

低損耗且高選擇性之 3-10GHz 超寬頻帶通濾波器

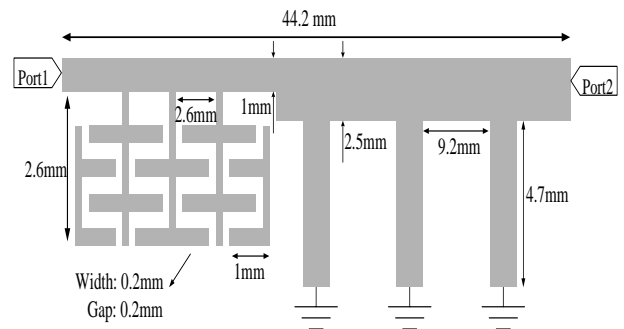
杜昆諺^a、蔡夢華^b、陳居毓^a
 國立臺南大學電機工程學系^a
 崑山科技大學光電工程學系^b

摘要 — 本文所設計之超寬頻(Ultra-Wideband, UWB)濾波器以串接的方式，將一個高通濾波器及一個低通濾波器串接在一起，高通濾波器使用串接短路殘段設計，形成一個下止帶，低通濾波器開路殘段，以指叉式電容的方式設計，形成一個上止帶，通帶在 3-10GHz 插入損耗皆低於 3dB，在高頻有良好的頻率選擇性，陡峭度為 0.0773dB/MHz，上止帶為 10.6GHz-16GHz，通帶內群延遲(Group Delay)小於 0.35 ns 且變化量小於 0.2 ns，截止頻帶的群延遲達到 2.3ns，濾波器的面積為 $1.43 \times 0.26\lambda_g^2$ 。

一、簡介

串接多個環形共振器是設計 UWB 濾波器的簡單方法，在通帶的兩側 3.1GHz 及 10.6GHz 各形成一個由環形共振器控制的傳輸零點[1]。串接一個低通濾波器及一個高通濾波器也是一種辦法，使用步階式阻抗設計的低通濾波器形成一個上止帶，而下止帶則是利用四分之一波長的短路殘段實現[2]。平行耦合微帶線(Parallel-Coupled Microstrip Line, PCML)也可以用來製作寬頻濾波器，將 PCML 的線寬及挖槽寬度縮小變的緊密，以達到較強的耦合，為了增加傳輸極點還需要將多個 PCML 串接一起，但是會使濾波器的效果變差，如較低的 Q 值及較高的返回損耗。為了改善串接多個 PCML 的問題，可以在 PCML 耦合處的接地面增加挖槽，這樣可以增強耦合強度也可以增加傳輸極點[3]。多模態共振器(Multi-Mode Resonator, MMR)是由中間一段低阻抗加上兩旁高阻抗所組成的微帶線段，若將 MMR 和 PCML 整合在一起也可設計 UWB 濾波器，MMR 具有移動模態的效果，因此將 MMR 前三個模態設計平分到 UWB 通帶中，加上高耦合量的 PCML 可以做出擁有五個傳輸極點的 UWB 濾波器[4]。平行耦合的共平面波導(Coplanar Waveguide, CPW)微帶線加上短路端可當作是電感性的耦合，電感性的耦合可以避免傳統開路端電容性平行耦合 CPW 的高輻射損失，結合短路 MMR 的 CPW 與電感性平行耦合的 CPW 之 UWB 濾波器[5]已實現在單層板上，可與其他的單層板電路直接整合。為了抑制因為 MMR 所產生的第四模態或更高模態，發展出使用電容性負載的指叉式耦合線或錐形微帶線，抑制第四模態的傳輸零點，以改善上止帶[6]。

本文將短路殘段設計的高通濾波器及指叉式電容設計的低通濾波器串接在一起，形成擁有超寬頻特性的帶通濾波器，如圖一所示。有超寬頻且平坦的通帶，良好的陡峭度及寬止帶之特性。



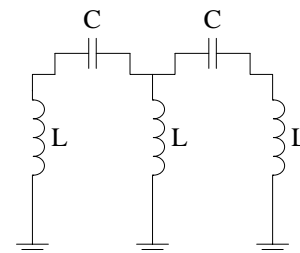
圖一：超寬頻濾波器

二、超寬頻濾波器的設計

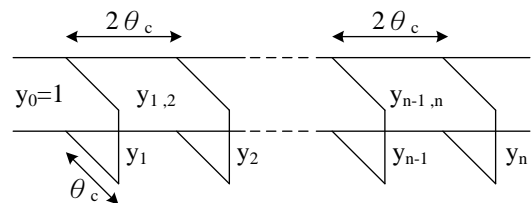
本文的超寬頻濾波器是串接兩個濾波器，一個為截止頻率在 3GHz 的高通濾波器，一個為截止頻率在 10GHz 的低通濾波器，高通濾波器是串接多段的短路殘段設計，低通濾波器則是將電容的部分以指叉式電容實現。

2.1 高通濾波器設計

以電路分析，高通濾波器之等效電路如圖二，其電路為串聯電容及並聯電感，藉由理查轉換(Richard's Transformation) 將電路由集總元件轉換成傳輸線段[7]，當短路殘段的長度 $l < \frac{\lambda_g}{4}$ 時可以等效成電感，因此高通濾波器可以等效成分佈式高通濾波器(optimum distributed highpass filter)[8]如圖三。



圖二：高通濾波器等效電路模型



圖三：分佈式高通濾波器

分佈式高通濾波器具有很寬的通帶以及較小的 θ_c ，但是短路殘段的阻抗較大，通帶範圍為 θ_c 到 $\pi-\theta_c$ ，由(1)可以算出短路殘段的電氣長度 θ_c ，其中 f 為頻率， θ 為電氣長度， f_c 為截止頻率。

$$\theta = \theta_c \frac{f}{f_c} \tag{1}$$

以(1)求出短路殘段的電氣長度，查表 I 決定各線段的正規化導納值， n 為短路殘段的個數。

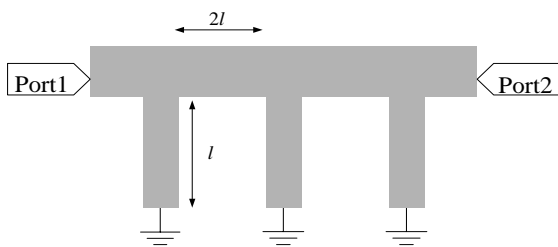
表 I: 分佈式高通濾波器各導納值

n	θ_c	$y_{1,2}$	$y_{n-1,n}$	$y_{1,2}$	$y_{n-1,n}$	$y_{2,3}$	$y_{n-2,n-1}$	$y_{3,4}$	y_{n-2}	$y_{3,4}$
2	25°	0.15436	1.13482							
	30°	0.22070	1.11597							
	35°	0.30755	1.08967							
3	25°	0.19690	1.12075	0.18176						
	30°	0.28620	1.09220	0.30726						
	35°	0.40104	1.05378	0.48294						
4	25°	0.22411	1.11113	0.23732	1.10361					
	30°	0.32300	1.07842	0.39443	1.06488					
	35°	0.44670	1.03622	0.60527	1.01536					
5	25°	0.24068	1.10540	0.27110	1.09317	0.29659				
	30°	0.34252	1.07119	0.43985	1.05095	0.48284				
	35°	0.46895	1.02790	0.66089	0.99884	0.72424				
6	25°	0.25038	1.10199	0.29073	1.08725	0.33031	1.0830			
	30°	0.35346	1.06720	0.46383	1.04395	0.52615	1.0379			
	35°	0.48096	1.02354	0.68833	0.99126	0.77546	0.9838			

$$Z_i = \frac{Z_0}{y_i} \text{ and } Z_{i,i+1} = \frac{Z_0}{y_{i,i+1}} \tag{2}$$

$$\theta_c = \frac{\omega}{v_p} l \tag{3}$$

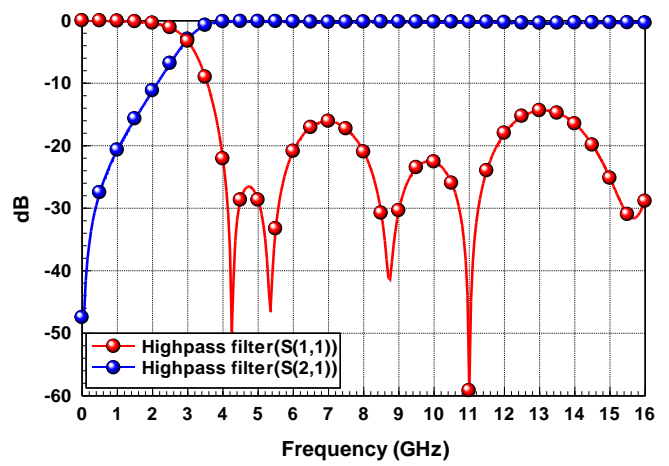
再根據(2)求得線段的阻抗 Z_i 及 $Z_{i,i+1}$ 。由表 I 可以得知短路殘段的個數越少且電氣長度越短其阻抗越大，長度可根據(3)決定。高通濾波器示意圖如圖四所示，圖五為高通濾波器之頻率響應模擬圖。



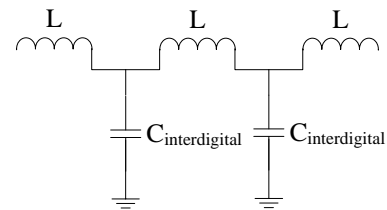
圖四：高通濾波器示意圖

2.2 低通濾波器設計

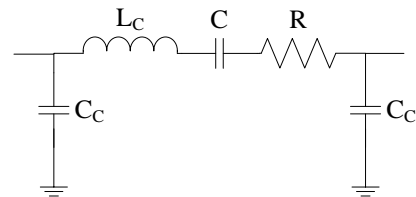
低通濾波器之等效電路如圖六，其電路為串聯電感及並聯電容，電容是以指叉式電容作為設計的方法，電感則是用高特性阻抗的微帶線架構。



圖五：高通濾波器之頻率響應模擬圖

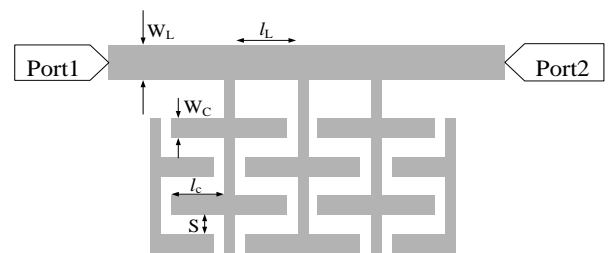


圖六：低通濾波器等效電路模型



圖七：指叉式電容等效電路模型

指叉式電容的等效電路模型如圖七所示， C 為指叉式電容的電容值，而電感值 L_c 及電容值 C_c 則由線段 l_c 產生。



圖八：低通濾波器示意圖

低通濾波器示意圖如圖八所示。當指叉式電容的線寬 w_C 及線距 s 相等時，可用(4)估計 C 的值[9]， l_c 為指叉式電容線段長， N 為指叉數目， A_1 及 A_2 分別由(5a)及(5b)得到， h 為板材厚度。

$$C = (\epsilon_r + 1)l_c[(N - 3)A_1 + A_2] \tag{4}$$

$$A_1 = 4.409 \tanh \left[0.55 \left(\frac{h}{W_C} \right)^{0.45} \right] \times 10^{-6} \left(\frac{\text{pF}}{\mu\text{m}} \right) \quad (5a)$$

$$A_2 = 9.92 \tanh \left[0.52 \left(\frac{h}{W_C} \right)^{0.5} \right] \times 10^{-6} \left(\frac{\text{pF}}{\mu\text{m}} \right) \quad (5b)$$

電感值 L_C 與電容值 C_C 可分別由(6)及(7)估計其值，其中 c 為光速。

$$L_C = \frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_{re}}}{c} l_C \quad (6)$$

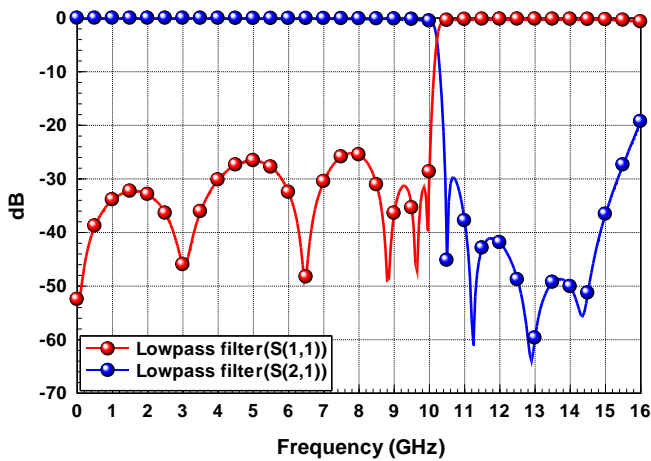
$$C_C = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\epsilon_{re}}}{Z_0 c} l_C \quad (7)$$

低通濾波器的電感 L 則可根據(8)估計，其中 l_L 為電感線段長， W_L 為電感線寬， t 是銅箔厚度， K_g 可根據(9)得到。

$$L = 2 \times 10^{-4} l_L \left[\ln \left(\frac{l_L}{W_L + t} \right) + 1.193 + 0.2235 \frac{W_L + t}{l_L} \right] K_g \quad (8)$$

$$K_g = 0.57 - 0.145 \ln \frac{W_L}{h} \quad (9)$$

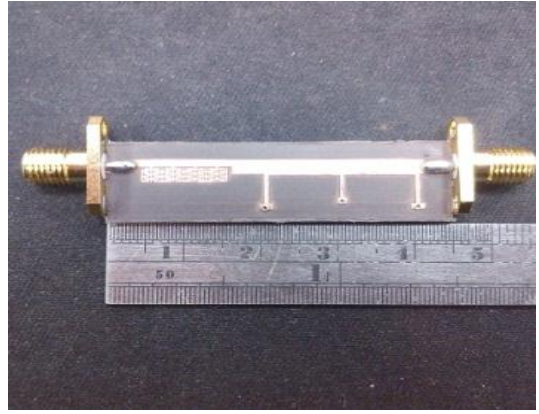
圖九為低通濾波器之頻率響應模擬圖。



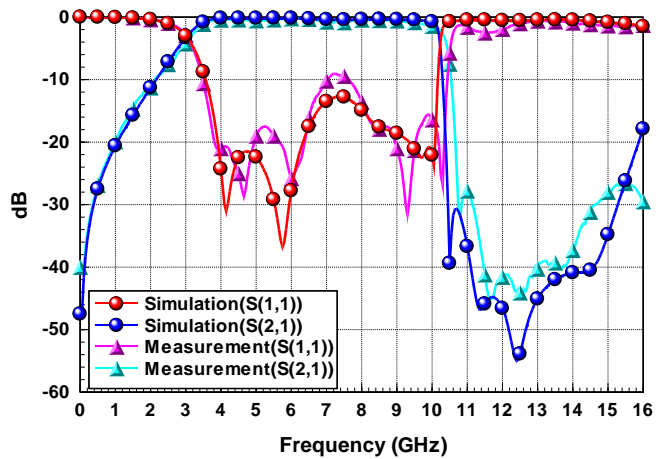
圖九：低通濾波器之頻率響應模擬圖

三、實作與量測

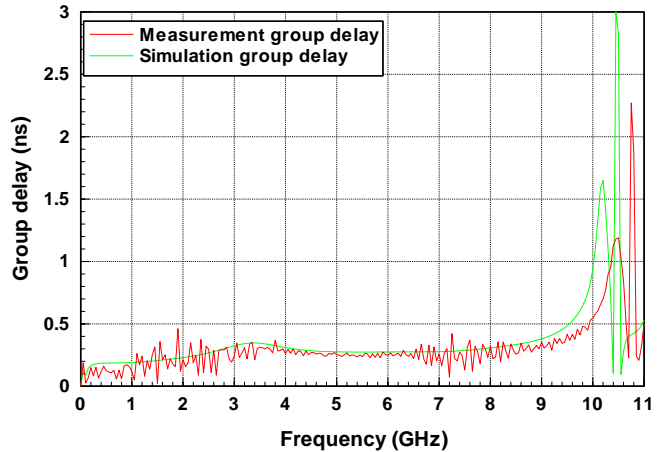
以 Zeland IE3D 軟體進行頻率響應之模擬，並使用 Rogers RT/Duroid 5880 板材實作，進行實作與量測並來回印證模擬結果之準確性，其介電系數為 2.2，Loss Tangent 為 0.0009，板材厚度為 0.51mm。實作圖如圖十所示，面積為 $1.43 \times 0.26 \lambda_g^2$ 。模擬及量測結果比較圖為圖十一，其中在 3-10GHz 頻帶內插入損耗小於 3dB，在通帶內的返回損耗都在 10dB 以下，且具有寬廣的上止帶，止帶的抑制頻寬從 10.6GHz-16GHz，而上止帶產生的傳輸零點，讓截止的頻帶更加的陡峭，陡峭度為 0.0773dB/MHz，圖十二為群延遲的頻率響應圖，通帶內的群延遲皆小於 0.35 ns 且變化量小於 0.2 ns，截止頻帶的群延遲達到 2.3ns，在高頻時有良好的頻率選擇性。



圖十：3-10GHz 超寬頻帶通濾波器實作圖



圖十一：模擬與量測結果響應比較圖



圖十二：群延遲響應圖

結論

本文將高通濾波器與低通濾波器串接實現 3-10GHz 超寬頻帶通濾波器，具平坦通帶之高通濾波器可利用串接多

個短路殘段來實現；結合指叉式電容所實現的低通濾波器，在上止帶產生了傳輸零點，因此具有相當良好的陡峭度，截止頻帶的群延遲達到 2.3ns，大大地增加通帶的頻率選擇性，量測與模擬結果極為符合。此元件可應用在個人短距離無線網路(Wireless Personal Area Network, WPAN)的低功率高速傳輸，並取代傳統傳輸線。UWB 其大量傳輸資料的特性，使個人電腦及行動通訊裝置可以高速無線傳輸多媒體的資料。UWB 為低功率無線傳輸，因此亦可使用於無線生醫感測，實現超寬頻非接觸監測技術。

參考文獻

- [1] H. Ishida and K. Araki, "Design and analysis of UWB bandpass filter with ring filter," in *IEEE MTT-S Int. Dig.*, June 2004, vol. 3, pp. 1307–1310.
- [2] C.-L. Hsu, F.-C. Hsu, and J.-T. Kuo, "Microstrip bandpass filters for ultra-wideband (UWB) wireless communications," in *IEEE MTT-S Int. Dig.*, June 2005, pp. 679–682.
- [3] L. Zhu, H. Bu, and K. Wu, "Aperture compensation technique for innovative design of ultra-broadband microstrip bandpass filter," in *IEEE MTT-S Int. Dig.*, 2000, vol. 1, pp. 315–318.
- [4] L. Zhu, S. Sun, and W. Menzel, "Ultra-wideband (UWB) bandpass filters using multiple-mode resonator," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 796–798, Nov. 2005.
- [5] J. Gao, L. Zhu, W. Menzel, and F. Bogelsack, "Short-circuited CPW multiple-mode resonator for ultra-wideband (UWB) bandpass filter," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 104–106, Mar. 2006.
- [6] S. Sun and L. Zhu, "Capacitive-ended interdigital coupled lines for UWB bandpass filters with improved out-of-band performance," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 440–442, Aug. 2006.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering 3rd ed.* New York: John Wiley & Sons, 2005, ch. 8.
- [8] J. S. Hong, *Microstrip Filter for RF/Microwave Applications 2nd ed.* John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [9] I. J. Bahl, *Lumped Elements of RF and Microwave Circuits.* Norwood, MA: Artech House, 2003, pp. 229-233.