

SAW式小波变换处理器的制造误差校正模型

刘守兵, 卢文科

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要:为了将声表面波(SAW)式小波变换处理器(WTP)应用于各种电子系统中,我们基于曲线拟合法建立了该器件的制造误差校正模型,以制作出一个输出精度高的SAW式WTP。理论研究和实验结果表明,利用该模型制作的SAW式WTP,其指条的实际尺寸恰好等于其理论计算尺寸,从而使其成为一个输出精度高的SAW式WTP。

关键词:声表面波;小波变换处理器;制造误差校正模型;拟合方程

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.002

Manufacturing Error Correction Model of the Wavelet Transform Processor Using Surface Acoustic Wave Devices

LIU Shoubing, LU Wenke

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

Abstract: In order to apply the wavelet transform processor (WTP) using surface acoustic wave (SAW) devices to various electronic systems, a manufacturing error correction model of the device has been established based on the curve fitting method, so as to manufacture a WTP using SAW devices with high output accuracy. The theoretical study and experimental results show that the finger's actual size of the WTP using SAW devices fabricated by the manufacturing error correction model is exactly equal to its theoretical size, which can implement the manufacture of the wavelet transform processor using SAW devices with high output accuracy.

Key words: surface acoustic wave; wavelet transform processor; manufacturing error correction model; fitting equation

0 引言

小波变换算法被用于信号分析无线通讯、雷达目标识别和图像处理等各种领域^[1-5],也正是这些应用,将信息产业推向一个新的时代。然而,小波算法的实现需要大量的数学运算和复杂的软件编程,基本上只能靠计算机和相关的软件来实现,很难被广泛应用于实际的工程领域。为了解决这一问题,国内、外科研人员尝试采用超大规模集成电路(VLSI)^[6-7]、光学器件^[8]和声表面波(SAW)器件^[9]来实现小波变换算法。

通过研究可发现^[9-10],SAW器件输入换能器的指条重叠包络按照 Morlet 小波函数的包络设计,而输出换能器采用指条相等重叠、均匀周期的叉指换

能器,就可以设计出一个 SAW 式小波变换处理器(WTP)。由此可知,SAW 式 WTP 的输出响应取决于其输入换能器的指条重叠包络,即该器件的输出精度取决于其指条的制造精度^[11]。

由于越来越多的 SAW 式 WTP 被用于各种各样的电子领域中,人们对该器件输出精度的要求也越来越高。而制作 SAW 器件的各种制造设备对其曝光和刻蚀的控制精度都能达到 100%,因而指条在版面图上的尺寸不可能恰好等于其实测尺寸,即使更换精度更高的设备,也不能完全消除两者之间的误差。为此,我们有必要建立一个制造误差校正模型,通过调整指条在版面图上的绘制尺寸,以此消除该指条理论计算尺寸与实测尺寸间的误差,使其

收稿日期:2017-04-27

基金项目:纺织之光应用基础基金资助项目(J201608);国家自然科学基金资助项目(61274078)

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的研究。E-mail: qiangqiang251@163.com。
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的研究。E-mail: luwenke1149182@163.com。

实测尺寸恰好等于其理论计算尺寸,以设计制作出一个输出精度高的 SAW 式 WTP。

1 SAW 式 WTP 的原理与设计

Morlet 小波函数的时域表达式^[11]为

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

式中: s 为小波函数的尺度; f_0 为中心频率; $E_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{s})^2}$ 为 Morlet 小波函数的包络函数。

理论研究表明^[9-10],如果按照 Morlet 小波函数的包络函数设计 SAW 器件输入换能器的指条重叠包络,而输出换能器采用指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器,就可以设计出一个 SAW 式 WTP。若输入换能器中最大的一条指条重叠包络为 L_{\max} ,则输入、输出换能器的指条包络 \bar{L}_r 和 \bar{L}_c 分别为

$$\bar{L}_r(n) = \bar{L}_r(n') = L_{\max} e^{-\frac{1}{2}(\frac{n-1}{s}\Delta t)^2} \quad (2)$$

$$\bar{L}_c(m) = \bar{L}_c(m') = L_{\max} \quad (3)$$

式中: n, n' 为输入换能器的指条编号,其最大值对应的指条重叠包络恰好为指条重叠的最小值 L_{\min} ; m, m' 为输出换能器的指条编号,其最大值一般取为 21; \bar{L}_r 和 \bar{L}_c 是一个整体,分别为输入换能器和输出换能器的指条包络; Δt 为指条的采样间隔,对于单电极式 SAW 式 WTP, $\Delta t = \frac{1}{2f_0}$; 而对于双电极式

SAW 式 WTP, $\Delta t = \frac{1}{4f_0}$ 。

考虑到每条指条都必须包括其重叠包络部分和其与汇流条的连接部分组成,则两换能器中各条指条的长度可分别表示为

$$L_r(n) = L_r(n') = 0.5L_{\max} [1 + e^{-\frac{1}{2}(\frac{n-1}{s}\Delta t)^2}] + \frac{2v}{f_0} + 50 \quad (4)$$

$$L_c(m) = L_c(m') = L_{\max} + \frac{2v}{f_0} + 50 \quad (5)$$

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。

由于本文研究的 SAW 式 WTP 都采用均匀周期的叉指换能器,且每个叉指换能器的金属化率都为 50%,因而指条的宽度为

$$W = \frac{v\Delta t}{2} \quad (6)$$

2 SAW 式 WTP 制造误差校正模型的原理

绘制在版面图上的指条尺寸发生变化时,实际

制作出的指条尺寸也一定会发生相应的变化,因而,可以称指条在版面图上的尺寸为解释量,而且实际制作出的指条尺寸为被解释量。那么,根据被解释量与解释量之间的因果关系,使用曲线拟合法可得到两者之间的拟合方程^[12-13]为

$$L_d = \alpha_0 + \alpha_1 L_s + \alpha_2 L_s^2 + \alpha_3 L_s^3 + \alpha_4 L_s^4 + \alpha_5 L_s^5 + \epsilon \quad (7)$$

$$W_d = \beta_0 + \beta_1 W_s + \beta_2 W_s^2 + \beta_3 W_s^3 + \beta_4 W_s^4 + \beta_5 W_s^5 + e \quad (8)$$

式中: L_d, W_d 为版面图上的指条尺寸,分别对应其长与宽; L_s, W_s 为实际制作出的指条尺寸; $\alpha_0, \dots, \alpha_5, \beta_0, \dots, \beta_5$ 为拟合系数; ϵ 和 e 为随机误差系数。

为了制作出一个输出精度高的 SAW 式 WTP,我们一定期望实际制作出的指条尺寸恰好等于其理论计算尺寸,为此,我们可以用指条尺寸的理论计算值代替式(7)、(8)中的实际值,从而可以建立一个指条尺寸的绘图值与其理论计算值的拟合方程,使其实际值恰好等于其理论计算值,即

$$L_d = \alpha_0 + \alpha_1 L_t + \alpha_2 L_t^2 + \alpha_3 L_t^3 + \alpha_4 L_t^4 + \alpha_5 L_t^5 + \epsilon \quad (9)$$

$$W_d = \beta_0 + \beta_1 W_t + \beta_2 W_t^2 + \beta_3 W_t^3 + \beta_4 W_t^4 + \beta_5 W_t^5 + e \quad (10)$$

式中 L_t, W_t 为实际制作出的指条尺寸,分别对应其长与宽。

为了简化分析,我们可以忽略拟合方程中的随机误差,则式(9)、(10)可改写为

$$L_d = \alpha_0 + \alpha_1 L_t + \alpha_2 L_t^2 + \alpha_3 L_t^3 + \alpha_4 L_t^4 + \alpha_5 L_t^5 \quad (11)$$

$$W_d = \beta_0 + \beta_1 W_t + \beta_2 W_t^2 + \beta_3 W_t^3 + \beta_4 W_t^4 + \beta_5 W_t^5 \quad (12)$$

不失一般性,我们只讨论指条长度的拟合方程中各系数的求取方法,而另一个方程中各系数的求取方法与此类似。为此,我们采用拟选用的制造设备制作一批宽度不变而长度在 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 变化的样本指条,并分别记录下其长度的绘图值和用扫描电子显微镜(Quanta 250, SEM)测量出的实际值,从而得到式(11)的标定数据。

根据式(11)和标定数据可得到实际值与拟合值的方差和为

$$Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5) = \sum_{j=1}^N (L_{d_j} - L'_{d_j})^2 = \sum_{j=1}^N (\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 +$$

$$\alpha_5 L_{t_j}^5 - L'_{d_j})^2 \quad (13)$$

式中 N 为标定数据的个数; L_{d_j} 为指条的实际绘图值; L'_{d_j} 为对应的拟合值。

根据最小二乘法的原理,当式(13)中的 Q 取最小值时的常数 $\alpha_0, \dots, \alpha_5$, 就可得到式(11)中对应拟合系数的最小二乘法估计,并使其满足:

$$Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5) = \min_{\alpha_0, \dots, \alpha_5} \sum_{j=1}^N (\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5 - L'_{d_j})^2 \quad (14)$$

为了求取函数 $Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)$ 为最小值时的常数 $\alpha_0, \dots, \alpha_5$, 我们对该函数求导,并令其为 0, 即

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_0} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times 1 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_1} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times L_{t_j} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_2} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times L_{t_j}^2 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_3} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times L_{t_j}^3 = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_4} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times L_{t_j}^4 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } \frac{\partial Q(\alpha_0, \dots, \alpha_5)}{\partial \alpha_5} = 0, \text{ 可得} \\ \sum_{j=1}^N [(\alpha_0 + \alpha_1 L_{t_j} + \alpha_2 L_{t_j}^2 + \alpha_3 L_{t_j}^3 + \alpha_4 L_{t_j}^4 + \alpha_5 L_{t_j}^5) - L'_{d_j}] \times L_{t_j}^5 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

整理式(15)~(20)可得矩阵方程:

$$\begin{cases} \alpha_0 n + \alpha_1 b + \alpha_2 c + \alpha_3 d + \alpha_4 e + \alpha_5 f = p \\ \alpha_0 b + \alpha_1 c + \alpha_2 d + \alpha_3 e + \alpha_4 f + \alpha_5 g = q \\ \alpha_0 c + \alpha_1 d + \alpha_2 e + \alpha_3 f + \alpha_4 g + \alpha_5 h = r \\ \alpha_0 d + \alpha_1 e + \alpha_2 f + \alpha_3 g + \alpha_4 h + \alpha_5 i = s \\ \alpha_0 e + \alpha_1 f + \alpha_2 g + \alpha_3 h + \alpha_4 i + \alpha_5 j = t \\ \alpha_0 f + \alpha_1 g + \alpha_2 h + \alpha_3 i + \alpha_4 j + \alpha_5 k = u \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } b &= \sum_{j=1}^n L_{t_j}; c = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^2; d = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^3; e = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^4; \\ f &= \sum_{j=1}^n L_{t_j}^5; g = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^6; h = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^7; i = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^8; \\ j &= \sum_{j=1}^n L_{t_j}^9; k = \sum_{j=1}^n L_{t_j}^{10}; p = \sum_{j=1}^n L_{d_j}; q = \sum_{j=1}^n L_{d_j} L_{t_j}; \\ r &= \sum_{j=1}^n L_{d_j} L_{t_j}^2; s = \sum_{j=1}^n L_{d_j} L_{t_j}^3; t = \sum_{j=1}^n L_{d_j} L_{t_j}^4; u = \\ &= \sum_{j=1}^n L_{d_j} L_{t_j}^5. \end{aligned}$$

求解式(21),即可得拟合方程中的各个拟合系数 $\alpha_0, \dots, \alpha_5$ 的值,从而可得指条长度的绘图值与理论计算值之间的拟合方程。

利用下式求取 L_d 的可决系数:

$$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (L'_{d_j} - \bar{L}_{d_j})^2}{\sum_{j=1}^n (L_{d_j} - \bar{L}_{d_j})^2} \quad (22)$$

若求得的 R^2 值大于其临界值表明拟合方程成立,从而可得制造误差校正模型,且该模型可以对设计的指条尺寸进行校正,进而得到一个输出精度高的 SAW 式 WTP。若 R^2 值小于其临界值,其拟合方程不成立,需要调整标定数据,重新求取拟合系数。

3 SAW 式 WTP 制造误差校正模型的应用

利用制造误差校正模型设计制作输出精度高的 SAW 式 WTP 需经 5 个步骤(见图 1):

1) 采用拟选用的制造设备制作样本指条,并记录指条尺寸的绘图值和用扫描电子显微镜(Quanta 250, SEM)测量出的实际值,从而获得拟合方程的标定数据。

2) 将实际值作为输入值,而将绘图值作为输出值,求出拟合方程中各个拟合系数的值。

3) 求取拟合方程的可决系数,并与其临界值相比较,若可决系数大于其临界值,拟合方程成立,从而可以建立出该制造设备的制造误差校正模型,可以进入下一步;若可决系数不大于其临界值,拟合方

程不成立,需要返回第1)步,重新制作合适的样本指条。

4) 利用式(4)~(6)计算 SAW 式 WTP 中各条指条的尺寸,并将其代入式(11),(12)中,从而得到各条指条尺寸的绘图值。

5) 利用第4)步得到的各条指条尺寸的绘图值绘制所设计 SAW 式 WTP 的版面图,从而制作出一个输出精度高的 SAW 式 WTP。

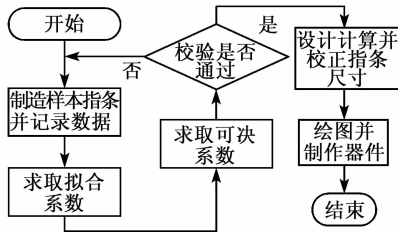


图1 利用制造误差校正模型设计制作高精度 SAW 式 WTP 的流程图

4 制造误差校正模型的验证与讨论

为了验证本文介绍的制造误差校正模型,我们分别制作了15条样本指条,并分别记录下各指条的绘图值和用 SEM 测量出的实际值,分别如表1、2所示。

表1 样本指条的长度值

编号	1	2	3	4	5
绘图长度值/ μm	20.0	50.0	80.0	110.0	140.0
实测长度值/ μm	19.0	47.5	76.0	104.5	133.0
编号	6	7	8	9	10
绘图长度值/ μm	170.0	200.0	230.0	260.0	290.0
实测长度值/ μm	161.5	190.0	218.5	247	300.0
编号	11	12	13	14	15
绘图长度值/ μm	320.0	350.0	380.0	410.0	440.0
实测长度值/ μm	319.0	342.5	377.0	409.5	436.8

表2 样本指条的宽度值

编号	1	2	3	4	5
绘图宽度值/ μm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
实测宽度值/ μm	0.6	1.4	2.3	3.6	4.4
编号	6	7	8	9	10
绘图宽度值/ μm	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
实测宽度值/ μm	5.5	6.6	7.3	8.5	9.6
编号	11	12	13	14	15
绘图宽度值/ μm	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5
实测宽度值/ μm	10.4	11.6	12.4	13.7	14.5

利用表1中的标定数据可得指条长度的拟合方程为

$$L_d = -6.41 + 1.33L_t - 0.17L_t^2 + 0.0278L_t^3 - 0.00197L_t^4 + (5.05 \times 10^{-5})L_t^5 \quad (23)$$

由式(22)可求得该拟合方程的 $R^2 = 0.992$, 此值远大于其临界值,拟合方程成立。

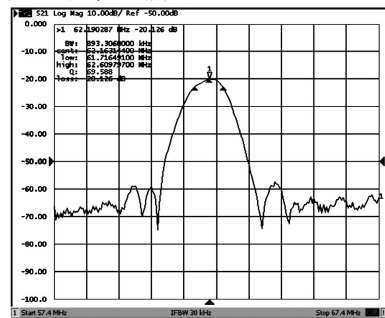
同理,可由表2中的标定数据求得指条宽度的拟合方程为

$$W_d = 0.26 + 0.57W_t - 0.0058W_t^2 + (3.45 \times 10^{-5})W_t^3 - (7.79 \times 10^{-8})W_t^4 + (6.67 \times 10^{-11})W_t^5 \quad (24)$$

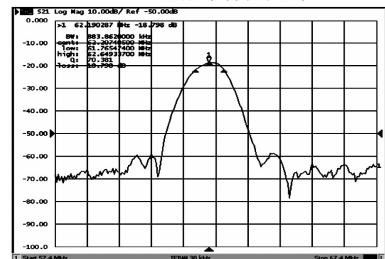
式(24)的 $R^2 = 0.999$, 此值远大于其临界值,拟合方程成立。

由式(23)、(24)即可得到该制造设备的制造误差校正模型。

为了检验这个制造误差校正模型,我们设计了一个中心频率 $f_0 = 62.4 \text{ MHz}$ 和尺度 $s = 0.3149$ 的 SAW 式 WTP, 并实际制作了两个器件,其中一个器件的指条尺寸未使用制造误差校正模型进行校正,而另外一个器件的指条尺寸使用制造误差校正模型进行了校正。我们采用网络分析仪 E5061A 对这两个器件进行了测量,其频率特性曲线和性能参数分别如图2和表3所示。



(a) 指条尺寸未校正的SAW式 WTP 的频率特性曲线



(b) 指条尺寸经校正的SAW式 WTP 的频率特性曲线

图2 SAW 式 WTP 的频率特性曲线

表 3 SAW 式 WTP 的性能参数表

	中心 频率/MHz	带宽/MHz						
		-3 dB	-6 dB	-9 dB	-12 dB	-15 dB	-18 dB	-21 dB
理论	62.400 0	0.840 0	1.187 9	1.454 9	1.680 0	1.878 3	1.982 8	2.140 8
未校正	62.163 1	0.893 3	1.210 7	1.449 7	1.644 9	1.817 9	1.982 4	2.138 4
经校正	62.207 4	0.883 9	1.196 5	1.449 8	1.656 0	1.825 3	1.983 0	2.142 4

根据表 3 可计算出各性能参数的误差系数。

指条尺寸未校正的 SAW 式 WTP 的误差系数为

$$\delta f_0 = \frac{|f_0 - f'_0|}{f_0} \times 100\% = \frac{|62.4 - 62.163\ 1|}{62.4} \times 100\% = 0.38\% \quad (25)$$

$$\delta \Delta f_{-3\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-3\text{ dB}} - \Delta f'_{-3\text{ dB}}|}{\Delta f_{-3\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|0.84 - 0.893\ 3|}{0.84} \times 100\% = 6.35\% \quad (26)$$

$$\delta \Delta f_{-6\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-6\text{ dB}} - \Delta f'_{-6\text{ dB}}|}{\Delta f_{-6\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.187\ 9 - 1.210\ 7|}{1.187\ 9} \times 100\% = 1.92\% \quad (27)$$

$$\delta \Delta f_{-9\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-9\text{ dB}} - \Delta f'_{-9\text{ dB}}|}{\Delta f_{-9\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.454\ 9 - 1.449\ 7|}{1.454\ 9} \times 100\% = 0.36\% \quad (28)$$

$$\delta \Delta f_{-12\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-12\text{ dB}} - \Delta f'_{-12\text{ dB}}|}{\Delta f_{-12\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.68 - 1.649\ 9|}{1.68} \times 100\% = 2.09\% \quad (29)$$

$$\delta \Delta f_{-15\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-15\text{ dB}} - \Delta f'_{-15\text{ dB}}|}{\Delta f_{-15\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.878\ 3 - 1.817\ 9|}{1.878\ 3} \times 100\% = 3.22\% \quad (30)$$

$$\delta \Delta f_{-18\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-18\text{ dB}} - \Delta f'_{-18\text{ dB}}|}{\Delta f_{-18\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.982\ 8 - 1.982\ 4|}{1.982\ 8} \times 100\% = 0.02\% \quad (31)$$

$$\delta \Delta f_{-21\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-21\text{ dB}} - \Delta f'_{-21\text{ dB}}|}{\Delta f_{-21\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|2.140\ 8 - 2.138\ 4|}{2.140\ 8} \times 100\% = 0.11\% \quad (32)$$

类似地,我们可以求出指条尺寸经校正的器件的误差系数为

$$\delta f_0 = \frac{|f_0 - f'_0|}{f_0} \times 100\% = \frac{|62.4 - 62.207\ 4|}{62.4} \times 100\% = 0.31\% \quad (33)$$

$$\delta \Delta f_{-3\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-3\text{ dB}} - \Delta f'_{-3\text{ dB}}|}{\Delta f_{-3\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|0.84 - 0.883\ 9|}{0.84} \times 100\% = 5.23\% \quad (34)$$

$$\delta \Delta f_{-6\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-6\text{ dB}} - \Delta f'_{-6\text{ dB}}|}{\Delta f_{-6\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.1879 - 1.196\ 5|}{1.187\ 9} \times 100\% = 0.72\% \quad (35)$$

$$\delta \Delta f_{-9\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-9\text{ dB}} - \Delta f'_{-9\text{ dB}}|}{\Delta f_{-9\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.454\ 9 - 1.449\ 8|}{1.454\ 9} \times 100\% = 0.35\% \quad (36)$$

$$\delta \Delta f_{-12\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-12\text{ dB}} - \Delta f'_{-12\text{ dB}}|}{\Delta f_{-12\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.68 - 1.656\ 0|}{1.68} \times 100\% = 1.43\% \quad (37)$$

$$\delta \Delta f_{-15\text{ dB}} = \frac{|\Delta f_{-15\text{ dB}} - \Delta f'_{-15\text{ dB}}|}{\Delta f_{-15\text{ dB}}} \times 100\% = \frac{|1.878\ 3 - 1.825\ 3|}{1.878\ 3} \times 100\% = 2.82\% \quad (38)$$

$$\begin{aligned}\delta\Delta f_{-18\text{ dB}} &= \frac{|\Delta f_{-18\text{ dB}} - \Delta f'_{-18\text{ dB}}|}{\Delta f_{-18\text{ dB}}} \times 100\% = \\ &= \frac{|1.9828 - 1.9830|}{1.9828} \times 100\% = \\ &= 0.01\% \quad (39)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta\Delta f_{-21\text{ dB}} &= \frac{|\Delta f_{-21\text{ dB}} - \Delta f'_{-21\text{ dB}}|}{\Delta f_{-21\text{ dB}}} \times 100\% = \\ &= \frac{|2.1408 - 2.1424|}{2.1408} \times 100\% = \\ &= 0.07\% \quad (40)\end{aligned}$$

式中： f_0 、 $\delta\Delta f_{-3\text{ dB}}$ 、 $\delta\Delta f_{-6\text{ dB}}$ 、 $\delta\Delta f_{-9\text{ dB}}$ 、 $\delta\Delta f_{-12\text{ dB}}$ 、 $\delta\Delta f_{-15\text{ dB}}$ 、 $\delta\Delta f_{-18\text{ dB}}$ 和 $\delta\Delta f_{-21\text{ dB}}$ 为 SAW 式 WTP 的理论性能参数； f'_0 、 $\Delta f'_{-3\text{ dB}}$ 、 $\Delta f'_{-6\text{ dB}}$ 、 $\Delta f'_{-9\text{ dB}}$ 、 $\Delta f'_{-12\text{ dB}}$ 、 $\Delta f'_{-15\text{ dB}}$ 、 $\Delta f'_{-18\text{ dB}}$ 和 $\Delta f'_{-21\text{ dB}}$ 为该器件的实测性能参数。

对比两器件的相对误差系数可发现，指条尺寸经制造误差校正模型校正的 SAW 式 WTP 性能参数的相对误差系数都小于对应未校正的器件，因此，本文介绍的制造误差校正模型可用于设计制作输出精度高的 SAW 式 WTP。

5 结束语

本文介绍了 SAW 式 WTP 的制造误差校正模型。理论和实验结果表明，经该模型校正后的器件的性能参数的相对误差系数远小于未经该模型校正的器件，因而，本文介绍的 SAW 式 WTP 具有显著的理论意义和应用价值。

参考文献：

- [1] WANG Z, BALOG R S. Arc fault and flash signal analysis in DC distribution systems using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1955-1963.
- [2] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [3] ABBATE A, KOAY J, FRANKEL J, et al. Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: application to ultrasonic flaw detection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferro-

- electrics, and Frequency Control, 1997, 44(1): 14-26.
- [4] JAIN S K, SINGH S N. Low-order dominant harmonic estimation using adaptive wavelet neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 428-435.
- [5] 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 on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62(2): 119-123.
- [6] MADISHETTY S K, MADANAYAKE A, CINTRA R J, et al. Precise VLSI architecture for AI based 1-D/2-D Daub-6 wavelet filter banks with low adder-count[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(7): 1984-1993.
- [7] ZHANG W, JIANG Z, GAO Z, et al. An efficient VLSI architecture for lifting-based discrete wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2012, 59(3): 158-162.
- [8] PARCA G, TEIXEIRA P, TEIXEIRA A. All-optical image processing and compression based on Haar wavelet transform[J]. Applied Optics, 2013, 52(12): 2932-2939.
- [9] LU W, ZHU C, LIU J, et al. Implementing wavelet transform with SAW elements[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2003, 46(6): 627-638.
- [10] 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.
- [11] LU W, GAO L, LIU Q, et al. Electrode-width-weighted wavelet transform processor using SAW devices[J]. Microelectronics International, 2017, 34(2): 75-83.
- [12] LEI B, LU W, ZHU C, et al. Optimization of sensitivity induced by substrate strain rate for surface acoustic wave yarn tension sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4769-4776.
- [13] LEI B, LU W, ZHU C, et al. A novel optimal sensitivity design scheme for yarn tension sensor using surface acoustic wave device[J]. Ultrasonics, 2014, 54(6): 1649-1655.