


(a) 尺度 $2^{-1}$



(b) 尺度 $2^{-2}$

图 7 在 X-112°YLiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的频率特性曲线图



(b) 尺度 $2^{-2}$

图 8 在 X-112°YLiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的结构尺寸图

$2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的频率特性曲线图。表 6 为尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器的实验参数。

表 6 尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器理论和实验参数

尺度	理论带宽值/MHz				中心频率/MHz	
	-3 dB	-6 dB	-9 dB	-12 dB	理论值	实验值
$2^{-1}$	0.529	0.748	0.916	1.058	25.742	25.692
$2^{-2}$	1.058	1.497	1.833	2.116	51.484	51.334

尺度	实验带宽值/MHz				插入损耗/dB
	-3 dB	-6 dB	-9 dB	-12 dB	
$2^{-1}$	0.532	0.697	0.829	0.950	-26.136
$2^{-2}$	1.081	1.537	1.882	2.153	-22.550

以下论证尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器不存在衍射问题。图 8 为尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器结构尺寸图。表 7 为尺度  $2^{-1}$  和  $2^{-2}$  新结构无衍射问题的 SAW 式小波变换处理器验证衍射问题的参数。表 7 中,  $D$  为从输入换能器声孔径到接收点的距离,  $H'_{NN}$  为  $N_1$  区和  $N_2$  区声孔径计算值。

表7 尺度 $2^{-1}$ 和 $2^{-2}$ 新结构无衍射问题的SAW式小波变换处理器验证衍射问题的参数

尺度	M区最小声孔径	波长 $\lambda/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	$H'_{\text{NN}} = \sqrt{D\lambda}$	$H_{\text{NN}}/\mu\text{m}$ ( $N_1, N_2$ 区)	$H_{\text{NN}}^2/\lambda$
$2^{-1}$	915.7	64	10 090.1	800.0	882.5	12 168.8
$2^{-2}$	711.9	32	10 090.1	565.7	672.7	14 141.4

根据衍射问题及其解决方法。当 $D = 10\ 090.1\ \mu\text{m}$ 时,将表7中的 $D$ 和 $\frac{H_{\text{NN}}^2}{\lambda}$ 代入表1中,可得 $F < 1$ 成立,即 $\frac{H_{\text{NN}}^2}{\lambda} > D$ 成立,论证了尺度 $2^{-1}$ 和 $2^{-2}$ 新结构无衍射问题的SAW式小波变换处理器不存在衍射问题。

## 5 结束语

本文提出了通过改变叉指换能器结构的方法实现无衍射问题的声表面波式小波变换处理器的方案。该处理器的输入换能器不存在衍射问题区域的指条长度和存在衍射问题区域的指条宽度根据小波函数的包络幅值设计时,新结构声表面波式小波变换处理器不存在衍射问题,解决了指条包络加权型声表面波式小波变换处理器存在衍射的问题,从而提高了处理器性能。设计和制作出两种不同尺度的新结构无衍射问题的声表面波式小波变换处理器的样品。通过实验测得声表面波式小波变换处理器的理论带宽值和实验带宽值一致,并且通过对样品实际尺寸的测量和数据计算论证了新结构无衍射问题的声表面波式小波变换处理器不存在衍射问题。

## 参考文献:

- [1] INGRID D. Ten lectures on wavelets[M]. France: Society for Industrial and Applied Mathematic, 1992.
- [2] 李建平, 杨万年. 小波十讲[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] STOJANOVIĆ R, KARADAGLIĆ D, MIRKOVIĆ M, et al. A FPGA system for QRS complex detection based on integer wavelet transform[J]. Measurement Science Review, 2011, 11(11): 131-138.
- [4] DESMOULIERS C, ORUKLU E, SANIIE J. Discrete

wavelet transform realisation using run-time reconfiguration of field programmable gate array (FPGA)s[J]. Iet Circuits Devices & Systems, 2011, 5(4): 321-328.

- [5] SONG Y, ZHAO K, FENG Y. Research and design of water pump diagnosis system based on wavelet transform and DSP[J]. Journal of Software, 2013, 8(5): 1151-1156.
- [6] 曹玉珍, 王维, 张波. 基于提升小波的医学数据压缩算法及其DSP实现[J]. 中国生物医学工程学报, 2009, 28(1): 1-6.
- [7] ZHANG W, JIANG Z, GAO Z Y, et al. An efficient VLSI architecture for lifting-based discrete wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2012, 59: 158-162.
- [8] 张池军, 彭安金, 王厚军, 等. 一类易于VLSI实现的对称双正交小波设计方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 973-977.
- [9] LU Wenke, ZHU Changchun, LUN Kuang, et al. Implementing single-scale wavelet transform processor with magnetostatic surface wave device[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(6): 1439-1444.
- [10] 卢文科, 朱长纯. 声表面波式小波变换器件的研究[J]. 科学通报, 2005, 50(7): 717-720.
- [11] LU Wenke, ZHU Changchun, ZHANG Jingduan, et al. Study of small size wavelet transform processor and wavelet inverse-transform processor using SAW devices[J]. Measurement, 2011, 44(5): 994-999.
- [12] JIANG Hua, LU Wenke, ZHANG Guoan. Study of low insertion loss and miniaturization wavelet transform and inverse transform processor using SAW devices[J]. Ultrasonics, 2013, 53: 992-997.
- [13] CAMPLELL C. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications[M]. Boston: Academic Press, 1989.