

單方向表面聲波濾波器之研究

The Design of Unidirection Surface Acoustic Waves Filters

王裕玄(Yu-Hsuan Wang)¹, 羅如燕(Ruyen Ro)², 廖坤厚(Kun-Hou Liao)³, 朱致永
(Chu Chih Yung)⁴, 曾志瑋(Chih-Wei Tseng)⁵

¹ 空軍航空技術學院行政科長兼任講師

² 義守大學通訊工程系教授兼任系主任

³ 空軍航空技術學院軍事氣象系系主任

^{4,5} 空軍航空技術學院行政官

^{1,4,5} Administration Section, Air Force Institute of Technology

² Department of Communication Engineering, I Shou University

³ Department of Military Meteorology, Air Force Institute of Technology

摘要

單方向表面聲波濾波器主要組成為單方向叉指換能器(SPUDT)，單方向叉指換能器能控制其傳輸能量方向，其中反射柵欄為控制頻寬因素。本文設計之窄頻帶單方向表面聲波濾波器，需要使用一有限長度脈衝響應(Finite Length Impulse Response, FIR)的視窗函數來抑制旁波帶，並運用柴比雪夫視窗函數，用以調變電極重疊寬度。文中運用耦合理論配合傳輸矩陣法計算出元件之頻率響應，且觀察單方向叉指換能器內之叉指換能器與反射柵欄間的間距，對頻帶寬度、插入損耗及鏈波的影響，以及單方向叉指換能器之細胞數(Cell)對濾波器散射特性之影響，設計一窄頻帶及低插入損耗之中頻濾波器。

關鍵字：單方向叉指換能器，有限長度脈衝響應，柴比雪夫視窗函數

Abstract

The scattering characteristics of the unidirection surface acoustic wave filter are investigated in this thesis. The unidirection surface acoustic wave filter consists of the single phase unidirection interdigital transducers (SPUDT). The SPUDT is composed of interdigital transducers (IDT) and reflection gratings. The SPUDT controls the direction of transmission energy, while the reflection grating controls the bandwidth. In my design, to create a narrow band the unidirection surface acoustic wave filter, a finite length impulse response (FIR) windows function is used to suppress sidelobe, in which, Chebyshev function is also used to modulate electrode overlap. In this thesis, coupling of modes is applied with transmission matrix method to calculate the frequency response. Also, we can observe the effect on bandwidth, inserting loss and chainwave from the gap between IDT and gratings,

and the effect of on scattering characteristics from SPUDT cell. Results obtained in this thesis can be employed to design IF filters which are applicable for wireless communication systems.

Keywords : SPUDT , Finite Length Impulse Response , Chebyshev function

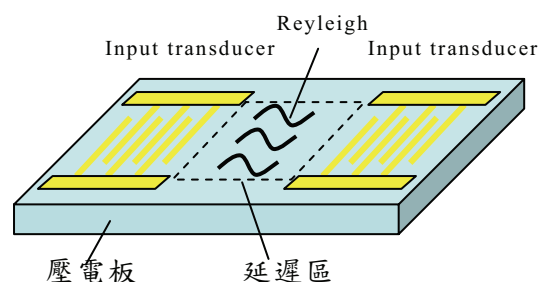
一、前言

因為微機電半導體工業的發展及無線通訊的蓬勃發展，高頻微波元件已成發展的重心。表面聲波 (Surface Acoustic Waves, SAW) 濾波器係應用微機電技術中之壓電材料電耦合特性，在通訊及軍事雷達導航運用上有其特殊用途，如雷達系統之頻譜分析脈波壓縮濾波器，通訊系統中之射頻濾波器。近幾年來對表面聲波元件之研究，因行動通訊工業快速發展，使其大量應用於行動通訊系統中的射頻前端濾波器 (RF Front-End Filter)。表面聲波元件符合上述通訊元件微小化之需求，其具有體積小、材質堅固、成本低及製造容易之優點，利用表面聲波元件來設計一高頻及中頻濾波器極感測器為未來之趨勢，一個濾波器必須具有極低之插入損耗 (Insertion Loss, IL) 以獲得較佳之訊號雜訊比 (S/N)，同時，亦必須具有抑制旁波帶之能力，以濾除不必要之雜訊，未來通訊頻帶相鄰非常接近，因而濾波器之頻帶寬度控制為未來表面聲波通訊元件之發展趨勢。

二、論文內容

2.1 表面聲波元件原理

1885 年，英國科學家 Lord Rayleigh[1]發表由地震的研究中，推論有關表面聲波的敘述，及其波動理論，其原理係為固體的波動，除了剪波與縱波之外，在彈性晶體的表面上尚存在一種形式的波動，稱為表面聲波。此後，許多學者投入表面聲波感測器之研究，此感測器之工作頻率由製作在壓電基板上之叉指換能電極的週期性結構所決定[2]，其基本結構如圖一[3]。



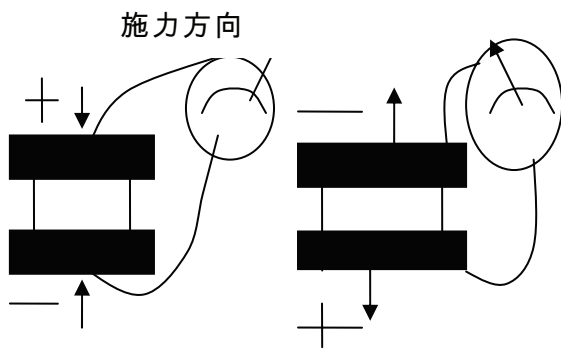
圖一 表面聲波元件基本結構

2.1.1 壓電特性

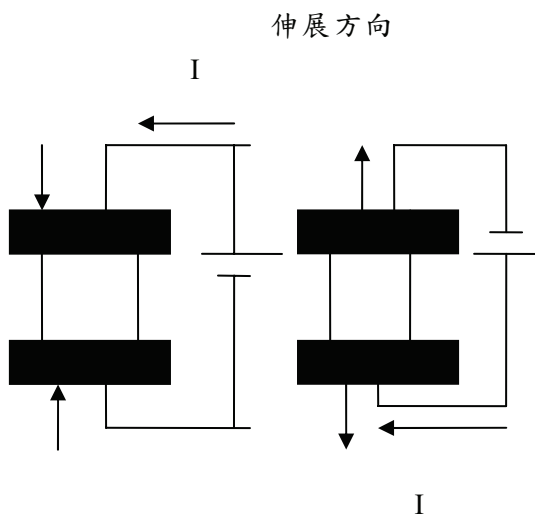
壓電材料多為脆性材料，所以當在應力集中現象時，其極易發生斷裂破壞。而材料中的非連續現象又是引起應力集中現象的直接因素。壓電材料常見的非連續現象有三種形式，即幾何非連續（裂紋）、物理非連續（夾雜）和載荷非連續（集中載荷）；此三種非連續現象會引起的線彈性斷裂問題，即裂紋問題、夾雜問題以及 Green 函式 (Green 定理之物理意義為「守恆律」) 問題，即能量不連續時必須從邊界流出而造成材料斷裂。

壓電效應 (Piezoelectric Effect)，壓電效應發生在壓電晶體上，當壓電晶體的兩側外加一震盪電壓，晶體體積形狀會隨著外加電壓產生快速地縮收與舒張，晶體的震波傳出而產生音波。相對的，從介質返回的振盪音波衝擊到晶體時，迫使晶體的體積形狀產生舒張與縮收，隨著晶體的交互舒張與縮收，晶體兩側產生振盪電壓。透過壓電晶體由電發聲、聲生電的現象稱為壓電效應。所謂壓電效應有兩種：正壓電效應 (Direct Piezoelectric Effect) 及逆壓電效應 (Converse Piezoelectric Effect)。當對壓電材料施加壓力時，壓電材料體內之電偶極矩會因壓縮而變短。此時，壓電材料為了

抵抗此種趨勢，將會產生電壓以保持原狀態，也會在表面形成正、負電荷，此種現象稱正壓電效應（如圖二）。反之，當壓電材料受到外加電場作用時，電偶極矩會被拉長，壓電材料會沿電場方向伸長，此即將電能轉換為機械能，此種現象稱逆壓電效應（如圖三）。



圖二 正壓電效應



圖三 逆壓電效應

2.1.2 表面聲波元件之應用

壓電材料的應用廣泛，有高強度聲波及超聲波 (High-Intensity Sonic and Ultrasonic) 之聲納投射器 (Sonar Projector)、低強度聲源 (Low Intensity Sound Sources) 之空氣轉換器 (Air Transducer)、高脈衝產生器 (High Voltage Pulse Generator) 之點火器 (Igniter)、感測元件 (Sensor) 之微音器 (Microphone)、非轉換器

元件 (Non Transducer Devices) 之濾波器 (Filter)、定位元件 (Positioning Devices) 之超聲波馬達 (Ultrasonic Motor) [4]；現代之應用有噴墨列印技術：係利用壓電陶瓷因施加電壓產生形變；在通訊領域所需的寬頻表面聲波濾波器及雙工器，使用具有較佳機電耦合係數 (Electromechanical Coupling Coefficient, K^2) 的鈮酸鋰 (Lithium Niobate, LiNbO_3) 和 鉭酸鋰 (Lithium Tantalate, LiTaO_3)，但其缺點為過大之頻率溫度係數 (Temperature Coefficient of Frequency, TCF)，使得以鈮酸鋰和鉭酸鋰所製作的元件容易受到溫度變化穩定性，但其適合製作溫度感測器，而共振器則使用溫度係數幾乎為零、較低機電耦合係數與高 Q 值之 ST-石英 (ST-Quartz)，但其缺點為表面聲波波速不高，難以製作高頻元件 [5]。

表面聲波元件，係由壓電材料為基板，其必須考量之性質為頻率溫度係數穩度、較大之機電耦合係數及高表面聲波波速 [6]，其中之反射柵欄及叉指換能器為壓電材料之壓電性應用，因此，對表面聲波元件之分類及運用理應了解，其應用為

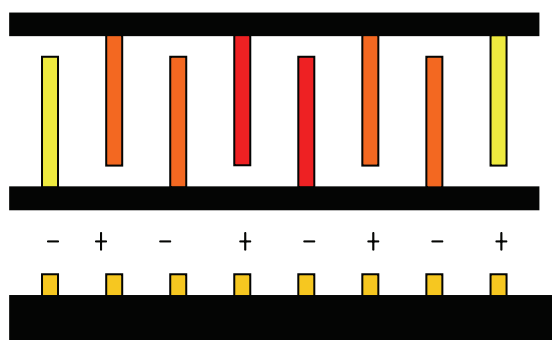
- (1) 濾波器：無線電話、行動電話、有無線數據機、無線區域網路系統。
- (2) 共振器：汽車防盜器、遙控器、電視轉頻器、無線耳機、無線鍵盤。
- (3) 延遲線：頻散及非頻散多接點表面聲波延遲線。
- (4) 振盪器：相鎖迴路控制石英晶體振盪器、表面聲波振盪器。
- (5) 感測元件：感測器 [5]

應用最廣泛為濾波器，表面聲波 (Surface Acoustic Wave, SAW)，傳統上又稱 Rayleigh wave 以紀念 Lord Rayleigh 於 1885 年發現此一物理現象，是一種獨特的機械波，其沿著晶體表面行進時，在垂直晶體表面的方向，能量會以指數形式衰減，當深入超過一個 λ 深度時，能量密度則降為在表面之十分之一，所傳遞之機械能量百分之九十集中於一波長左右 [6]，因此，

Rayleigh wave 在晶體表面行進時能量能夠集中於表層。這種獨特的性質，使得表面聲波元件可以很容易地運用其所攜帶之能量。

2.1.3 表面聲波產生方式

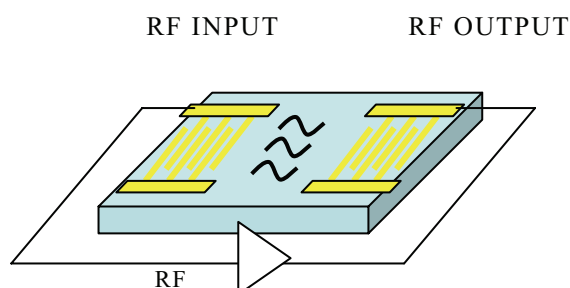
產生表面聲波的方式，就是利用叉指換能器直接激發表面聲波如圖四，叉指換能器分為輸入及輸出兩個部份，其為一層厚度約 $2000\text{\AA}$ 至 $3500\text{\AA}$ 的鋁薄膜（鋁電極），經由光蝕刻（Photolithography）技術成型於壓電單晶材料之基板表面。當一個訊號電壓外加到輸入換能器的正負電極上時，在每對叉指（Finger）之間就會建立電場，壓電基板表面一受到電場的作用，便產生同步耦合之上下振動，而激發出表面聲波。當同極叉指間的距離等於表面聲波波長時，所激發的表面聲波效率最大。



圖四 IDT 的結構

表面聲波元件之工作原理為壓電材料表面鍍兩片電極，電源信號由其中一電極輸入，這時壓電材料表面，會產生相同頻率的聲波，傳到另一電極時取出訊號。聲波的振幅及相位完全決定於這兩片電極的幾何形狀（如圖五）。其工作原理為將射頻訊號由輸入至 RF INPUT，並轉換成聲波訊號，經過壓電基板傳遞一段距離之後，再由接收之聲波訊號之 RF OUTPUT 轉換成所需的射頻訊號[7]，通常下列參數可決定 SAW 元件的特性：叉指狀電極（IDT）幾何圖形與數量、柵狀電極（Grating）幾何圖形與數量、金屬化比值（Metallization Ratio）、叉指狀電極重疊寬度、膜厚波長比值（Thickness/Wavelength Ratio）及叉指狀電

極與柵狀電極之間的間距（Gap）等。

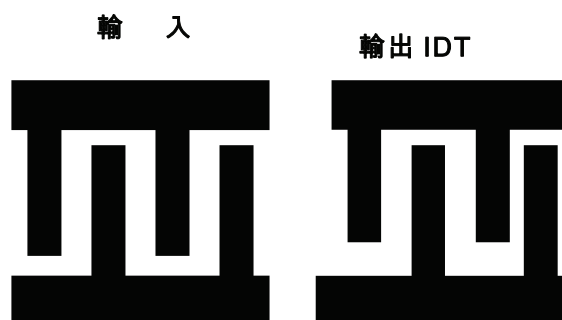


圖五 表面聲波原理與量測技術

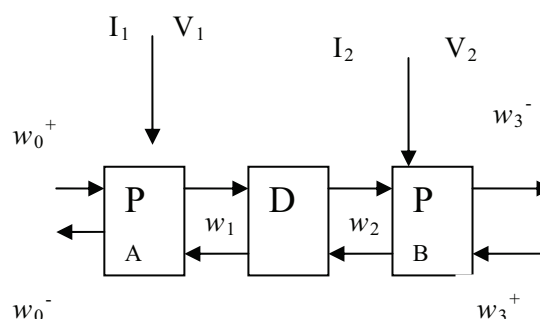
2.2 單方向表面聲波濾波器之設計

2.2.1 表面聲波濾波器之基本結構

表面聲波濾波器基本結構(如圖六)，使用傳輸矩陣法 (Transmission Matrix Method) 分析表面聲波濾波器之頻率響應，矩陣示意圖為(如圖七)。



圖六 表面聲波濾波器基本結構



圖七 表面聲波濾波器矩陣示意圖

表面聲波濾波器聲能與電能之關係如下，

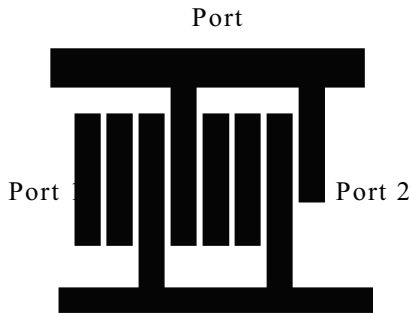
$$\begin{bmatrix} w_0^+ \\ w_0^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11A} & P_{12A} \\ P_{21A} & P_{22A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11B} & P_{12B} \\ P_{21B} & P_{22B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_3^+ \\ w_3^- \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} P_{13A} \\ P_{23A} \end{bmatrix} V_1 + \begin{bmatrix} P_{11A} & P_{12A} \\ P_{21A} & P_{22A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{13B} \\ P_{23B} \end{bmatrix} V_2$$

經由如上計算，可以模擬分析濾波器的特性。

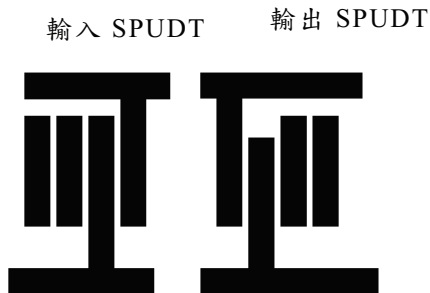
2.2.2 單方向表面聲波濾波器之特性分析

單方向表面聲波濾波器主要架構為單方向又指換能器(SPUDT)[8][9]，大多數運用於行動電話的低損耗中頻(IF)及射頻(RF)濾波器，其基本結構(如圖八)。而單方向又指換能器又由又指換能器、延遲線及反射柵欄所構成，因而須對此三者分析之。

一般的單方向表面聲波濾波器(SPUDT Filter)(如圖九)，在輸入單方向又指換能器中左邊為反射柵欄，右邊為又指換能器，因此，波的傳導方向向右邊傳輸，輸出單方向又指換能器中右邊為反射柵欄，左邊為又指換能器，所以，波的傳導方向向左傳輸。



圖八 單方向又指換能器結構



圖九 一般單方向表面聲波濾波器

2.2.2.1 延遲線之傳輸矩陣

所謂延遲線是指反射柵欄與又指換能器或又指換能器間的距離，對單方向又指換能器而言，反射柵欄與又指換能器間之延遲線決定聲波的相位，其傳輸矩陣[D]如下：

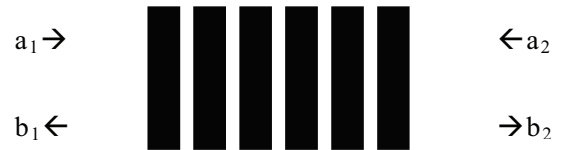
$$\begin{bmatrix} W_{i-1}^+ \\ W_{i-1}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\beta d} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_i^+ \\ W_i^- \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} e^{j\beta d} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta d} \end{bmatrix}$$

此時， $\beta = 2\pi/\lambda$ 為波傳常數， λ 為表面聲波波長， d 為延遲距離，延遲距離主要可以調變相位平移。

2.2.2.2 反射柵欄之傳輸矩陣

以耦合理論分析反射柵欄，其結構以開路型為例(如圖十)，



圖十 開路型反射柵欄結構
其矩陣模式為

$$\text{由} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ V \end{bmatrix}$$

2.2.2.3 單方向又指換能器之傳輸矩陣

利用耦合理論 P 矩陣的方法，可以組合計算出如圖八，單方向又指換能器的傳輸矩陣，其中[G]及[D]為 2x2 矩陣，[P_{idt}]為 3x3 矩陣，[G]及[D]與[P_{idt}]運算前必須轉換成 3x3 矩陣；濾波器單一細胞之輸入傳輸矩陣與輸出傳輸矩陣，各表示如下：

$$[P_{in}]_{cell} = [G] * [D] * [P_{idt}]$$

$$[P_{out}]_{cell} = [P_{idt}] * [G] * [D]$$

此時[P_{in}]_{cell}，[P_{out}]_{cell}為一單方向又指換能器傳輸矩陣，[G]為反射柵欄傳輸矩陣，[P_{idt}]為又指換能器傳輸矩陣，[D]為延遲線傳輸矩陣。

單方向表面聲波濾波器之輸入傳輸矩陣計算如下：

$$[P_{in}] = [P_{in}]_1 * [D] * [P_{in}]_2 * [D] * [P_{in}]_3 * \dots * [D] * [P_{in}]_n$$

$[P_{in}]_n$ 為一細胞叉指換能器； n 為濾波器輸入傳輸矩陣之細胞數，同理，可以計算出單方向表面聲波濾波器輸出傳輸矩陣如下：

$$[P_{out}] = [P_{out}]_1 * [D] * [P_{out}]_2 * [D] \dots * [D] * [P_{out}]_n$$

$[P_{out}]_n$ 為一細胞叉指換能器； n 為濾波器輸出傳輸矩陣之細胞數。

單方向叉指換能器如結構圖八，由反射柵欄與叉指換能器排列組合，制式的單方向叉指換能器因為反射柵欄反射能量，將能量傳輸至叉指換能器，我們可以比較不同的組合，模擬證明能量是向單方向傳輸。

2.3 單方向表面聲波濾波器之模擬分析

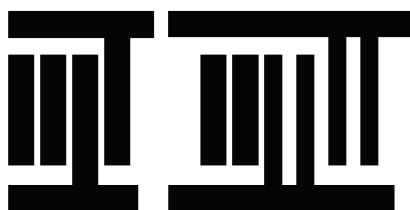
不論是控制系統的設計或通訊系統的設計，大多數必須使用濾波器作為頻帶選擇及能量的控制，在設計單方向表面聲波濾波器時，需要調整的幾何結構參數一般有：輸入叉指換能器之對數、輸出叉指換能器之對數、重疊寬度、反射柵欄之根數，單方向表面聲波濾波器之設計需要特別注意的有二，一為在每一單方向叉指換能器細胞(cell)中反射柵欄與叉指換能器間的距離，一般以 $\lambda/8$ 最佳，另一為電極模式。

2.3.1 單電極與雙電極對單方向表面聲波濾波器之影響

單方向叉指換能器係由反射柵欄與叉指換能器組合而成，每一單方向叉指換能器均會交互反射影響，電極模式如圖十一。

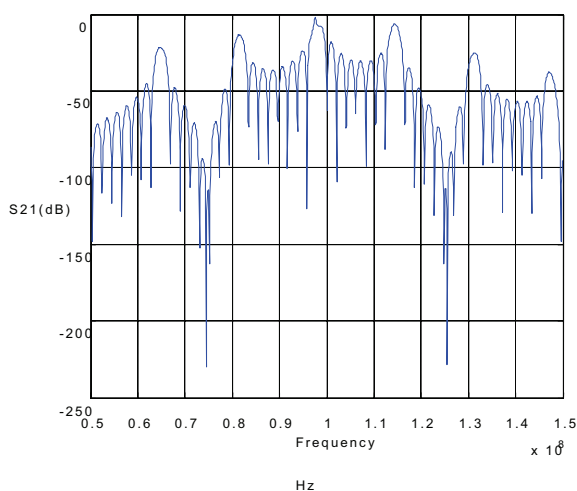
單電極 SPUDT

雙電極 SPUDT

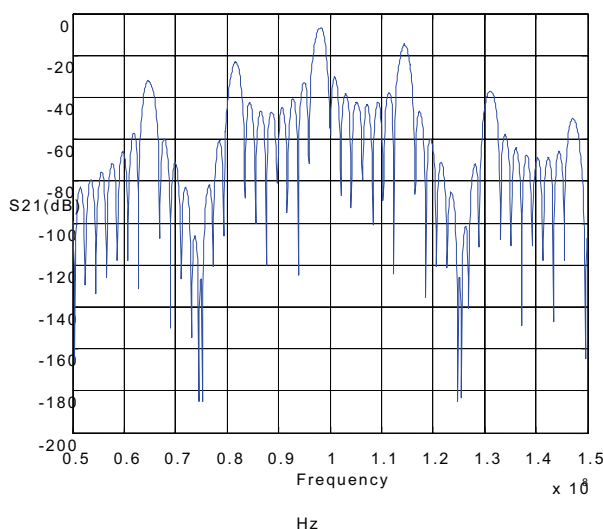


圖十一 單方向叉指換能器電極模式

散射參數 S_{21} 為濾波器之輸出入之傳輸係數，經由模擬比較圖十二及圖十三之 S_{21} ，得知，單電極 SPUDT 對工作頻率雖均能達到 -3dB，但因叉指換能器之差指間電容量較大，三次傳輸干擾較大，通帶鏈波較大，使用雙電極單方向表面聲波濾波器通帶鏈波較小，較平整。



圖十二 單電極單方向表面聲波濾波器



圖十三 雙電極單方向表面聲波濾波器

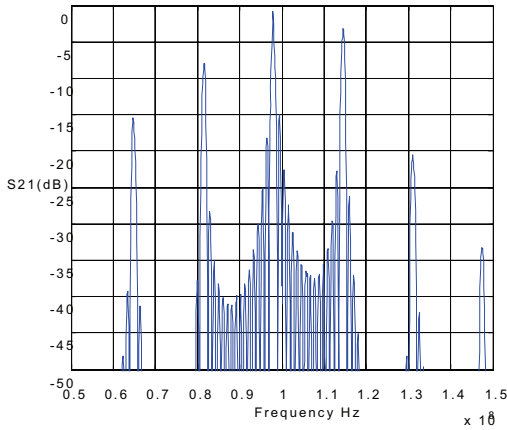
2.3.2 表面聲波梳型濾波器 (SAW Comb Filter) 之設計

一般寬頻帶濾波器無法達到目前多波段傳輸的要求，我們可以使用單方向叉指換能器來設計一低損耗表面聲波梳型濾波器，並運用耦合理論模擬分析其特性，梳型濾波器結構如圖十四，結構中輸入指叉換能器與輸

入指叉換能器均為制式的單方向指叉換能器，又指換能器為分裂雙電極型式 (Split Finger Electrode)，本模擬使用制式結構，反射柵欄使用短路結構，模擬結果如圖十五，本模擬使用反射柵欄 4 根數，又指換能器為分裂型電極數 $N=16$ ，單方向又指換能器共 10 細胞，其工作頻帶寬度為 2.5MHz，符合窄頻帶之要求，且傳輸能量可達-1dB。



圖十四 制式單方向表面聲波梳型濾波器



圖十五 梳型濾波器頻率響應圖

2.3.3 視窗函數應用於表面聲波濾波器之設計

為了設計一具有高旁波帶抑制之制式單方向表面聲波濾波器，需要使用一有限長度脈衝響應 (Finite Length Impulse Response, FIR) 的視窗函數來達成此目的 [10]，以 Chebyshev 視窗函數為設計方向，其表示式如下：

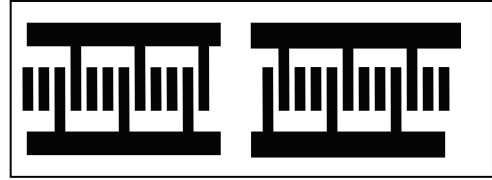
N 階柴比雪夫多項式：

$$T_{N-1} = \begin{cases} \cos[(N-1)\cos^{-1}(z)] & |z| \leq 1 \\ [\text{sgn}(z)]^{N-1} \cosh[(N-1)\cosh^{-1}|z|] & |z| > 1 \end{cases}$$

$$\text{此時， } z = \cosh\left(\frac{\cosh^{-1} r}{N-1}\right) \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)$$

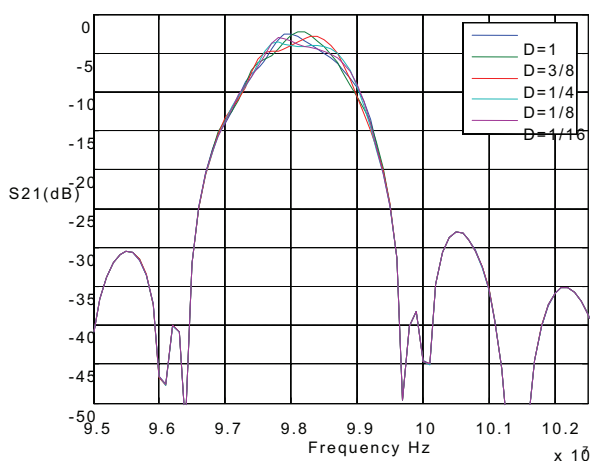
其中， d 是各單元間距離，工作波長為 λ ， θ 是測量角， $r=10^{\text{SLL}/20}$ ，SLL 是預定的旁波辦為準。

運用上述，選取柴比雪夫視窗函數加權係數乘上 IDT 之重疊寬度基數 [11]，來決定單方向又指換能器中每對又指換能器之不同比例重疊寬度，將會對旁波帶抑制與通帶特性產生變化，以設計一單方向表面聲波濾波器，其結構圖為圖十六。



圖十六 柴比雪夫單方向表面聲波濾波器

就單方向表面聲波柴比雪夫調變之濾波器而言，輸出入又指換能器之間距 D 相當重要，其關係元件之頻寬及插入損耗，一般濾波器因三次傳播干擾鏈波於不同之 D 會有二至三個共振點，單方向表面聲波濾波器雖然也有二至三各共振點，但是與一般濾波器比較而言，其較不明顯，圖十七為柴比雪夫單方向表面聲波濾波器之頻率響應圖，圖中在頻率 96.5MHz 至 99.8MHz 之間，共振頻率因 D 之不同有所偏差，圖中 D 值為 λ 、 $3\lambda/8$ 、 $\lambda/4$ 、 $\lambda/8$ 、 $\lambda/16$ 之共振點，濾波器使用單方向又指換能器，改進了一般又指換能器又指間反射相位偏移之缺失， D 為 $3\lambda/8$ 時可以獲得較高之傳輸能量，其值鄰近-3dB，頻帶較窄，但其反射係數 S_{11} 有鏈波產生， D 使用 $\lambda/8$ 或 $\lambda/16$ 時 S_{21} 為-4dB，頻帶較寬，但 $\lambda/8$ 之鏈波比 $\lambda/16$ 小， D 為 λ 時與 $3\lambda/8$ 比較無法獲得較高之傳輸能量。如果不在意傳輸能量-1dB 之差，則可以使用雙共振點之 $D=\lambda/8$ 。



圖十七 在不同 D 值下之頻率響應圖

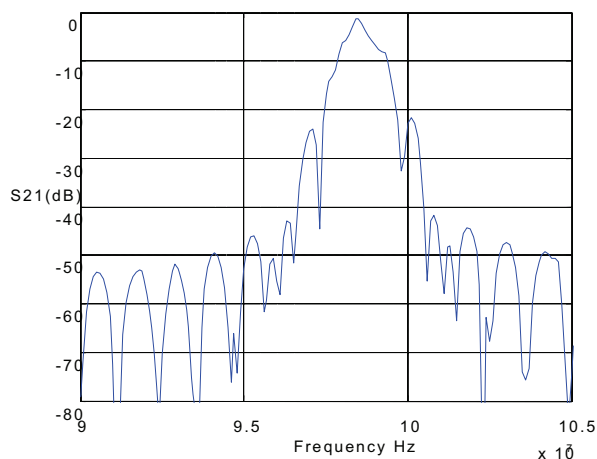
由柴比雪夫單方向表面聲波濾波器之各項參數分析，要設計一良好之單方向表面聲波濾波器，所必須考慮之參數有單方向又指換能器之重疊寬度加權數、單方向又指換能器之反射柵欄根數與又指換能器對數之比值、一細胞內之反射柵欄數、一細胞內反射柵欄與又指換能器間之延遲線寬度、輸出入單方向又指換能器間之延遲線，及輸出入單方向又指換能器之細胞數；而每一細胞數總長以 8λ 為佳，輸出入又指換能器之反射柵欄數比值及 IDT 比值亦須適當調整。

依據分析結果，圖十八設計為

- (1) 輸入又指換能器之每一細胞之又指換能器分裂電極對數為 6 對。
- (2) 輸入又指換能器之每一細胞中反射柵欄數 4 根。
- (3) 細胞內延遲線為 $\lambda/8$ 。
- (4) 細胞數為 10。
- (5) 輸出入又指換能器之間距為 λ 。
- (6) 又指換能器之視窗函數重疊寬度加權為 150λ 。
- (7) 視窗函數頻帶預設為 70dB。
- (8) 輸出又指換能器之每一細胞之又指換能器分裂電極對數為 4 對。
- (9) 輸出又指換能器之每一細胞中反射柵欄數 8 根。

所設計之單方向表面聲波濾波器，其頻

帶寬度為 5MHz，於工作頻率之傳輸係數 S_{21} 達 -0.5dB。



圖十八 單方向表面聲波濾波器頻率響應圖

模擬所設計之單方向表面聲波濾波器得知，設計模式頻帶寬度為 2-4MHz，旁波帶抑制低於 30dB，插入損失小於 -3dB，以上特性使得所設計之單方向濾波器可應用於通訊系統中之中頻濾波器。

三、結論

利用耦合模式求得又指換能器與反射柵欄原理之傳輸矩陣，再配合傳輸矩陣法發展出一新的矩陣型態，此矩陣之各元素均以耦合理論為架構，以計算出濾波器之散射參數，並探討元件之工作特性，運用耦合理論之又指換能器及反射柵欄之傳輸矩陣，來模擬分析以耦合理論及單方向又指換能器 (SPUDT) 為架構之單方向表面聲波濾波器。

應用柴比雪夫視窗函數加權又指換能器之重疊寬度於制式單方向表面聲波濾波器之輸入又指換能器或輸出又指換能器。其輸出入又指換能器間之延遲線寬度並非為 λ ，而是必須配合輸出入又指換能器之反射柵欄根數及其細胞數，要獲得良好之單方向濾波器，所應考量的是又指換能器與反射柵欄之各項參數：重疊寬度加權數、反射柵欄與又指換能器間之寬度、輸出入又指換能器間之寬

度及叉指換能器與反射柵欄數，以上參數須配合得宜，方能設計可用之濾波器。

四、謝誌

本研究感謝義守大學通訊系系主任羅如燕教授指導，同時感謝義守大學通訊系張赫烜博士及東方技術學院電資系吳信賢博士指正，得以使正確數值模擬分析，完成論文。

五、參考文獻

1. Lord Rayleigh, "On wave propagation along the plane surface of an elastic solid," Proc. London Math. Soc. Vol. 7, pp. 4-11, 1885.
2. Donghai Qiao et al., "General Green's function for SAW device analysis," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 46, pp. 1242-1253, 1999.
3. 黃仕泓、柯正浩，"表面聲波感測器之前瞻研究"，物理雙月刊二十三卷六期，2004年6月。
4. 吳朗，"電子陶瓷(壓電)"，全新科技圖書，1994。
5. 吳誌雄，"表面聲波元件—無線通訊之關鍵零組件"，電子月刊第六卷第二期，2000。
6. 郭佩菁，"壓電薄膜系統與表面聲波元件之製作與量測"，國立台灣大學機械工程學系研究所碩士論文，2000年6月。
7. 羅如燕、李明利，"表面聲波在液體負載下之波傳特性"，義守大學電機研究所碩士論文，1997年6月。
8. S. Lehtonen, V. P. Plessky, C. S. Hartmann and M. M. Salomaa, "Unidirectional SAW transducer for gigahertz frequencies," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 50, Issue 11, pp. 1404 - 1406, 2003.
9. G. T. Martin, H. Schmidt and B. Wall, "New SPUDT cell structures," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 51, Issue 7, pp. 858 - 863, 2004.
10. R. Ro, H. Y. Tung and S. J. Wu, "Design of Two-Track SAW Filter with Width-Controlled Reflectors," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, pp. 688-694, 2004.
11. H. Y. Tung and R. Ro, "Frequency Responses of SAW Filter with Two-Track Slanted Finger Interdigital Transducers," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, pp. 4025-4031, 2005.