

應用於功能性基板之超寬頻濾波器設計

The Ultra Wide Band Filter Design Applied on Functional Substrates

余迅 Syun Yu ; 蔡承樺 C.H. Tsia
工研院電子所先進微系統構裝技術中心副工程師
Advanced Microsystem and Package Technology Center / ERSO / ITRI

摘要

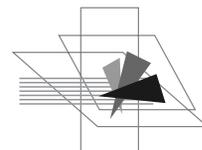
自從超寬頻系統開放商業應用以來，產業界皆積極開發此技術的應用，將無線通訊推向超大頻寬的時代。而超大頻寬之射頻元件的設計更是一大挑戰，其技術必然與傳統的方法不同。本文將探討在功能性基板上之超寬頻濾波器設計，並利用短路傳輸線增加濾波器的頻寬。除了濾波器的設計，本文亦探討目前寬頻濾波器的文獻分析資訊。

Abstract

Since the ultra wide band (UWB) system was approved for commercial use, the industrial circles constructively developed the applications of UWB technology and tried to move the wireless communication to an era of ultra wide band. However, it is a real challenge to design the RF devices for UWB system. The techniques are different from conventional design methods. This article states the design of UWB filter on functional substrates and the use of shorted transmission line sections to enlarge the bandwidth of the filter. In addition to the filter design, the article also includes the latest information analysis of wide-band filters.

關鍵詞/Key Words

超寬頻(Ultra Wide Band; UWB)、射頻(Radio Frequency; RF)、帶通濾波器(Band Pass Filter; BPF)、功能性基板(Functional Substrates)



前言

目前無線通訊產業有一個明顯的需求—提高資料傳輸速率^{*1}。根據仙農(Shannon)的通訊理論，資料傳輸速率與通訊頻寬成正比^{*2}。因此，增加通訊頻寬能提高傳輸速率。近年來，寬頻無線接取技術(Broadband Wireless Access; BWA)成為現代無線通訊系統發展的重要課題，寬頻濾波器將愈來愈被廣泛使用。

超寬頻系統(Ultra Wide Band; UWB)使用區間(Duration)很短(約數奈秒)的間歇脈衝波訊號進行無線通訊傳輸，使信號的頻寬增加到數個 GHz，因此能提高傳輸速率到 100Mbps 以上。UWB 系統自 1960 年開始發展，直到美國聯邦通訊委員會(FCC)於 2002 年 2 月開放超寬頻頻帶之前，一直屬於軍事應用。自從 2002 年開放以來，世界各大廠商皆看好 UWB 將成為短距離無線通訊的應用主流^{*3}，而積極投入研發。UWB 的超大頻寬適合傳輸大量的數位影音資料，作為 3C 產品之間的通訊界面，並能滿足個人/家庭/辦公室之無線網路應用。

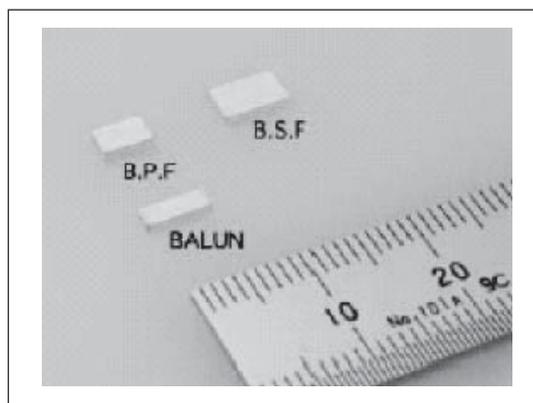
傳統窄頻帶濾波器的設計不可能達到 GHz 頻寬，而且要在有限的體積和面積下設計 GHz 頻寬的濾波器也是一大挑戰。商品化的表面聲波濾波器(SAW

Filter)無法涵蓋 UWB 高達幾 GHz 的頻寬。就晶片面積和製造成本來考量，目前的系統晶片(SoC)技術尚無法將頻寬達幾 GHz 的濾波器設計到晶片中；因此，寬頻濾波器都做在晶片外，目前的商品都是 SMT 表面黏著元件，例如，太陽誘電(Taiyo Yuden)公司利用多層陶瓷技術開發的 UWB 濾波器(見圖一)。

超寬頻系統簡介

一、為何優於其他的通訊系統

一般的無線通訊系統使用連續波(Continuous Wave)作為載波(Carrier)傳送調變訊號，而 UWB 使用間歇的脈衝波(Impulse Wave)。連續波在時域上是連續的，轉成頻域來看，其頻譜範圍相當窄；而間歇的脈衝訊號在時域上是不連

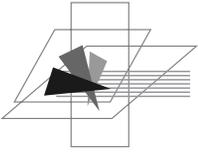


▲圖一 美國 Taiyo Yuden 公司的 UWB 陶瓷元件：帶通濾波器(BPF)、帶阻濾波器(BSF)、平衡非平衡轉換器(BALUN)⁽¹¹⁾

*1 Data Rate，單位：bits/sec，簡稱 bps。

*2 仙農公式： $C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{BN_0} \right)$ ，C= 通道容量(bits/sec)，B= 通道頻寬(Hz)，P= 接收功率(watts)， N_0 = 雜訊頻譜密度(watts/Hz)。

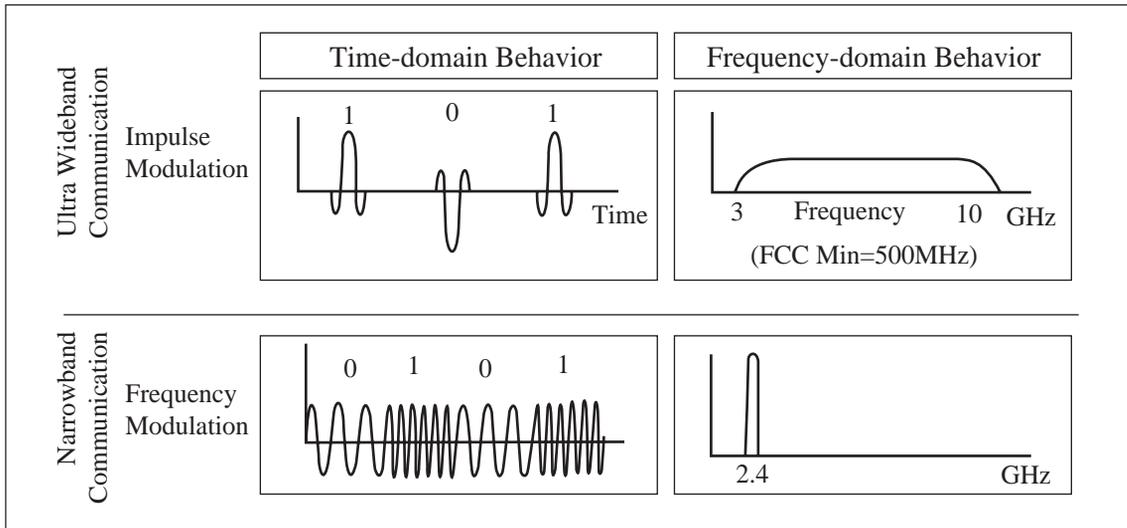
*3 短距離無線通訊是使用範圍在 10 公尺以內者。



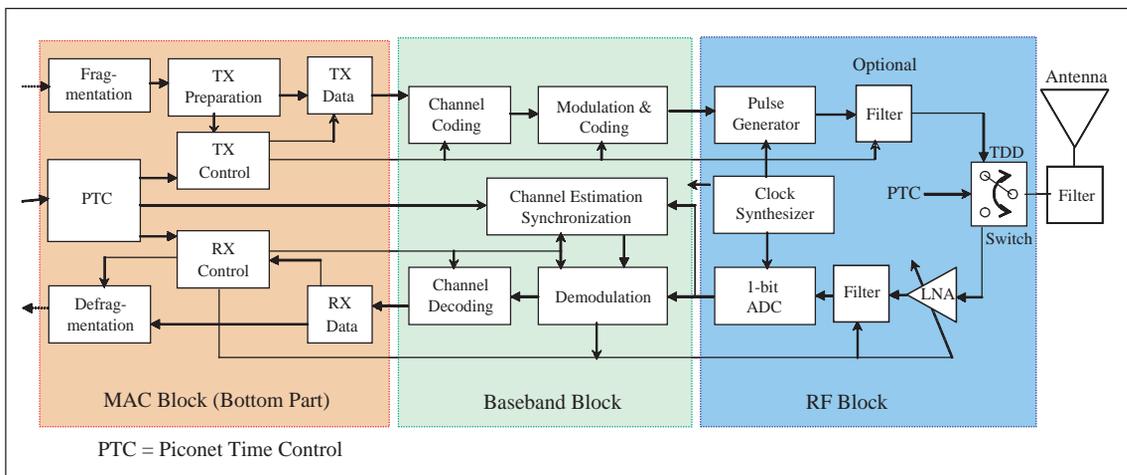
續的，其頻譜比連續波寬；並且在時域上脈衝波的區間愈短，其頻寬愈大⁽¹⁾。根據 FCC 的定義，超寬頻是指比例頻寬大於 0.25 以上者^{*4}。另外，就平均發射功率來說，間歇的脈衝波比連續波還低。因此，UWB 具有頻寬大而且發射功率低的優點（見圖二）。UWB 是無載波系統(Carrierless)，就硬體設計來說，

可以省去部份電路，因此能縮小晶片面積並節省成本，適合做 SoC 整合。目前有許多晶片廠正在開發 UWB 晶片，例如 TI、Intel、Freescale 等（見圖三）。

UWB 系統的頻寬很廣，為了不干擾其他的無線電波訊號，例如常用的 2.4 GHz 和 5.2GHz 頻段，及其他的廣播、電視和電子導航訊號，美國聯邦通訊委

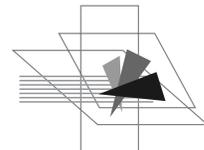


▲圖二 脈衝波與連續波的比較⁽¹⁾



▲圖三 UWB 之系統晶片解決方案⁽³⁾

*4 比例頻寬(Fractional Bandwidth)是指系統的 3dB 頻寬除以中心頻率的比值。



員會制定了 UWB 的通訊頻譜在 3.1~10.6 GHz 之間，並嚴格限制功率要在 -41.3 dBm / MHz 以下（在通訊中用功率頻譜密度表示）。這樣的限制雖然不會影響到資料的傳輸，但是會限制傳輸的距離。到底 -41.3 dBm/MHz 的功率有多大？它甚至比一支在室內燃燒的小蠟燭的輻射功率還小^{*5}；因此，UWB 的發射功率相當於一般通訊系統的雜訊 (Noise) 等級（見圖四）。

綜合以上所述，UWB 的超大資料傳輸量與低耗電的優點，確實優於其他的無線通訊，表一歸納 UWB 與其他系統之比較。

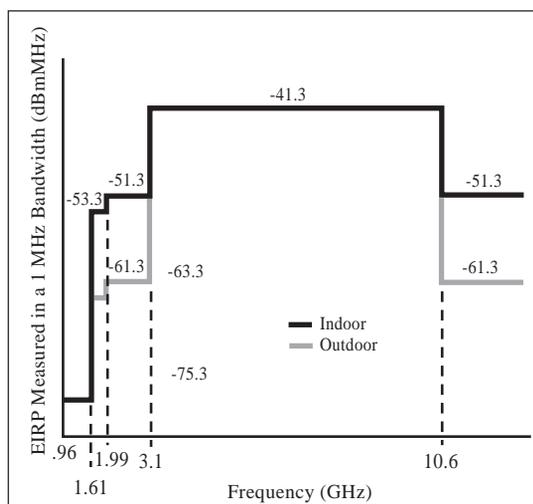
二、超寬頻系統的應用領域

UWB 的技術應用可分成以下三種：

1. 透視牆：脈衝波經由多路徑折射回到接收機後不會彼此干擾，因此能穿過水泥磚牆，偵測建築物內的人和物體。此技術可以給軍、警和消防隊使用，進行辦案和災難之救護。目前擁有此技術的廠商是美國的 Time Domain 公

司。

2. 無線網路：高速的資訊傳輸可滿足家庭和辦公室的需求。如 Intel 提出的數位家庭 (Digital Home) 和其他廠商提出的 Wireless USB 概念：將家庭和辦公室的各種電子設備連接成一個小型的無線區域網路，使用無線通訊技術傳輸資料，可省去連接機器之間的訊號線。已經有多家廠商在消費電子展中展出他們具有 UWB 傳輸技術的產品（見圖五）⁽⁴⁾。

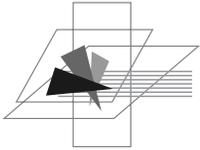


▲圖四 FCC 規範之 UWB 發射信號頻譜 (室內和室外)⁽³⁾

表一 通訊系統之效能比較 (範圍 10 公尺以內)

項目 \ 系統	802.11a	802.11g	UWB
通訊頻帶	5.15 ~ 5.35 GHz 5.75 ~ 5.85 GHz	2.4 ~ 2.4835 GHz	3.1 ~ 10.6 GHz
傳輸速率	6 ~ 54 Mbps	1 ~ 54 Mbps	100 ~ 500 Mbps
發射功率	200 mW (Mili Watt)	50 mW	200 μW (Micro Watt)
空間容量	83Kbps/m ²	5Kbps/m ²	1000Kbps/m ²

*5 要達到此功率，根據 TI 的設計，輸出功率只能在 -10.3 dBm = 0.0933 mW；而一燭光的功率是 18.4 mW。



3.汽車防撞系統：作為車用雷達系統，傳回道路的即時資料給駕駛人，能防止車禍發生。目前擁有此技術的廠商是美國的Multispectral Solutions公司⁽⁵⁾。

三、國際大廠的競爭狀況

國際電機電子工程師學會之下有一個工作群組 IEEE802.15.3a，負責制定 UWB 的系統規格。自從 2002 年開放後，多家廠商都參與討論，並提出他們的解決方案；目前，UWB 之實體層(Physical Layer)的規範尚無定論，主要分成兩大集團：一是 TI 和 Intel 推出的「多頻帶正交劃頻多工(MB-OFDM)」，二是 Motorola 和 XtremeSpectrum 所提的「直接序列分碼多工存取(DS-CDMA)」。各家廠商都希望自己的規格能成為標準，及 UWB 產品能儘快上市。其中，超寬頻濾波器是 MBOA 與 DS-CDMA 規格的射頻前端電路都需要的關鍵元件。

超寬頻濾波器之產品和論文資訊

一、目前的產品發展

1.日本東京工業大學的 5-pole UWB BPF

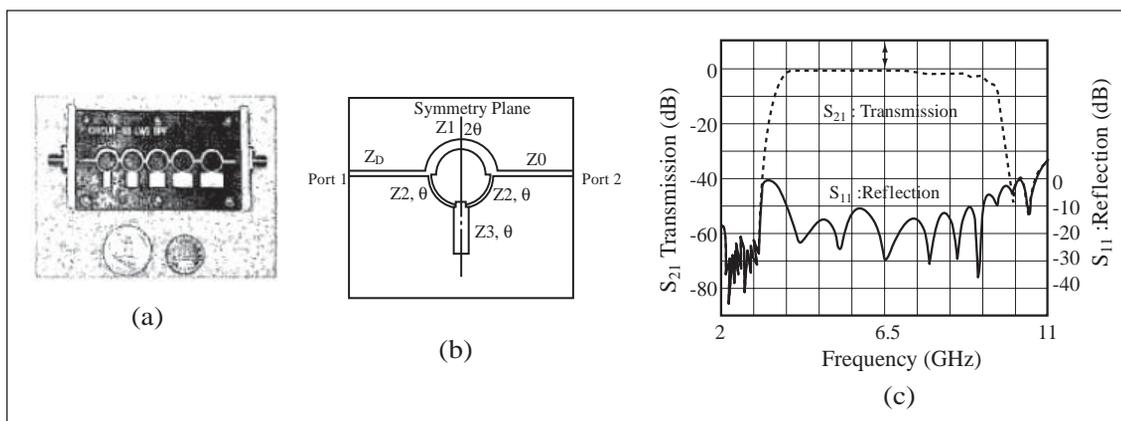
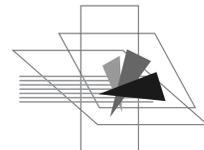
圖六由 Hitoshi Ishida 和 Kiyomichi Araki 用印刷電路板研製的五階超寬頻帶通濾波器，是目前所有文獻中頻寬最大的濾波器。此濾波器的基本元素是環型諧振腔，由三條不同阻抗的傳輸線組成，成為小的寬頻濾波器。藉由變化 Z_3 的阻抗，也就是傳輸線的線寬，控制諧振腔的頻寬。再將五個不同 Z_3 阻抗的諧振腔串聯，形成頻帶 3.8~9.2 GHz 的帶通濾波器⁽⁶⁾。然而此濾波器為串接開路傳輸線結構，無法防制低頻雜訊(0.1~2GHz 的訊號)通過。

2.韓國 KAIST 的 GHz 頻寬濾波器

圖七是韓國著名的 Korea Advanced



▲圖五 Intel 的數位家庭構想⁽⁴⁾



▲圖六 日本東京工業大學的 5-pole UWB BPF⁽⁶⁾。(a)濾波器；(b)環型諧振腔；(c)濾波器的傳輸 S_{21} 和反射 S_{11} 響應（量測值）

Institute of Science and Technology (KAIST) 之 Terahertz Interconnection and Package Lab. 做的 GHz 頻寬濾波器。此濾波器是用印刷電路板製作，由兩對平行耦合微帶線以及中間的放射狀諧振腔(Radial Stub Resonator)組成。濾波器的頻帶為 3.4~7.2 GHz，並且在 1.4 GHz 有非常好的截止頻帶特性⁽⁷⁾。

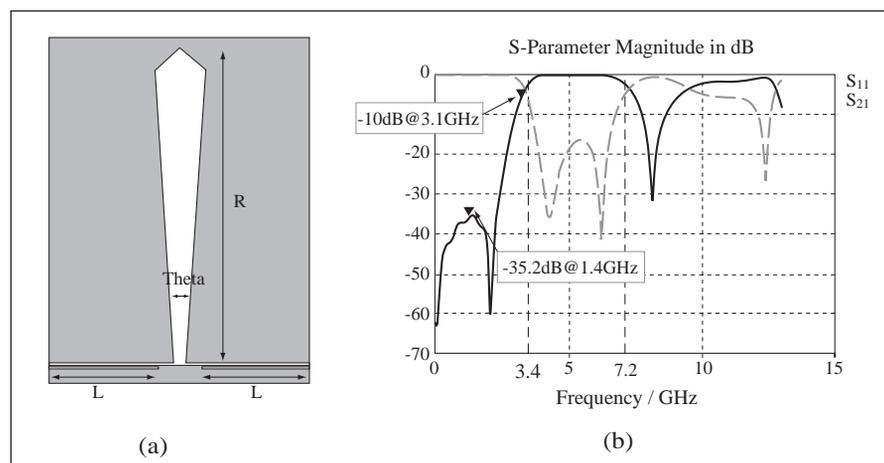
3. 台灣中正理工學院的 Dual Mode Double Ring 濾波器

台灣的中正理工學院於 2005 年初在著名的 Microwave and Optical Technology Letters 發表了圖八的濾波器。此帶通濾波器由兩個在印刷電路板上的環形和放射狀諧振腔組成，兩個放射狀諧振腔有助於提升濾波器的頻寬。濾波

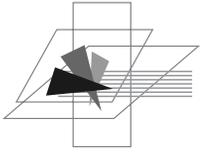
器的 -3dB 頻帶為 3.1~5.28 GHz，遠大於傳統濾波器的頻寬。此濾波器的優點是結構簡單且尺寸小，適合用在較低頻帶的超寬頻系統⁽⁸⁾。

4. 日本 Fujitsu Component Limited 的 UWB Ring Filter

圖九的濾波器是由日本 Fujitsu Component Limited 與東京工業大學合作開發的，做在印刷電路板 FR4 上。此濾波器由 6 個短路樁(Short-circuit Stub)和 3 個環型諧振腔組成。每個短路樁的長度是

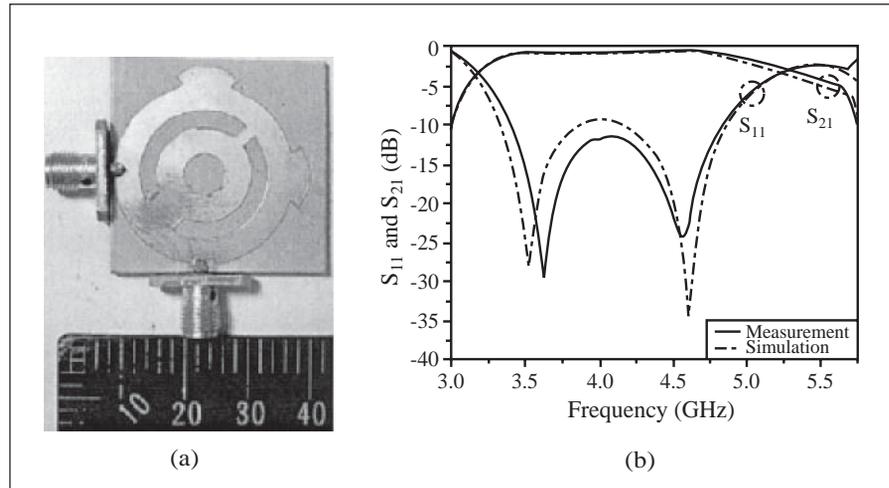


▲圖七 韓國 KAIST 的 GHz 頻寬濾波器⁽⁷⁾。(a)濾波器；(b)濾波器的傳輸 S_{21} 和反射 S_{11} 響應（模擬值）



四分之一波長 (中心頻率 4.1GHz)。濾波器的頻帶是 3.1~5 GHz，中心頻率是 4.1GHz⁽⁹⁾。

5. 日本 Daido Steel 的 UWB BPF



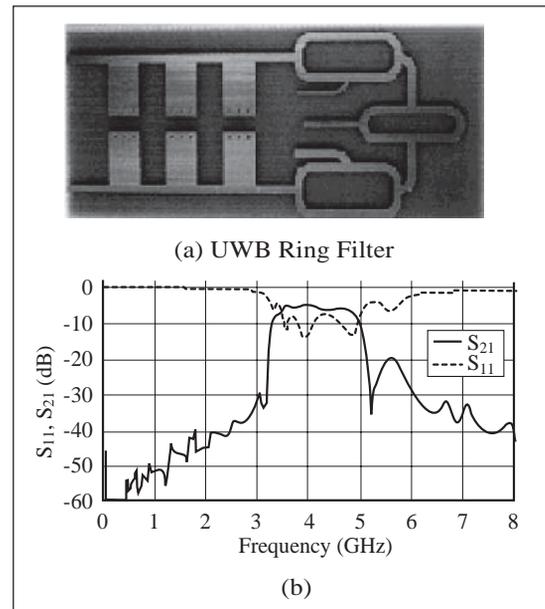
▲圖八 台灣中正理工學院的 Dual Mode Double Ring 濾波器⁽⁸⁾。(a) 諧振器；(b) 諧振器的傳輸 S_{21} 和反射 S_{11} 響應 (模擬與量測值)

圖十的濾波器是由日本 CRL (The

Communication Research Lab., 信息通信研究所) 與 Daido Steel (大同特殊鋼) 公司以及東京工業大學合作開發的。該公司使用一損耗複合基板，內含 Daido Steel 公司的磁性粉末來開發 UWB 濾波器。產品名稱是 Safi-U，依功能分成兩種：一是頻帶 3.1~10.6 GHz 的帶通濾波器；二是截止頻率 5~5.8 GHz 的帶拒濾波器 (Band Stop Filter)，主要為防止 IEEE 802.11a 無線網路與 UWB 互相干擾。此濾波器首先於 2003 年 9 月發表，是全世界第一個小型的 UWB 濾波器⁽¹⁰⁾。

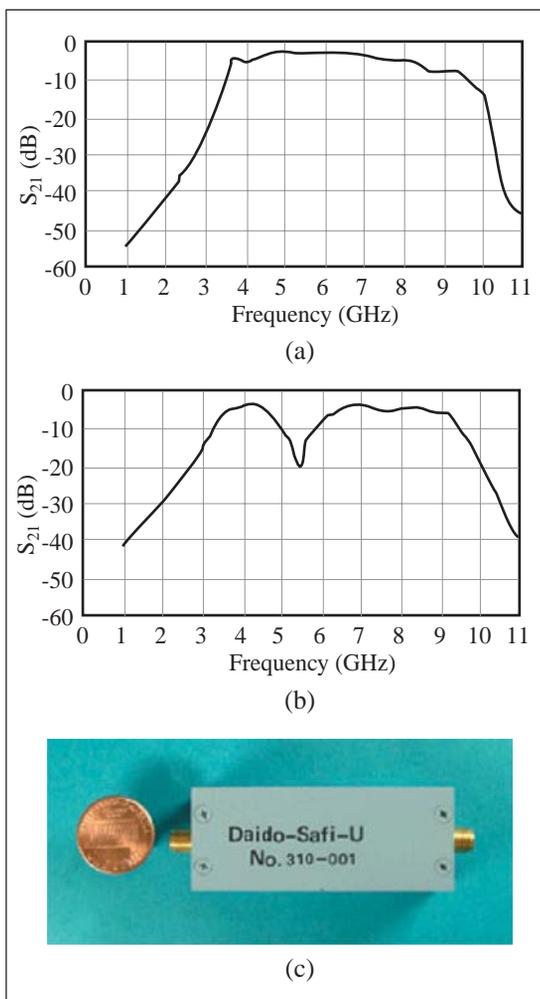
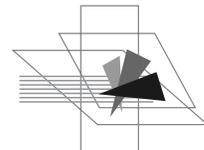
6. 美國 Taiyo Yuden 公司的 UWB 陶瓷元件：

TRDA (Taiyo Yuden R&D Center of America) 公司於 2003 年 10 月發表全世界第一組給 UWB 使用之寬頻陶瓷元件，如圖一。這些元件的材料是低損耗陶瓷，使用多層陶瓷技術製成。這些關鍵寬頻 RF 元件成功地開啓了 UWB 邁向商業化應用的大門。帶通濾波器 (Band Pass Filter;



▲圖九 日本 Fujitsu Component Limited 與東京工業大學合作之 UWB Ring Filter⁽⁹⁾。(a) 濾波器；(b) 濾波器的傳輸 S_{21} 和反射 S_{11} 響應 (量測值)

BPF) 能避免使用頻帶以外之干擾；帶拒濾波器 (Band Stop Filter; BSF) 能避免在 5GHz 附近之 802.11a (UNII 頻帶) 的干擾；而平衡非平衡轉換器 (Balanced/



▲圖十 日本 Daido Steel 公司的 UWB BPF⁽¹⁰⁾。(a)傳輸 S_{21} 響應 (帶通濾波器)；(b)傳輸 S_{21} 響應 (帶阻濾波器)；(c)濾波器

Unbalanced, BALUN)能將 UWB 半導體晶片的平衡輸出轉換成天線的非平衡輸入⁽¹¹⁾。(註：平衡輸入/輸出是半導體電路晶片常用的技術，即雙端之差動對 (Differential Pair)輸出，可以讓雜訊互相抵消。而非平衡是指單端的輸入/輸出。)

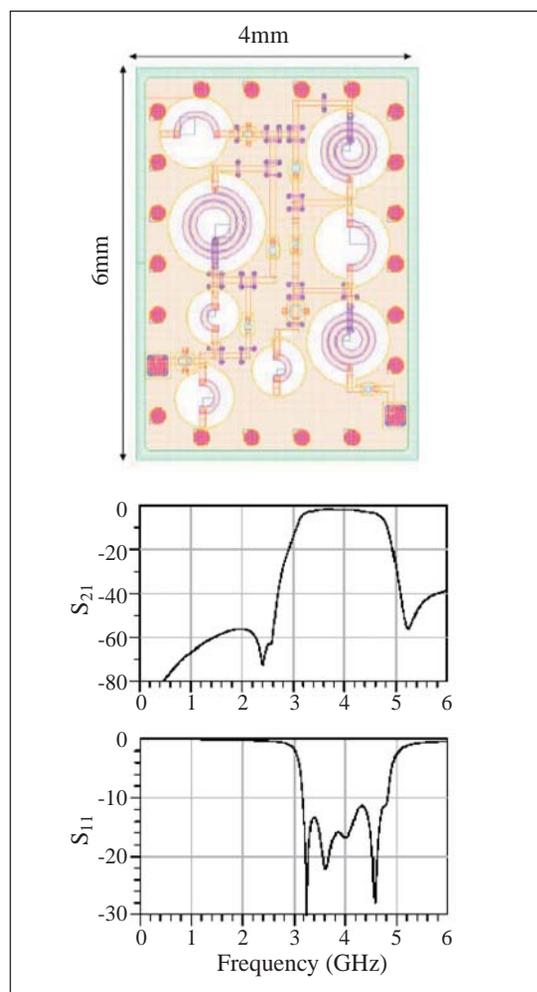
7. STMicroelectronics 的 UWB BPF

圖十一是 ST 半導體公司用 IPAD 技

術^{*6}製作的六階橢圓函數濾波器。使用頻帶是 UWB 的較低頻帶 3.1~5 GHz。

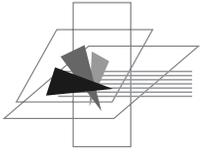
二、各公司之 UWB BPF 特性比較

UWB 的頻帶包括常用的 5.2 GHz 頻帶，為了避免干擾，濾波器的設計大致分成三類：一是包括全部 UWB 頻帶，3.1~10.6 GHz；二是採用分頻段設計，



▲圖十一 ST Microelectronics 的 UWB BPF⁽³⁾

*6 IPAD 是 Integrated Passive and Active Device 的縮寫，為 STM 的註冊商標。IPAD 是一種晶片尺寸封裝 (Chip Scale Packages; CSP) 技術，技術特點在整合無線通訊所需要之 EMI 濾波及 ESD 靜電保護功能。^(3,12)



目前出現的產品為較低的 3.1~5 GHz 頻帶，適合用在多頻帶的 MBOA 系統；三是為了避免與 5.2 GHz 頻帶的 802.11a WLAN 互相干擾，在 5.2GHz 頻段設計帶拒濾波器，使 UWB 與 802.11a 的 WLAN 能夠共存。而 UWB 系統使用區間很短的脈衝波進行通訊，因此在選擇濾波器時，需要考量濾波器的群組延遲 (Group Delay) 特性。

超寬頻濾波器之設計

一、目標規格

設計一個頻寬大於 4GHz 的帶通濾波器，通帶範圍包含現在流行的 GSM

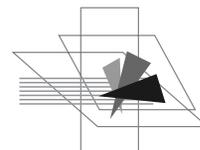
手機及 WLAN 802.11a/b/g 系統，即 1.8~5.8GHz 的頻帶，通帶內的植入損失小於 3dB，輸入返回損失大於 10dB；濾波器尺寸小於 30×15 mm。

二、設計參數

1. 中心頻 $f_0=3.8\text{GHz}$ ，通帶頻寬 $BW=4.0\text{GHz}$ ，比例頻寬 $FBW=0.92$ ，運算常數 $h=1.5$ ，輸入阻抗 50Ω 。
2. 低通原型濾波器函數：Chebyshev / 3 階 / ripple 0.1dB 之參數： $g_0 = g_4 = 1$ ， $g_1 = g_3 = 1.0316$ ， $g_2 = 1.1474$ ，由此算出各線段的阻抗而求得線寬。每一段線的長度都是中心頻率 3.8 GHz 的四分之一波長。

表二 各公司的 UWB BPF 之性能比較

公司 / 機構	發表日期	頻帶 (Pass Band)	植入損失 (Insertion Loss, S_{21})	返回損失 (Return Loss, S_{11})	群組延遲 (Group Delay)	板材參數 (板厚 H，介電常數 Dk)	面積
東京工業大學	2004 年	3.8~9.2 GHz	0.53 dB	10 dB	0.6 ns	H= 1.6 mm Dk = 3.5	不詳
KAIST	2004 年 10 月	3.4~7.2 GHz	0.5 dB	10 dB	0.19 ns	H= 0.3 mm Dk = 4.3	10mm× 13mm
中正理工	2005 年 2 月	3.1~5.28 GHz	0.637 dB	10 dB	不詳	H= 1.57 mm Dk = 3.0	50mm× 50mm
Fujitsu	2004 年 10 月	3.1~5 GHz	5~6 dB	6 dB	不詳	H= 0.8 mm Dk = 4.2	70mm× 33mm
Daido Steel	2003 年 9 月	小於 3.1~10.6 GHz	2.5~3.2 dB	不詳	±0.2 ns	不詳	50mm× 20mm
Taiyo Yuden	2003 年 10 月	3.1~10.6 GHz	不詳	不詳	不詳	不詳	4.8mm× 2.5mm
STM	2004 年 9 月	3.1~5 GHz	不詳	10 dB	不詳	不詳	6mm× 4mm



3.功能性基板結構（見圖十二），其各層材料參數如表三所示。

表三 功能性基板之各層材料參數

Item	材料	Dk	Df	厚度(mil)
Material(1,5)	PP EM-22B 2116	3.9 (at 1GHz)	0.017 (at 1GHz)	4
Material(2,4)	HiDk40	32 (at 5GHz)	0.065 (at 5GHz)	2
Core Material(3)	Thincore EM-320	4.3 (at 1GHz)	0.014 (at 1GHz)	12
L1/L2/L5/L6	Cu	N/A	N/A	1.4
L3/L4	Cu	N/A	N/A	0.7

三、超寬頻濾波器之設計與模擬

濾波器由兩段傳輸線連接三段並聯的短路傳輸線組成，每一段線的長度都是中心頻率 3.8 GHz 的四分之一波長。使用 2.5D 電磁模擬軟體 Sonnet v8.52^{*7} 進行初步驗證，訊號線在功能性基板結構的 Metal 1，接地面在 Metal 4，以 Material(1, 2, 3)為介質（見圖十三）。從設計參數計算出各線段的特性阻抗、線寬和線長，如表四所示。得到的模擬結果（圖十四）：植入損失小於 3dB 的頻帶為 1.7~6.08 GHz，輸入返回損失大於 10dB 的頻帶為 2.06~5.80 GHz，尺寸為 22.6mm×13.7 mm，已符合規格的要求。

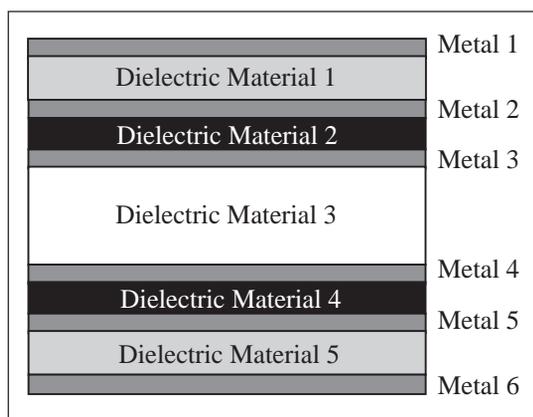
以下為濾波器的設計公式⁽¹³⁾：

$$\theta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{FBW}{2}\right)$$

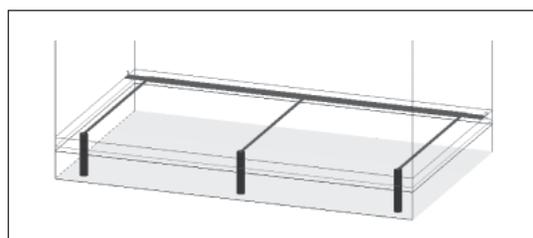
$h=1.5$ ， h 為大於零的常數，可指定任意值。

$$\frac{J_{1,2}}{Y_0} = g_0 \sqrt{\frac{hg_1}{g_2}}, \quad \frac{J_{n-1,n}}{Y_0} = g_0 \sqrt{\frac{hg_1 g_{n+1}}{g_0 g_{n-1}}}$$

$$\frac{J_{i,i+1}}{Y_0} = \frac{hg_0 g_1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad \text{for } i = 2 \text{ to } n-2$$



▲圖十二 功能性基板結構



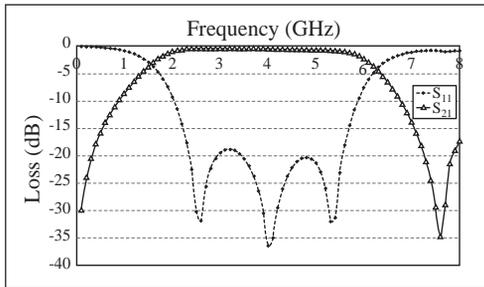
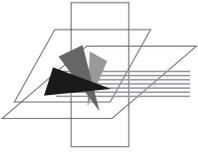
▲圖十三 功能性基板結構之超寬頻濾波器

$$N_{i,i+1} = \sqrt{\left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_0}\right)^2 + \left(\frac{hg_0 g_1 \tan \theta}{2}\right)^2}$$

for $i = 1$ to $n-1$

$$Y_1 = g_0 Y_0 \left(1 - \frac{h}{2}\right) g_1 \tan \theta + Y_0 \left(N_{1,2} - \frac{J_{1,2}}{Y_0}\right)$$

*7 Sonnet v8.52 為 Sonnet Software Inc.公司之電磁模擬軟體產品。



▲圖十四 超寬頻濾波器之響應(0.1~8.0 GHz)

$$Y_n = Y_0 (g_n g_{n+1} - g_0 g_1 \frac{h}{2}) \tan \theta + Y_0 (N_{n-1, n} - \frac{J_{n-1, n}}{Y_0})$$

$$Y_i = Y_0 (N_{i-1, i} + N_{i, i+1} - \frac{J_{i-1, i}}{Y_0} - \frac{J_{i, i+1}}{Y_0})$$

for $i = 2$ to $n-1$ ，短路傳輸線的特性阻抗。

$$Y_{i, i+1} = Y_0 (\frac{J_{i, i+1}}{Y_0}) \text{ for } i = 1 \text{ to } n-1，\text{連接兩}$$

短路線之傳輸線的特性阻抗。

植入損失 (S_{21} 的絕對值) 小於 3dB 的頻帶為 1.7~6.08 GHz，輸入返回損失 (S_{11} 的絕對值) 大於 10dB 的頻帶為 2.06~5.80GHz。

結論

隨著寬頻無線接取技術的發展，寬頻濾波器將愈來愈被廣泛使用。儘管國際間兩大超寬頻陣營 MBOA 與 DS-CDMA 僵持不下，超寬頻濾波器仍是 UWB 射頻前端電路的關鍵元件。目前超寬頻濾波器的論文或產品都在 2003 年 9 月之後發表，因此專利數量很少，有些可能仍在申請中尚未公告，可見此領域非常的創新與前瞻，值得投入研究。最後，在功能性基板上設計超寬頻濾波器，

表四 濾波器各線段資料

線段	特性阻抗(ohm)	線寬(mil)	線長(mil)
Z0	50	28	50
A, C, E	$85.4 (\frac{1}{Y_1} = \frac{1}{Y_2} = \frac{1}{Y_3})$	8	425
B, D	$43.055 (\frac{1}{Y_{1,2}} = \frac{1}{Y_{2,3}})$	36	394

有益於將來與超寬頻系統的電路板整合，省去購買元件及焊接組裝等額外成本。此濾波器的結構簡單，模擬結果的通帶頻寬超過 4GHz，超越傳統濾波器所能達到的頻寬；並且通帶內的植入損失很低（小於 2dB），因此可應用在寬頻無線通訊系統上，將來可使用更先進的製程與材料技術來縮小濾波器的尺寸。

參考文獻

1. 網頁資料：<http://www.digit-life.com>
2. Lawrence Williams, "Ultrawideband Radio Design", Ansoft Worldwide Technical Work Shops, 2004 Taipei.
3. Lydi SMAINI, "RF Digital Transceiver for Impulse Radio Ultra Wide Band Communications", ESSCIRC Workshop, September 24, 2004.
4. 網頁資料：<http://www.intel.com/technology/digitalhome/>
5. AIMEE CUNNINGHAM, "不可限量的無線電威力", 科學人雜誌(POPULAR SCIENCE), 2004 年 11 月。
6. Hitoshi Ishida, Kiyomichi Araki, "Design and Analysis of UWB Bandpass Filter with Ring Filter", 2004 IEEE MTT-S Digest.
7. Myunghoi Kim, "A design of compact microstrip band-pass filter for UWB Communications", October 19, 2004.
8. J.C. Liu, C.Y. Wu, M.H. Chiang, and David Soong, "IMPROVED DUAL-MODE DOUBLE-RING RESONATOR WITH RADIAL STUB FOR UWB-FILTER DESIGN", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 44, No. 3, February 5, 2005.
9. 網頁資料：http://www.fcai.fujitsu.com/pdf/uwb_bandpass_filter.pdf
10. 網頁資料：<http://www.daido.co.jp/english/products/uwb/uwb.html>
11. 網頁資料：<http://www.yuden.co.jp/e/release/pdf/2003/20031006e.pdf>
12. 網頁資料：<http://www.st.com/stonline/products/families/discretes/ipad/promotion/ipadrang.htm>
13. Jia-Sheng Hong and M. J. Lancaster, Microstrip Filters For RF/Microwave Applications. John Wiley & Sons, 2001.