

# 声表面波式指宽变长小波变换处理器的设计

高丽丽, 卢文科

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

**摘要:**为消除声表面波式小波变换处理器压电基片对频率特性的影响,以及输出换能器的指条数对带宽的影响和解决衍射问题,研制了声表面波式指宽变长小波变换处理器。该处理器选取机电耦合系数为0.64%的X-112°Y LiTaO<sub>3</sub>压电基片,输出换能器指条数为36,输入换能器采用指宽变长且声孔径均匀的叉指换能器。设计和制作了尺度 $2^{-2}$ 声表面波式指宽变长小波变换处理器样品。实验结果表明,声表面波式指宽变长小波变换处理器频率特性曲线光滑,−3 dB实验带宽为1.072 MHz,与理论带宽值一致,且不存在衍射问题。

**关键词:**声表面波;小波变换处理器;指宽;衍射;压电基片;频率特性;变长

**中图分类号:**TN65;TP212

**文献标识码:**A

## Design of Wavelet Transform Processor Using SAW Device With Unequal Electrode Width

GAO Lili, LU Wenke

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

**Abstract:** A novel wavelet transform processor (WTP) using SAW device with unequal electrode width (UEW) has been developed to eliminate the effect of the piezoelectric substrate of the WTP using SAW device on the frequency characteristic and the effect of the electrode number of the output interdigital transducer (IDT) on the bandwidth as well as to solve the problem of diffraction. This WTP using SAW device with UEW uses the X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> piezoelectric substrate with the electromechanical coupling coefficient of 0.64%, the electrode numbers of the output IDT were 36 and the input IDT used the unequal electrode width and uniform acoustic aperture. A WTP using SAW device with UEW sample with scale of  $2^{-2}$  has been fabricated. The experimental results confirmed that the WTP using SAW device with UEW had the features of smooth frequency characteristic curve, −3 dB bandwidth of 1.072 MHz and no diffraction.

**Key words:** surface acoustic wave; wavelet transform processor; electrode width; diffraction; piezoelectric substrate; frequency characteristic; unequal

### 0 引言

小波变换<sup>[1-3]</sup>将信号分解为一系列小波函数的叠加,是对时间(空间)频率的局部化分析,通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化,从而达到高频处时间细分,低频处频率细分,因此,可高效地从大量信号中提取有效信息。小波变换理论在应用数学和工程学科中得到了快速发展与应用,它与小波分析的理论研究紧密结合,已在很多领域取得了令人瞩目的成就<sup>[4-7]</sup>。由于小波变换的优势,科学家们采用各种方法实现小波变换,如制作成声表面波(SAW)式小波变换处理器<sup>[8-13]</sup>。

当声表面波式小波变换处理器输入换能器的指

条包络按照小波函数的包络设计时,能实现小波变换,从而制作出了声表面波式小波变换处理器。声表面波式小波变换处理器具有处理速度快,设计简单,体积小,温度稳定性好,价格低和功耗小的优点。但实际应用中发现,SAW式小波变换处理器存在压电基片对频率特性的影响、输出换能器的指条数对带宽的影响和衍射问题。

该文对SAW式小波变换处理器上述影响及问题产生的原因进行了分析,并提出了相应的解决方案。根据解决方案研制了SAW式指宽变长小波变换处理器。该处理器的输入换能器采用指宽变长,声孔径均匀的叉指换能器结构,输出换能器为指条

**收稿日期:**2017-02-22

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61274078);纺织之光应用基础基金资助项目(J201608);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。E-mail: lili\_gao1979@163.com。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: lwkzjd@sina.com。

相等重叠、均匀周期的叉指换能器。最后对 SAW 式指宽变长小波变换处理器进行实验测量。

1 原理

Morlet 小波函数为

$$\psi_{2^k}(t) = 2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{2^k})^2} e^{i2\pi f_0(\frac{t}{2^k})} \quad (1)$$

式中： $2^k$  为 Morlet 小波函数的尺度； $k$  为从  $-\infty$  到  $+\infty$  的整数； $2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{2^k})^2}$  为 Morlet 小波函数的包络。尺度  $2^{-2}$  的 Morlet 小波变换函数为

$$\psi_{2^{-2}}(t) = 2e^{-8t^2} e^{i2\pi 4f_0 t} = P_s(t) e^{i2\pi 4f_0 t} \quad (2)$$

式中： $P_s(t) = 2e^{-8t^2}$  为小波函数的包络函数； $4f_0$  为中心频率。

信号  $f(t)$  的小波变换为

$$WT_{2^k}(\tau) = f(t) * \psi_{2^k}(t) = \int_R f(t) 2^{-\frac{k}{2}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\tau-t}{2^k})^2} e^{i2\pi f_0(\frac{\tau-t}{2^k})} dt \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得出尺度  $2^{-2}$  二进小波变换为

$$WT_{2^{-2}}(\tau) = f(t) * \psi_{2^{-2}}(t) = \int_R f(t) 2e^{-8(\tau-t)^2} e^{i2\pi 4f_0(\tau-t)} dt \quad (4)$$

以尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器

为例,论述了 SAW 式指宽变长小波变换处理器的工作原理。图 1、2 分别为尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的输入、输出换能器的设计方案。图 1 中,  $L_{-n}, L_{-(n-1)}, \dots, L_{-2}, L_{-1}, L_0, L_1, L_2, \dots, L_{(n-1)}$  和  $L_n$  是小波函数的包络幅值;  $a_{-n}, a_{-(n-1)}, \dots, a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$  和  $a_n$  为指宽,  $b_{-n}, b_{-(n-1)}, \dots, b_{-2}, b_{-1}, b_0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}$  和  $b_n$  为指间距,  $a_{-n} + b_{-n} = a_{-(n-1)} + b_{-(n-1)} = \dots = a_{-2} + b_{-2} = a_{-1} + b_{-1} = a_0 + b_0 = a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = \dots = a_{n-1} + b_{n-1} = a_n + b_n = M, T = M/v$  为时间,  $v$  为 SAW 传播速度,  $H$  为声孔径。图 1 中, 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的输入换能器采用声孔径  $H$  相等, 指宽  $a$  及指间距  $b$  均为变长的叉指换能器。当输入换能器指宽按照小波函数  $\psi_{2^{-2}}(t)$  包络幅值设计, 即指宽与小波函数  $\psi_{2^{-2}}(t)$  包络幅值成比例时, 输入换能器能实现式(4)的尺度  $2^{-2}$  二进小波变换, 即  $f(t)$  与  $\psi_{2^{-2}}(t)$  的卷积。输出换能器是指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器, 它仅是将 SAW 信号转化为电信号。

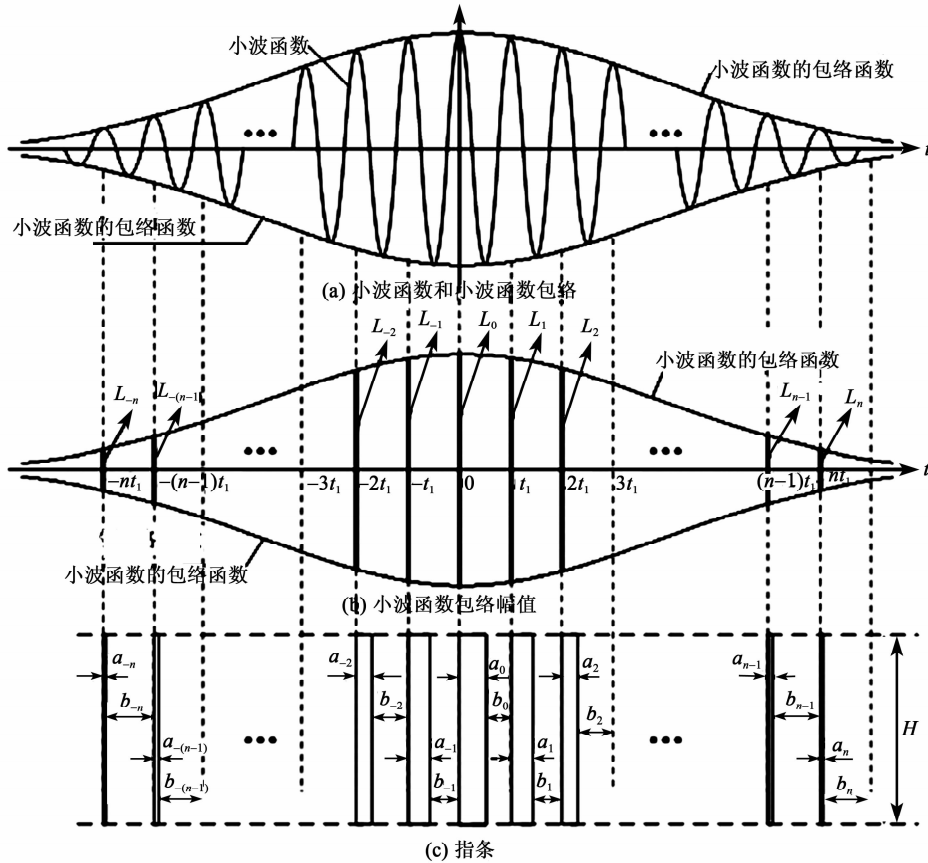


图 1 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的设计方案

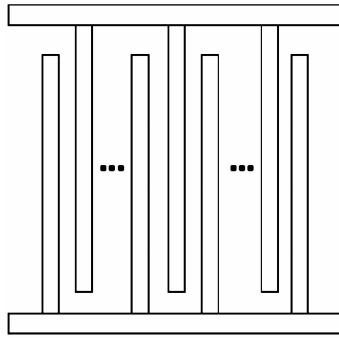


图 2 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输出换能器的设计方案

由图 1 可得

$$\begin{cases} L_0 = ka_0 \\ L_1 = L_{-1} = ka_1 = ka_{-1} \\ L_2 = L_{-2} = ka_2 = ka_{-2} \\ \vdots \\ L_{n-1} = L_{-(n-1)} = ka_{n-1} = ka_{-(n-1)} \\ L_n = L_{-n} = ka_n = ka_{-n} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $k$  为常数,  $k = 250$ 。

## 2 关键问题

### 2.1 压电基片对频率特性的影响

图 3、4 为分别使用网络分析仪 HP8712ET 和

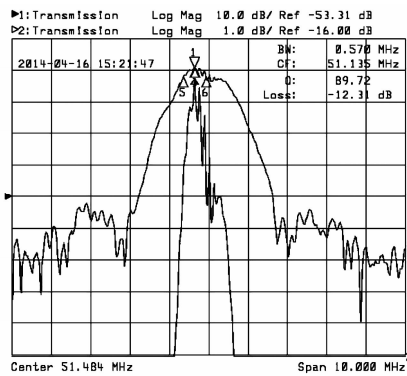


图 3 在  $128^\circ\text{Y-X LiNO}_3$  压电基片材料上制作的尺度  $2^{-2}$  SAW 式小波变换处理器的频率特性曲线图

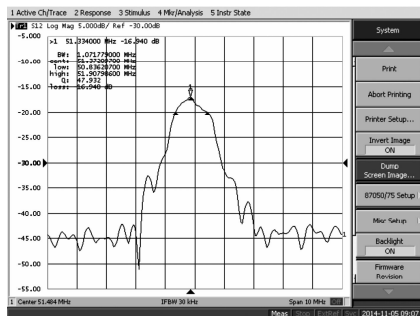


图 4 在  $X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$  压电基片材料上制作的尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的频率特性曲线图

E5061A 测量的 SAW 式小波变换处理器的频率特性曲线图。表 1 为压电基片  $X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$  和  $128^\circ\text{Y-X LiNO}_3$  特性对比表。

表 1  $X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$  和  $128^\circ\text{Y-X LiNO}_3$

压电基片对比

	$X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$	$128^\circ\text{Y-X LiNO}_3$
机电耦合系数/%	0.64	5.5
指间反射	不严重	严重
成本	高	低

从图 3、4 和表 1 可知,由较小机电耦合系数的压电基片材料(如  $X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$ )制作的 SAW 式小波变换处理器,指间反射减少,频率特性曲线较好。该文选取  $X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$  用于制作 SAW 式指宽变长小波变换处理器的压电基片。

### 2.2 输出换能器的指条数对带宽的影响

制作两种输入换能器和输出换能器的结构完全相同,仅输出换能器指条数不同的尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器,其设计参数如表 2 所示。使用网络分析仪 E5061A 测量两种 SAW 式指宽变长小波变换处理器的带宽值,如表 3 所示。

表 2 两种 SAW 式指宽变长小波变换处理器的指条参数

序号	压电基片	输入换能器指条数	输出换能器指条数	成本
1	$X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$	105	50	高
2	$X-112^\circ\text{Y LiTaO}_3$	105	36	低

表 3 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的实验带宽值和理论带宽值

	序号	-3 dB	-6 dB	-9 dB	-12 dB
理论带宽值/MHz		1.058	1.497	1.833	2.116
实验带宽值/MHz	1	0.539	1.065	1.530	1.798
	2	1.072	1.447	1.649	1.937

由表 3 可知,输出换能器指条数的多少,对 SAW 式指宽变长小波变换处理器的带宽会产生影响。当输出换能器的指条数减少(这里的输出换能器指条数为 36)时,对 SAW 式小波变换处理器的带宽影响很小。该文研制的 SAW 式指宽变长小波变换处理器输出换能器指条数为 36。

### 2.3 衍射问题

无衍射方程<sup>[14]</sup>为

$$H^2/\lambda > D \quad (6)$$

式中: $D$  为从输入换能器声孔径到接收点的距离; $\lambda$

为波长。当 SAW 式指宽变长小波变换处理器满足式(6)时,不存在衍射问题。

该文通过改变 SAW 式小波变换处理器输入换能器结构的方法,即输入换能器采用指宽变长,声孔径均匀相等的叉指换能器,使研制的 SAW 式指宽变长小波变换处理器换能器的结构满足式(6),达到解决衍射问题的目的。

### 3 处理器设计

根据式(3),定义小波函数的包络幅值为

$$L_j = 2P_s(t) = 4e^{-8t^2} \quad (7)$$

式中  $j$  为  $-52 \sim 52$  的整数。

当 SAW 传播时间  $t=t_1$ ,则 SAW 传播时间为

$$t_1 = \frac{a_0 + b_0}{v} \quad (8)$$

式中  $v$  为 SAW 传播速度。X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> 压电基片的  $v=3\,295 \mu\text{m}/\mu\text{s}$ 。

由图 1 可得 SAW 时间函数为

$$t_i = it_1 \quad (9)$$

式中  $i$  为  $-52 \sim 52$  的整数。

根据式(7)、(9)可计算出不同时刻小波函数的包络幅值  $L_j$ ,如表 4 所示。

表 4 小波函数  $\psi_{2^{-2}}(t)$  的包络幅值  $L_j$

$L_{-52}/\mu\text{m}$	...	$L_{-36}/\mu\text{m}$	...	$L_{-11}/\mu\text{m}$	...	$L_0/\mu\text{m}$	...
520.0	...	1 504.4	...	3 651.0	...	4 000.0	...
$L_{11}/\mu\text{m}$	...	$L_{36}/\mu\text{m}$	...	$L_{52}/\mu\text{m}$			
3 651.0	...	1 504.4	...	520.0			

由式(5)可得,尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的指宽与小波函数  $\psi_{2^{-2}}(t)$  的包络幅值成比例,即

$$L_j = ka_j \quad (10)$$

式中  $a_j$  为指宽。

表 5 为尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的设计参数。

表 5 在 X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的设计参数

尺度	中心频率/MHz	$(a_j + b_j)/\mu\text{m}$	$H/\mu\text{m}$	$j$	$k$
$2^{-2}$	51.484	32	2 000	52	250
$v/(\mu\text{m}/\mu\text{s})$	$t_1/\mu\text{s}$	小波函数的包络函数	小波函数的包络幅值		
3 295	0.009 711 684	$2e^{-8t^2}$	$4e^{-8t^2}$		

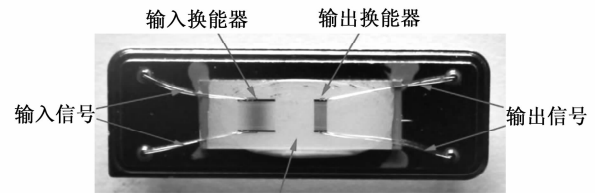
根据式(10)、表 1、2 可计算尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的  $a_j$ ,如表 6 所示。

表 6 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的  $a_j(H = 2\,000 \mu\text{m})$

$a_{-52}/\mu\text{m}$	...	$a_{-36}/\mu\text{m}$	...	$a_{-11}/\mu\text{m}$	...	$a_0/\mu\text{m}$	...
2.1	...	6	...	14.6	...	16	...
$a_{11}/\mu\text{m}$	...	$a_{36}/\mu\text{m}$	...	$a_{52}/\mu\text{m}$			
14.6	...	6	...	2.1			

### 4 制作及实验

根据图 1、2、表 4~6 和 SAW 器件制作工艺,在 X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作了尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器。图 5 为尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的实物图。



X-112°Y LiTaO<sub>3</sub>基片材料

图 5 在 X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的实物图

图 6 为使用环境扫描电场显微镜 Quanta-250 测量的图 5 所示的 SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的局部放大图。尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的频率特性曲线如图 4 所示。表 7 为尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的实验参数。

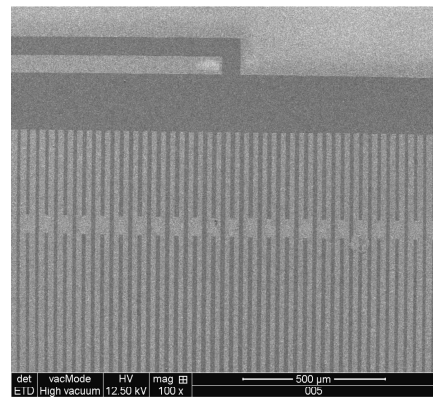


图 6 在 X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> 压电基片材料上制作的尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的局部放大图

表 7 尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长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
$2^{-2}$	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	
$2^{-2}$	1.072	1.447	1.649	1.937	-16.940

由表 7 可知,SAW 式指宽变长小波变换处理器的理论带宽值与实验带宽值一致,从而得出结论:当 SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的指宽按照小波函数的包络幅值设计,并且输出换能器是指条相等重叠、均匀周期换能器时,能够制造出 SAW 式指宽变长小波变换处理器。

## 5 结论

该文研制的 SAW 式指宽变长小波变换处理器的工作原理是:当输入换能器指宽与小波函数  $\phi_{2^{-2}}(t)$  包络幅值成比例时,输入换能器能实现尺度  $2^{-2}$  二进小波变换。SAW 式指宽变长小波变换处理器的输入换能器为指宽变长且声孔径均匀相等的叉指换能器,输出换能器为指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器。设计并制作了尺度  $2^{-2}$  SAW 式指宽变长小波变换处理器的样品。通过实验测得 SAW 式小波变换处理器的理论带宽值和实验带宽值一致。SAW 式指宽变长小波变换处理器消除了压电基片对频率特性、输出换能器的指条数对带宽的影响,并解决了衍射问题,可得结论如下:

1) 机电耦合系数  $k^2$  较小的压电基片材料制作的 SAW 式指宽变长小波变换处理器,指间反射减少,频率特性曲线好。

2) 当输出换能器的指条数减少时,输出换能器指条数对 SAW 式指宽变长小波变换处理器的带宽影响很小。

3) SAW 式指宽变长小波变换处理器输入换能器的结构满足  $H^2/\lambda > D$ ,可解决衍射问题。

## 参考文献:

[1] 李建平,杨万年. 小波十讲[M]. 北京:国防工业出版社,2004.  
 [2] INGRID D. Ten lectures on wavelets[M]. France: Society for Industrial and Applied Mathematic, 1992.

[3] UNSER M, BLU T. Wavelet theory demystified[J]. IEEE Trans Signal Process, 2003, 51: 470-483.  
 [4] 路永乐,潘英俊,任春华,等. 基于小波包-神经网络的 MEMS 加速度计零漂补偿[J]. 压电与声光, 2015, 37(1):27-31.  
 LU Yongle, PAN Yingjun, REN Chunhua, et al. Zero drift compensation of MEMS accelerometer-based on wavelet packers-neural network[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1):27-31.  
 [5] WANG Z, BALOG R S. Arc fault and flash signal analysis in DC distribution systems using wavelet transformation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6:1955-1963.  
 [6] ZOU Y, HAN J, XUAN S, et al. An energy-efficient design for ECG recording and R-peak detection based on wavelet transform[J]. IEEE Transactions Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62:119-123.  
 [7] HAMANEH M B, CHITRAVAS N, KAIBORIBOON K. Automated removal of EKG artifact from EEG data using independent component analysis and continuous wavelet transformation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61, (6): 1634-1641.  
 [8] 陈景,韩韬,吉小军,等. 超宽带声表面波滤波器的设计[J]. 压电与声光, 2016, 38(3):353-355.  
 CHEN Jing, HAN Tao, JI Xiaojun, et al. Design of ultra-wideband surface acoustic wave filters[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(3):353-355.  
 [9] WEN Changbao, ZHU Changchun, JU Yongfeng, et al. Optimal frequency band design scheme of dyadic wavelet processor array using surface acoustic wave devices [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2009, 56(4): 949-955.  
 [10] 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.  
 [11] JIANG Hua, LU Wenke, ZHANG Guoan. A solution to reducing insertion loss and achieving high sidelobe rejection for wavelet transform and reconstruction processor using SAW devices[J]. Solid-State Electronics, 2013, 80:105-109.  
 [12] 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.  
 [13] LU Wenke, ZHU Changchun, LIU Qinghong, et al. Implementing wavelet inverse-transform processor with surface acoustic wave device [J]. Ultrasonics, 2013, 53:447-454.  
 [14] CAMPLELL C. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications[M]. Boston: Academic Press, 1989.