文章编号:1004-2474(2019)04-0493-04

SAW 式 WTP 输入及输出阻抗匹配研究

刘守兵1,卢文科2

(1.河南工程学院 电气信息工程学院,河南 郑州 451191;2.东华大学 信息科学与技术学院,上海 201620)

摘 要:由于组成声表面波(SAW)式小波变换处理器(WTP)的叉指换能器的等效电路是一个三端口网络,因 而其插入损耗和三次渡越反射都与输入、输出阻抗有关且相互影响。为此,在将该芯片用于电子系统中时,必须对 其输入、输出阻抗匹配进行研究,以在抑制其多次声波反射的同时保证其插入损耗尽可能地低。因此,该文提出了 利用 SAW 式 WTP 的导纳矩阵计算其输入、输出阻抗,并由此设计其匹配网络的方法。理论研究和实验结果表 明,利用这种方法设计的 SAW 式 WTP 的匹配网络,可以使该器件的插入损耗降低 30%以上。

关键词:声表面波;小波变换处理器;输入及输出阻抗匹配;导纳矩阵;通道分割法

中图分类号:TN384 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2019.04.008

Study on the Input and Output Impedance Matching in SAW-type WTP

LIU Shoubing¹, LU Wenke²

(1. School of Electrical Information Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

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

Abstract: Since the equivalent circuit of the interdigital transducer (IDT) that constitutes the SAW-type wavelet transform processor (WTP) is a three-port network, the insertion loss and triple transit of the SAW-type WTP are both related to input and output impedance and interact with each other. For this reason, when using this chip in an electronic system, it is necessary to study its input and output impedance matching to suppress its multiple acoustic reflections while ensuring its insertion loss is as low as possible. Therefore, this paper proposes a method of calculating the input and output impedance of the SAW-type WTP by using the admittance matrix and designing its matching network. The theoretical study and experimental results show that the SAW-type WTP matching network designed the proposed method can reduce the insertion loss by more than 30 %.

Key words: surface acoustic wave(SAW); wavelet transform processor(WTP); input and output impedance matching; admittance matrix; channel segmentation method

0 引言

声电式小波变换处理器(WTP),特别是声表面 波(SAW)式WTP不但能对信号进行小波变换^[1], 且还具有独有的体积小,结构简单和性能可靠等优 点^[2],因而其在气体检测、水位测量、雷达目标识别 等领域得到广泛的应用^[3-6]。为此,研究人员设计了 一系列性能优良的SAW式WTP^[7-8]。但是,组成 这些SAW式WTP的叉指换能器(IDT)的等效电 路是一个三端口网络,其插入损耗和三次渡越反射 都与输入、输出阻抗有关^[9]。若直接将该芯片用于 电子系统中,受三次渡越反射的影响,其通带将会产 生波纹,进而将该波纹引入转换后的信号中。为此, 必须对SAW式WTP的输入、输出阻抗匹配进行研 究。

求取 SAW 式 WTP 的输入、输出阻抗的方法很 多,但大多需要借助测量器具实现^[9]。为此,本文拟 采用导纳矩阵来求取其输入、输出阻抗,进而由其设 计相应的匹配网络。采用这种方法求取 SAW 式 WTP 的输入、输出阻抗,必须先求出该器件的导纳 矩阵。但现有的导纳矩阵计算方法由于只能求取两 IDT 都未加权的 SAW 器件的导纳矩阵,而无法将 其直接用于一个 IDT 加权的 SAW 式 WTP 的导纳 矩阵^[10]。为此,本文引入了通道分割法^[11],将一个 IDT 加权的 SAW 式 WTP 转换成一系列可等效为 两 IDT 均未加权的 SAW 器件的平行通道,进而由 每个通道的导纳矩阵求取整个 SAW 式 WTP 的导 纳矩阵,并由其求取该器件的输入、输出阻抗,设计

收稿日期:2018-11-21

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,讲师,博士,主要从事声表面波器件设计与应用的研究。E-mail:liushoubing@haue.edu.cn。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研究。E-mail:luwenke1149182@163.com。

其匹配网络。

1 SAW 式 WTP 的原理与设计

Morlet 小波函数的时域表达式^[12]为

$$\psi_{s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{s})^{2}} e^{j2\frac{f_{0}}{\pi_{s}t}}$$
(1)

式中:s为小波函数的尺度; f_0 为其中心频率;t为时间。

根据式(1),小波函数的包络函数[13]为

$$E_{s}(t) = \sqrt{\psi_{s}^{2}(t) + \psi_{s}^{2}(t)} = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{s})^{2}}$$
(2)

式中 $\dot{\phi}_{s}(t) = \phi_{s}(t) * \frac{1}{\pi t} \Rightarrow \phi_{s}(t)$ 的希尔伯特变换,* 为卷积运算。

经过大量的研究^[14-15]可发现,如果按照式(2) 设计 SAW 器件的输入 IDT 指条重叠包络,而输出 IDT 采用指条相等重叠、均匀周期的电极结构,就 可以设计出一个 SAW 式 WTP。

根据式(2), SAW 式 WTP 的声孔径长度为

$$L_{n}(t) = kE_{s}(t) = \frac{k}{\sqrt{s}}e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{s})^{2}} = \frac{k}{\sqrt{s}}e^{-\frac{1}{2}(\frac{n-1}{4sf_{0}})^{2}}$$
(3)

式中:n为指条编号;k为声孔径长度与对应包络值 比值的常数。

2 SAW 式 WTP 的导纳矩阵

2.1 两 IDT 均为加权的 SAW 器件的导纳矩阵

SAW 器件在电子系统中应用时的连接示意图 如图 1 所示。将 1 个内阻抗为 Z_s 的电压源 (V_{in})连 接到输入 IDT 上,负载 Z_L 连接到输出 IDT 上。从 电信号传输的角度来看,该器件可等效为 1 个信号 变换器件,可用二端口网络表示,则有

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \tag{4}$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \tag{5}$$

式中: y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 和 y_{22} 为该二端口网络的导纳参数; V_1 、 I_1 、 V_2 、 I_2 分别为输入电压、输入电流、输出电压、输出电流。



对于两个 IDT 都未加权的 SAW 器件,这些导 纳参数可通过下式计算:

$$y_{11} = 8N_1^2 \boldsymbol{G}_0 \left[\frac{\sin(N_1 \pi \Delta \omega / \omega_0)}{N_1 \pi \Delta \omega / \omega_0} \right]^2 + j \omega N_1 C_s$$
(6)

$$y_{21} = y_{22} = 8N_1N_2G_0 \frac{\sin(N_1\pi\Delta\omega/\omega_0)}{N_1\pi\Delta\omega/\omega_0} \cdot \frac{\sin(N_2\pi\Delta\omega/\omega_0)}{N_2\pi\Delta\omega/\omega_0} e^{j\Phi}$$

$$y_{22} = 8N_2^2G_0 \left[\frac{\sin(N_2\pi\Delta\omega/\omega_0)}{N_2\pi\Delta\omega/\omega_0}\right]^2 + j\omega N_2C_s$$
(7)

式中: N_1 为输入 IDT 的指对数; N_2 为输出 IDT 的 指对数; $G_0 = \omega_0 C_s K^2 / (2\pi)$ 为 SAW 器件的特性导 纳矩阵, K^2 为基片材料的机电耦合系数; $\omega_0 = 2\pi v_s / L$ 为声同步角频率, v_s 为 SAW 在基片材料自由表面 的传播速度,L 为 1 个叉指周期的长度; C_s 为一对叉 指的静态电容; $\Delta \omega = \omega - \omega_0$ 和 Φ 为由两 IDT 的中心 距造成的相位角;j 表示该部分为复数的虚部。

根据式(4)~(8)即可得到 SAW 器件的导纳矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.2 SAW式 WTP 的导纳矩阵

由于 SAW 式 WTP 的输入 IDT 采用切趾加权 的电极结构(见图 2),因而我们无法直接采用式 (6)~(9)计算出该器件的导纳矩阵。为此,我们引 入 Tancrell 和 Holland 两位学者首创的通道分割 法,并通过这种方法将 SAW 式 WTP 分割成一系列 平行的通道,如图 2 所示。图 2 中,通道由水平折线 标识,而通道边缘由电极边缘标识。每个通道都可 以看作是一个两 IDT 均未加权的 SAW 器件,从而 可以利用式(6)~(9)求出每个通道的二端导纳 矩阵。



图 2 SAW 式 WTP 的结构示意图

若一个 SAW 式 WTP 的输入 IDT 的指条对数 为 N_{sr},输出 IDT 的指条对数为 N_{sc},根据图 2,并经 适当的数学推导,可得到以下结论:

该 SAW 式 WTP 可分割的平行通道个数为

$$N_{\rm td} = N_{\rm sr} \tag{10}$$

当通道个数 N_{td} 为奇数时:

对于每个通道,其输入 IDT 的指条对数为

(8)

$$N(i) = egin{cases} 2i \ N_{
m td} \ 2(N_{
m td}-i)+1 \ 1 \end{cases}$$

式中i为通道编号。

$$W(i) = \begin{cases} (L_{2i-1} - L_{2i+1})/2 \\ (L_{N_{td}-1} + L_{N_{td}})/2 \\ (L_{2(N_{td}-i)} + L_{2(N_{td}-i)+2})/2 \\ (L_1 - L_2)/2 \end{cases}$$

式中L为SAW式WTP输入IDT中编号为i的指 条重叠包络的长度。

$$N(i) = \begin{cases} 2i & i < 0.5N_{td} \\ 2(N_{td} - i) + 1 & 0.5(N_{td} + 1) < i < N_{td} \\ 1 & \text{I} \\ \end{bmatrix}$$
(1)

对于每个通道,其声孔径长度为

$$W(i) = \begin{cases} (L_{2i-1} - L_{2i+1})/2 \\ (L_{2(N_{td}-i)} + L_{2(N_{td}-i)+2})/2 \\ (L_1 - L_2)/2 \end{cases}$$

若周期段内单位长度指条的静态电容为 C_0 ,则 由式(12)、(14)可计算出一对叉指的静态电容为

$$C_{\rm s}(i) = C_0 W(i) \tag{15}$$

将式(11)、(13)和(15)代入式(6)、(7)和(8)中, 即可得到每个通道的导纳矩阵。

依据二端口网络的简化原则,可求得整个 SAW 式 WTP 的导纳矩阵为

$$\mathbf{Y} = \sum_{i=1}^{N_{\rm td}} Y_i \tag{16}$$

3 SAW 式 WTP 的输入及输出阻抗匹配

综上所述可知,SAW式WTP可等效为一个二 端口网络,且已算出该二端口网络的导纳矩阵。根 据二端口网络的性质,由 SAW 式 WTP 的导纳矩阵 可计算出其输入、输出阻抗为

$$Z_{\rm s} = \operatorname{conj}\left[\frac{1}{y_{11}(f_0)}\right] \tag{17}$$

$$Z_{\rm L} = \operatorname{conj}\left[\frac{1}{y_{22}(f_0)}\right] \tag{18}$$

式中 conj(•)为共轭运算。

利用式(17)、(18)求取的输入、输出阻抗即可设 计出 SAW 式 WTP 的匹配网络。

4 方案论证与讨论

为了验证本文提出的 SAW 式 WTP 的输入、输 出阻抗匹配方案,本文专门设计了 SAW 式 WTP 的

$$i < 0.5(N_{td} + 1)$$

$$i = 0.5(N_{td} + 1)$$

$$0.5(N_{td} + 1) < i < N_{td}$$

$$111$$

对于每个通道,其声孔径长度为

$$i < 0.5(N_{td} + 1)$$

$$i = 0.5(N_{td} + 1)$$

$$0.5(N_{td} + 1) < i < N_{td}$$
(12)

其他

当 N_{td} 为偶数时: 对于每个通道,其输入 IDT 的指条对数为

$$< 0.5N_{td}$$

. $5(N_{td} + 1) < i < N_{td}$ (13)

$$i \leq 0.5N_{td}$$

0.5(N_{td} + 1) < $i < N_{td}$ (14)

其他

参数如表1所示。表中 ε∞ 为介电常数。 表1 SAW式WTP的设计参数

基片	$V_{ m s}/$		$f_{\scriptscriptstyle 0}/$	$W^{2} / 0 /$	$\epsilon_{\circ\circ}$ /
材料	$(m \cdot s^{-1})$	5	MHz	Λ^{-}/γ_{0}	$(\mathrm{pF}\boldsymbol{\cdot}\mathrm{cm}^{-1})$
X-112° Y	3 295	0.314 9	62.4	0.75	4.4
LiTaO ₃					

根据式(3)可设计出上述 SAW 式 WTP,并得 到该器件的 N_s和每根指条的 L_i,进而可由式 (10)~(15)算出该 SAW 式 WTP 分割的平行通道 数 N_{td} ,每个通道内输入 IDT 的指条对数 N(i)和一 对叉指的静态电容 $C_s(i)$ 。由这些参数利用式 $(6) \sim (8)$ 计算出每个通道的导纳矩阵 Y_i ,进而可由 式(16)计算出整个 SAW 式 WTP 的导纳矩阵,即

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0.078 + j0.135 & 0.027 \\ 0.027 & 0.010 + j0.056 \end{bmatrix}$$
(19)

与此同时,我们还实际制作了 SAW 式 WTP, 并利用文献[4]提供的方法实际测量了该器件的导 纳矩阵,则有

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0.070 + j0.140 & 0.030 \\ 0.030 & 0.012 + j0.049 \end{bmatrix}$$
(20)

对比式(19)、(20)可知,理论计算的导纳矩阵与 实测的导纳矩阵相比,其误差基本可忽略,能满足理 论研究和应用的精度要求。

将式(19)代入式(17)、(18),即可得到该 SAW

式 WTP 的输入、输出阻抗为

$$Z_{\rm s} = 3.209 + j5.553 \tag{21}$$

$$Z_{\rm L} = 3.\,090 + j17.\,305 \tag{22}$$

利用式(21)、(22)可设计出该器件的匹配网络。

采用文献[16]可测量出匹配前、后的 SAW 式 WTP 的插入损耗分别为 31.6 dB 和 19.2 dB,降低 了 39.2%。

5 结束语

本文对 SAW 式 WTP 的输入、输出阻抗匹配 进行了研究。为了求取匹配网络中需要的输入、 输出阻抗,本文首先根据通道分割法将 SAW 式 WTP 分割成一系列可等效为两 IDT 都未加权的 SAW 器件的平行通道,并首次给出通道数、各通 道输入 IDT 的指条对数和一对叉指的静态电容; 然后根据这些参数计算出各个通道的导纳矩阵和 整个 SAW 式 WTP 的导纳矩阵;最后根据这个导 纳矩阵计算出该器件的输入、输出阻抗,并对该阻 抗的 SAW 式 WTP 的插入损耗的影响进行了验 证。理论研究和实验结果表明,利用这种方法设 计的 SAW 式 WTP 的匹配网络,可以使该器件的 插入损耗降低 30%以上,因而其具有显著的理论 意义和应用价值。

参考文献:

- [1] CHUI C K. An introduction to wavelets [M]. San Diego: Academic Press, 2014.
- [2] LU W,GAO L,ZHANG J, et al. A novel electrode-area-weighted method of implementing wavelet transform processor with surface acoustic wave device[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2016,44(12):2134-2146.
- [3] LU W,ZHU C,KUANG L,et al. Implementing singlescale wavelet transform processor with magnetostatic surface wave device[J]. Science China Technological Sciences, 2011,54(6): 1439-1444.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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 on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62(2):119-123.

- [7] LU W, ZHU C, ZHANG J, et al. Study of small size wavelet transform processor and wavelet inverse-transform processor using SAW devices[J]. Measurement, 2011,44(5):994-999.
- [8] LU W,ZHU C,KUANG L, et al. Solution to the influence of the MSSW propagating velocity on the bandwidths of the single-scale wavelet-transform processor using MSSW device[J]. Ultrasonics, 2012, 52(1):145-150.
- LI H, TIAN Y, KE Y, et al. Analysis of Rayleigh surface acoustic waves propagation on piezoelectric phononic crystal with 3-D finite element model[C]//S. l. : In Ultrasonics Symposium(IUS), 2014 IEEE International, 2014: 2533-2536.
- [10] HASHIMOTO K. Surface acoustic wave devices in telecommunications[M]. Germany: Springer, 2010.
- [11] MORGAN D. Surface acoustic wave filters; with applications to electronic communications and signal processing[M]. San Diego; Academic Press, 2010.
- [12] 刘守兵,卢文科. SAW 式小波变换处理器的制造误差 校正模型[J]. 压电与声光,2018,40(1):5-10.
 LIU S B, LU W K. Manufacturing error correction model of the wavelet transform processor using surface acoustic wave devices[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2018,40(1):5-10.
- [13] SELESNICK I W. Hilbert transform pairs of wavelet bases[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001,8(6): 170-173.
- [14] LU Wenke, ZHU Changchun. Solving three key problems of wavelet transform processor using surface acoustic wave devices[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11):3801-3806.
- [15] 刘守兵,卢文科. 声表面波小波处理器的计算机模拟与 仿真[J]. 压电与声光,2017,39(4):531-534.
 LIU S B,LU W K. Computer modeling and simulation of wavelet processor using surface acoustic wave devices[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2017,39(4): 531-534.
- [16] 文常保,姜燕妮,马琼,等. 声表面波器件输入及输出负载阻抗匹配研究[J]. 电子器件,2017,40(2):400-404.
 WEN C B, JIANG Y N, MA Q, et al. Research on the input and output load impendance matching in SAW device measurement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2017,40(2):400-404.