

國立交通大學

電信工程學系

碩士論文



全球微波存取互通介面高增益天線陣列及電磁帶隙結構之
應用

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) High Gain
Antenna Arrays with Electromagnetic Band-Gap Structure's Applications

研究生：陳建宏 (Jiang-Hong Chen)

指導教授：林育德 博士 (Dr. Yu-De Lin)

中華民國九十七年六月



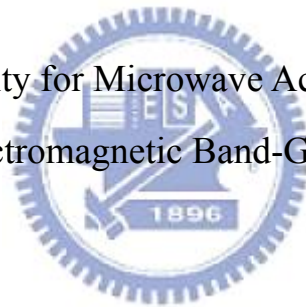
國立交通大學

電信工程學系碩士班

碩士論文

全球微波存取互通介面高增益天線陣列及電磁帶隙結構之應用

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) High Gain
Antenna Arrays with Electromagnetic Band-Gap Structure's Applications



研究生：陳建宏 (Jiang-Hong Chen)

指導教授：林育德 博士 (Dr. Yu-De Lin)

中華民國 九十七年六月

全球微波存取互通介面高增益天線陣列及電磁帶隙結構之應用

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) High Gain
Antenna Arrays with Electromagnetic Band-Gap Structure's Applications

研究生：陳建宏

Student : Jiang-Hong Chen

指導教授：林育德 博士

Advisor : Dr. Yu-De Lin

國立交通大學



A Thesis

Submitted to Department of Communication Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of
Master of Science

In

Communication Engineering

June 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

全球微波存取互通介面高增益天線陣列及電磁帶隙結構之 應用

研究生：陳建宏

指導教授：林育德 博士

國立交通大學 電信工程學系

摘要



全球微波存取互通介面(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)具有無線、遠距傳輸、寬頻等優點，將是下一代無線通訊系統標準之一。本論文中，我們將研究適用於 3.4GHz-3.7GHz 頻段的高增益天線陣列，並且能夠符合歐洲電信標準局(European Telecommunication Standards Institute, ETSI)規範的要求。

我們藉由提升微帶天線結構的高度來使設計的天線陣列能符合此系統頻段的頻寬與增益要求。

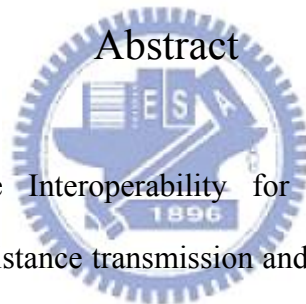
在論文中，我們設計無鉚釘(via)的電磁帶隙結構(electromagnetic band-gap：EBG)，也有人將此種結構稱為光子能隙(photonic band-gap：PBG)，透過結合微帶天線，可以了解電磁帶隙對天線性能的影響，更進一步改善微帶天線的輻射場形，抑制介質中表面波的激發。

Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) High Gain Antenna Arrays with Electromagnetic Band-Gap Structure's Applications

Student: Jiang-Hong Chen

Advisor: Dr. Yu-De Lin

Department of Communication Engineering
National Chiao Tung University



WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) has the advantages: wireless, far-distance transmission and wideband. It will be one of the wireless communication system standards in the next generation. In this thesis, we will research high gain antenna arrays suitable for 3.4GHz-3.7GHz WiMAX communication system, and it also satisfies ETSI specification.

We use microstrip antennas by increasing the height of antenna structure to let the antenna arrays can conform to this system bandwidth and gain requirement.

In this thesis, we will design an electromagnetic band-gap(EBG) structure without via. We also label it to photonic band-gap(PBG). By combining it with microstrip antenna, we can understand its effects on the properties of antenna. Further more, we can improve the radiation patter of the microstrip antenna and suppress surface wave's excitation in the substrate.

謝 誌

首先，我要誠摯地感謝我的指導教授--林育德博士，這兩年來在學術研究及專業領域上給我的許多指導，使得我對於無線通訊系統與天線研究領域能有相當程度的了解。感謝口試委員：林根煌教授、洪萬鑄教授、陳泰利教授，前來協助我們口試，對於學生的論文內容加以指導，使得論文得以更加完善。

另外，特別感謝實驗室林烈全學長，提供在天線領域上的知識與研究上的心得，在碩士兩年時間對我在研究上的指導與幫助。感謝實驗室學長阿德、智聰、旻翰和彭哥在一年來不厭其煩的教導，讓我們受益良多。當然，還要感謝實驗室的同學奕翔、陳鈺、志豪和家綱這兩年來互相幫助，互相成長以及學弟信良、仁佑和侑賢帶來生活上的樂趣。

最後，衷心感謝我最親愛的家人與親戚朋友，因為有他們的全力支持與照顧，我才能無後顧之憂地完成研究所的學業。



目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
謝誌.....	iii
目錄.....	iv
圖錄.....	v
表錄.....	ix
第一章 導論.....	1
1.1 工程背景與動機.....	1
1.2 章節介紹.....	2
第二章 基本理論與天線架構.....	3
2.1 微帶貼片天線和陣列理論.....	3
2.1.1 微帶貼片天線理論.....	3
2.1.2 陣列理論.....	6
2.2 天線結構.....	9
2.2.1 單一微帶貼片天線設計.....	9
2.2.2 高增益天線陣列設計.....	13
第三章 電磁帶隙結構.....	23
3.1 單位晶胞設計與截止帶比較.....	23
3.2 電磁帶隙結構包圍方式之探討.....	31
3.2.1 有限接地面的探討.....	31
3.2.2 天線周圍包圍 PMC.....	32
3.2.3 輻射邊兩側包圍 PMC.....	35
3.3 電磁帶隙結構結合單一微帶天線.....	37
3.4 電磁帶隙結構結合微帶天線陣列.....	40
3.5 模擬與量測結果比較.....	43
第四章 結論.....	50
參考文獻.....	51

圖 錄

圖 2-1、微帶貼片天線示意圖	3
圖 2-2、微帶天線等效傳輸線電路圖	5
圖 2-3、點波源等間距之線性陣列	6
圖 2-4、在不同間距時，E-plane 的陣列因子	8
圖 2-5、在不同間距時，H-plane 的陣列因子	8
圖 2-6、懸浮微帶線結構(Suspended microstrip line configuration)	9
圖 2-7、矩形微帶貼片天線示意圖	11
圖 2-8、矩形微帶貼片天線反射損耗	12
圖 2-9、矩形微帶貼片天線在中心頻率 3.55GHz 模擬的輻射場型	12
圖 2-10、饋入網路示意圖	13
圖 2-11、天線陣列饋入網路之反射損耗及插入損耗模擬圖	13
圖 2-12、天線陣列饋入網路各輸出埠相位差	14
圖 2-13、三元天線陣列	14
圖 2-14、三元天線陣列反射損耗	15
圖 2-15、三元天線陣列在中心頻率 3.55GHz 模擬的輻射場型	15
圖 2-16、天線陣列結構俯視圖	16
圖 2-17、天線陣列輻射場型	17
(a)3.4GHz	17
(b)3.55GHz	17
(c)3.7GHz	18
圖 2-18、天線陣列輻射場型與 ETSI-mask 之比較	19
(a)3.4GHz	19
(b)3.55GHz	19
(c)3.7GHz	19
圖 2-19、天線陣列模擬與量測之反射損耗	20

圖 2-20、天線陣列增益對頻率圖	21
圖 2-21、天線陣列實體圖	22
(a)俯視圖	22
(b)側視圖	22
圖 3-1、一維 EBG 結構電路圖	23
圖 3-2、EBG 結構集總電路圖	24
圖 3-3、微帶傳輸線	24
(a)俯視圖	24
(b)側視圖	24
圖 3-4、微帶傳輸線之反射損耗與插入損耗	25
圖 3-5、微帶線加上 EBG 結構正面與背面	25
(a)正面俯視圖	25
(b)背面俯視圖	25
圖 3-6、微帶線加上 4mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較	26
(a)單位晶胞大小	26
(b)反射損耗	26
(c)插入損耗	27
圖 3-7、微帶線加上 6mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較	27
(a)單位晶胞大小	27
(b)S 參數比較圖	28
圖 3-8、微帶線加上 8mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較	28
(a)單位晶胞大小	28
(b)S 參數比較圖	29
圖 3-9、微帶線加上 10mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較	29
(a)單位晶胞大小	29
(b)S 參數比較圖	30

圖 3-10、有限接地面產生之輻射場型比較圖	31
圖 3-11、介質中電場指向之強弱分布與感應磁流方向	32
圖 3-12、天線周圍包覆 PMC.....	33
圖 3-13、天線周圍包覆 PMC 之輻射場型比較.....	34
圖 3-14、表面波在介質空間中分佈	35
圖 3-15、輻射邊兩側包覆 PMC.....	36
圖 3-16、輻射邊兩側包覆 PMC 之輻射場型比較.....	36
圖 3-17、天線周圍包覆 EBG 之輻射場型比較	37
圖 3-18、輻射邊兩側包覆 EBG 之輻射場型比較	38
圖 3-19、較大接地面應用更多晶胞數改善輻射場型圖	39
圖 3-20、原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列	40
圖 3-21、原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列輻射場型比較	41
 (a)3.4GHz.....	41
(b)3.55GHz	41
(c)3.7GHz.....	41
圖 3-22、原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列與 ETSI-mask 比較.....	42
(a)3.4GHz.....	42
(b)3.55GHz	42
(c)3.7GHz.....	42
圖 3-23、應用 EBG 之天線陣列結構圖	43
圖 3-24、天線陣列輻射場型模擬與量測比較	44
(a)3.4GHz.....	44
(b)3.55GHz	44
(c)3.7GHz.....	45
圖 3-25、天線陣列輻射場型與 ETSI-mask 比較.....	45
(a)3.4GHz.....	45

	(b)3.55GHz	46
	(c)3.7GHz.....	46
圖 3-26、天線陣列反射損耗模擬與量測比較		47
圖 3-27、天線陣列增益對頻率圖		47
圖 3-28、天線陣列實體圖		49
	(a)俯視圖	49
	(b)側視圖(空氣高度=0.5mm).....	49
	(c)EBG 實體結構	49



表 錄

表 2-1、矩形微帶天線設計參數	11
表 2-2、天線陣列設計參數	16
表 2-3、ETSI-TS2 對輻射場型分布之要求	18
表 2-4、天線陣列增益對頻率表	21
表 3-1、天線周圍包覆 PMC 之增益改善比較	34
表 3-2、輻射邊兩側包覆 PMC 之增益改善比較	37
表 3-3、天線周圍包覆 EBG 之增益改善比較	38
表 3-4、輻射邊兩側包覆 EBG 之增益改善比較	39
表 3-5、天線陣列設計參數	43
表 3-6、天線陣列增益對頻率圖	48



第一章 導論

(Introduction)

1.1 工程背景與動機

近年來，電信多媒體應用快速的成長及網路使用的普及化，使用者需要的不只是能夠在任何時間地點使用電信資訊服務，且更需要增加使用頻寬及具有高傳輸速率的無線通訊。WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)也就是全球微波存取互通介面，是一個逐漸發展的點對點或點對多點無線通訊網路標準，其不但可以提供使用者足夠的頻寬，也能夠讓通訊服務業者不須要在地廣人稀的地方佈線，建立寬頻基礎建設而增加其營運成本。因此，許多開發中國家及鄉村地區能透過建設 WiMAX 通訊系統，以無線、遠距、寬頻的方式取代實體寬頻佈線，加速寬頻到家普及率。

隨著無線通訊的興起，天線所扮演的角色也日趨重要，為了使資料的無線傳輸達到寬頻要求，天線的製作上就需要有一定的規範，現行 WiMAX 覆蓋的頻段有 2.5/3.5/5.5 GHz(2500-2690/3400-3690/5250-5850 MHz)，在每個國家各有不同規定應用，其中美規訂於 2.5GHz-2.69GHz，而歐規訂於 3.4GHz-3.69GHz。本論文的天線陣列中心頻率設計於 3.55GHz，為了符合 WiMAX 寬頻資料傳輸及涵蓋範圍最大達 31 英哩的特性，天線陣列的設計必須具有高增益及寬頻的特性。因此本論文的天線陣列以滿足歐洲電信標準局(European Telecommunication Standards Institute, ETSI)規範為要求，天線增益在全頻段須大於 14dBi，而天線場型符合 ETSI-TS2 mask。

傳統上，製作高增益天線以反射型天線[1]及透射型天線[2]為主。為了減少製作成本、縮小體積，我們使用了微帶天線陣列。微帶天線的基本觀念早在 1950 年代就已經被提出，微帶天線已應用於各方面需求。針對微帶天線的寬頻設計方

式有利用厚空氣介質[3]、饋入匹配電路[4]及使用間隙耦合貼片[5]來增加天線頻寬；另外，由於有限接地面的限制，會產生表面波在板材邊緣造成繞射現象，使天線的增益降低及輻射場型的扭曲，為了抑制表面波的傳播，我們使用電磁帶隙(Electromagnetic Band-gap, EBG)週期性結構，讓某頻率範圍內禁止電磁波傳遞，這範圍也就是所謂的頻帶隙(Band-gap)，由於 EBG 結構在頻帶隙產生了高阻抗表面，所以可以有效抑制表面波並提升天線性能。

一般蘑菇型(mushroom)EBG 結構[6]雖易於抑制表面波的傳遞，但其缺點為製作不易，因為它需要透過鉚釘(via)來達成，以致增加許多成本，因此在論文中設計了無鉚釘的 EBG 結構，以增加其實用性，並且利用 EBG 排列包圍方式來結合微帶天線，改善輻射場型的扭曲[7]，最後，將結合 EBG 結構的高增益微帶天線陣列進行實做及量測，與模擬做統整與比較。



1.2 章節介紹

本論文第二章介紹微帶貼片天線和陣列的基本原理及論文中所設計的天線陣列結構。第三章主要介紹電磁帶隙結構，並對天線做一結合比較，內容包括：電磁帶隙設計，並使用於單一微帶天線及天線陣列，最後，模擬分析與量測比較。第四章為本文總結討論。

第二章 基本理論與天線結構

(Basic Theory and Antenna Structure)

2.1 微帶貼片天線和陣列理論

2.1.1 微帶貼片天線理論

微帶貼片天線(Microstrip Patch Antenna)具有結構簡單、製作方便、高度實用、而且可以很容易地經由長度及寬度的控制來做效能微調等特性。本論文中所製作的高增益天線以縮小面積，降低天線的剖面，降低成本，易於製作為主，利用微帶貼片天線的特色製作陣列，以達到我們需要的高增益天線。本論文中所設計的天線陣列以矩形微帶貼片天線為主。

矩形微帶貼片天線其結構包含了接地金屬面、介電質基板，還有饋入電路與輻射金屬片。如圖 2-1 所示。

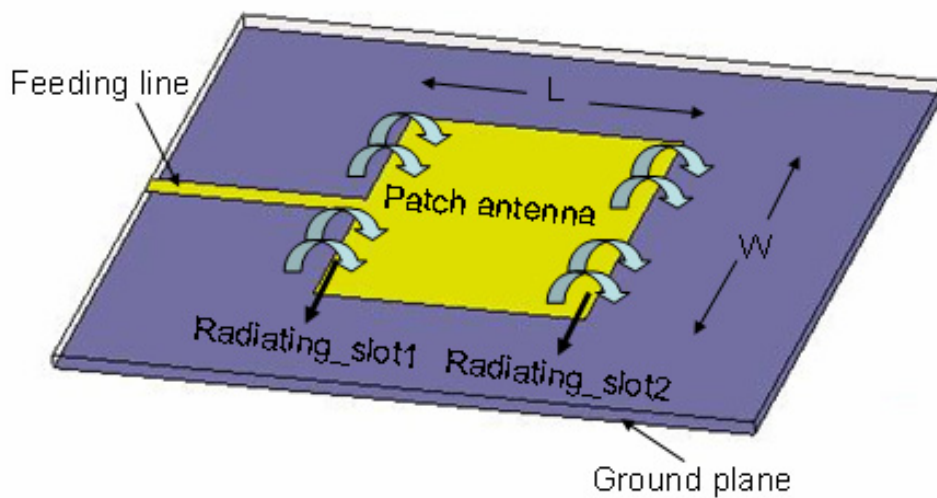


圖 2-1：微帶貼片天線示意圖

其可以視為兩個相隔長度 L 的輻射槽(Radiating slot)，每個槽的寬度相當於基板的厚度 h ，長度則相當於貼片天線的 W 。理論上這兩個槽應該相距 $\lambda_g/2$ ，其中 λ_g 為在介質中的波長。在貼片天線中有兩個重要的參數：等效介電常數 (effective dielectric constant) 及等效貼片長度 (effective length)。由於貼片天線的長和寬有限，所以在天線邊緣附近的會有漏電場的現象，此稱邊緣效應(edge effect)。而漏電場和貼片天線的寬度以及基板的介電常數、厚度有關，如果天線的 L/h 值遠大於 1，則漏電場的現象不會太嚴重。由於當考慮到邊緣效應，貼片天線上的電場在邊緣輻射時會同時經過介電材料及空氣，所以等效介電常數便不是原本板材的介電值。藉由式(2-1)我們可以得到一等效介電常數 ϵ_{reff} ，等效介電常數的範圍通常為 $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$ 。

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}, \quad \frac{W}{h} < 1 \quad (2-1)$$

等效介電常數對於天線的 W 跟 L 有很大的影響，貼片天線的寬度 W 是影響天線輻射效率的最大因素，其可由式(2-2)計算得知。

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-2)$$

而在天線輻射端的兩個槽，因為邊緣效應的影響，等效天線長度跟實際上的長度會有 $2\Delta L$ 的差距，由式(2-3)可以得到 ΔL 。

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2-3)$$

得知 ΔL 後，貼片天線的實際長度 $L = L_{eff} - 2\Delta L$ ，其中 $L_{eff} = \lambda_g/2$ 。微帶貼片天線邊緣輸入阻抗一般介於 100~400 歐姆之間。計算其輸入阻抗時，可將天線的兩個輻射槽各代表一並聯的導納 Y ，如圖 2-2 所示：

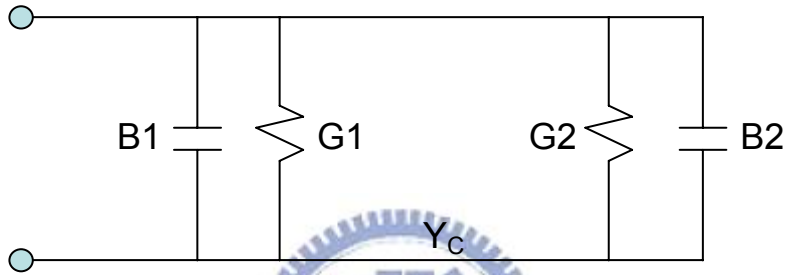


圖 2-2：微帶天線等效傳輸線電路圖

其中 G_1 及 B_1 的大小由天線的寬度 W 決定，式(2-4)及式(2-5)為 W 與 G_1 及 B_1 的關係式[9]。由於在此討論的天線為矩形貼片天線，天線兩邊的寬度會相同，故 G_2 及 B_2 的大小分別與 G_1 及 B_1 相同。而 Y_c 則為長度約為 $\lambda_g/2$ 傳輸線的特性導納。

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad , \quad \frac{h}{\lambda_0} < 0.1 \quad (2-4)$$

$$B_1 = \frac{k_0 \Delta L}{Z_0} \sqrt{\epsilon_{reff}} \quad (2-5)$$

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{reff}}} \frac{h}{W} \quad (2-6)$$

求得導納之後，由圖 2-2 等效傳輸線電路圖可得輸入阻抗 $R_{in} = 1/Y_{in}$ ， $Y_{in} = Y_1 + Y_2$ ， Y_1 為槽一(slot1)的導納($Y_1 = G_1 + jB_1$)， Y_2 為槽二(slot2)的導納($Y_2 = G_2 + jB_2$)。因為共振長度為 $\lambda_g/2$ ，所以兩個輻射槽的電納相差 180° ($B_1 = -B_2$)，因此輸入導納為 $2G_1$ ，輸入阻抗則為 $R_1/2$ 。天線的邊緣輸入阻抗求得之後，我們可以利用 $\lambda/4$ 轉換線饋入與 50Ω 接頭匹配，方便饋入線(feeding line)的設計。

2.1.2 陣列理論

設計天線陣列時，其天線陣列的排列結構、各元素間的距離、各元素激發的振幅與相位及單一元素的場型，都會影響陣列的場型分佈[1]。圖 2-3 為一點波源等間距之線性陣列。

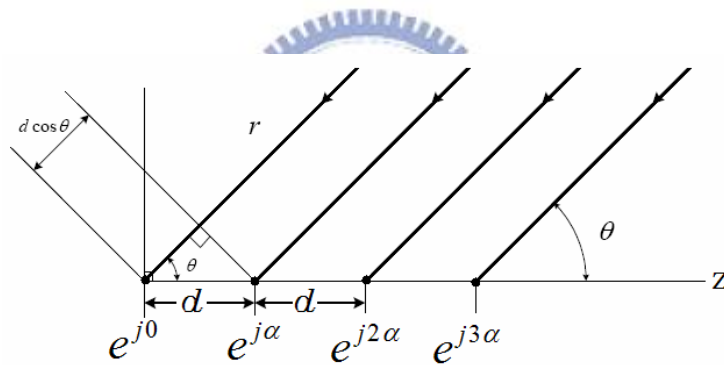


圖 2-3：點波源等間距之線性陣列

若元素間激發電流相位差為 α ，一等能量饋入的天線陣列之陣列因子如式 (2-7) 所示。

$$AF = \sum_{n=0}^{N-1} A_0 e^{jn\psi} \quad , \quad \psi = \beta d \cos \theta + \alpha \quad (2-7)$$

其中 d 為天線陣列元素的間距， β 為波數， θ 為偏離 Z 軸之角度， α 為元素間的相位差。

經過推導，忽略其相位因子，正歸化的陣列因子為：

$$f(\psi) = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \right] \quad (2.8)$$

在 $\psi=0$ 時有最大值，主波束的方向為：

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{-\alpha}{\beta d} \right) \quad (2.9)$$

藉由陣列因子我們將可以預估理想狀況下天線陣列的輻射場型，由於本論文天線陣列由 3×3 陣列矩陣所組成，且微帶天線場型是分佈在天線的垂射(broadside)方向，故在設計天線陣列的饋入網路時，每個元素間所得到的能量應為等大小，同相位。圖2-4及圖2-5分別為 3×3 天線陣列E-plane及H-plane在相同大小及相位時，所計算的陣列因子。我們可以藉由適當間距的陣列因子與微帶天線的場型乘積，獲得理想上的天線陣列輻射場型分佈。

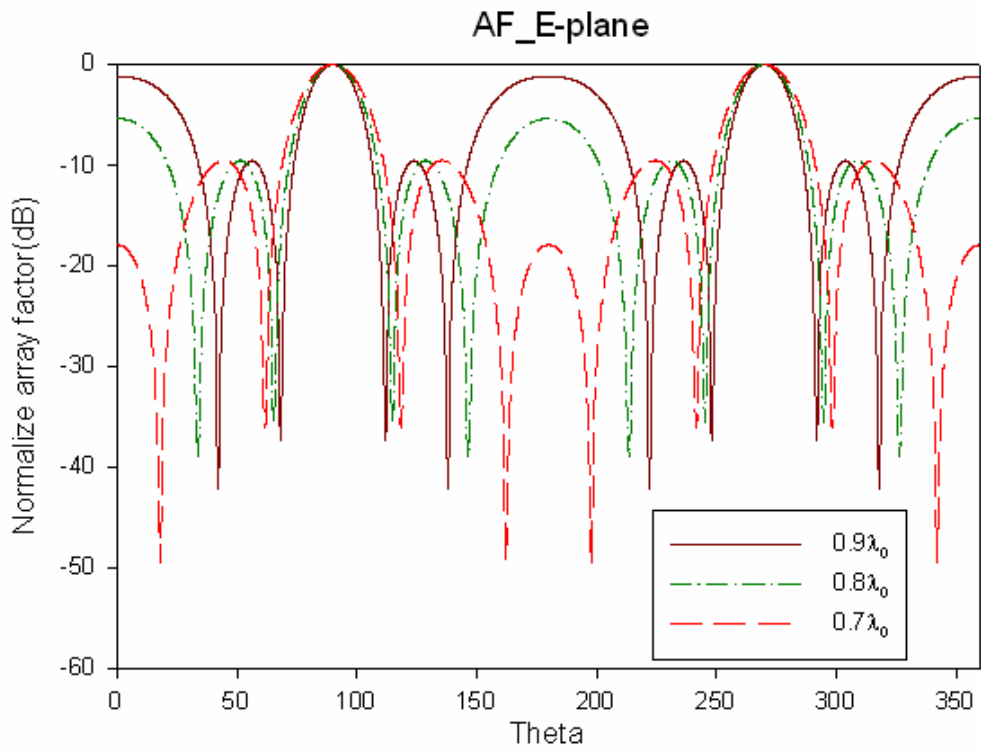


圖 2-4：在不同間距時，E-plane 的陣列因子

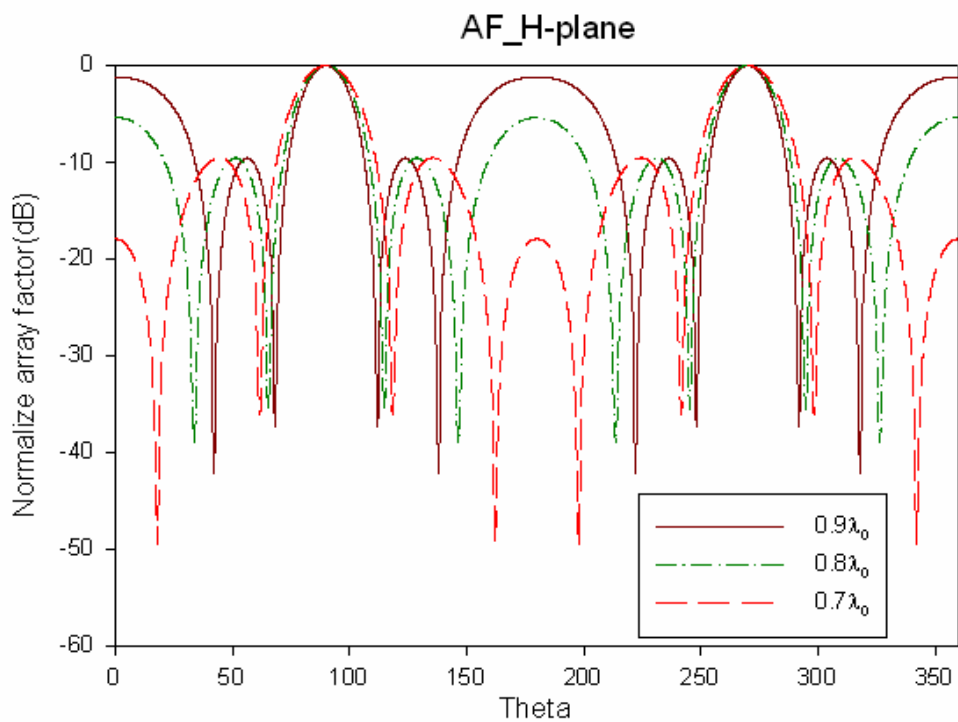


圖 2-5：在不同間距時，H-plane 的陣列因子

2.2 天線結構

2.2.1 單一微帶貼片天線設計

由於微帶貼片天線是一共振型天線，傳統上其頻寬較窄，所以我們可以藉由改變天線的形狀，增加天線的共振路徑，或者改變天線的結構，以提高頻寬及增益。

設計微帶貼片天線時，基板(substrate)影響天線效能較大的有三個參數：介質損耗(正比於 $\tan \delta$)、介電常數(ϵ_r)以及厚度(h)。其中介質損耗越小越好，如此可以提高天線效率及增益，但相對的成本也較高；而介電常數也是越小越好，如此可以增加頻寬，提高天線的指向性及增益，相對的天線的尺寸也越大；厚度則是越大越好，如此可以提高天線效率及增益，有效增加頻寬，但厚度太大則容易產生表面波，使得部分能量被束縛在基板中，無法輻射出去。

基於上述基板對天線效能的影響，以及本論文對頻寬及增益的要求，我們採用 FR4($\epsilon_r = 4.4$)玻璃纖維基板並且採用厚空氣介質，如此可以有效降低等效介電常數值及提高厚度，藉以達到寬頻及高增益的特性。如圖 2-6 所示：

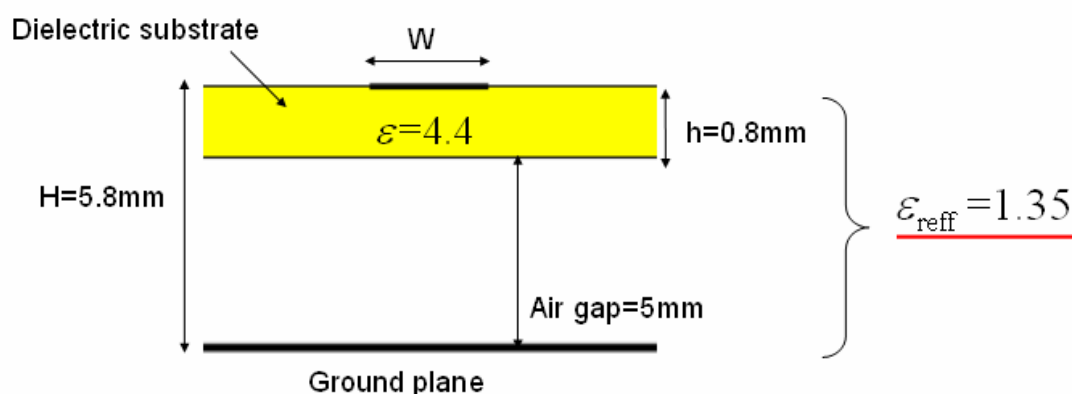


圖 2-6：懸浮微帶線結構(Suspended microstrip line configuration)

如圖 2-6 加上 air gap 高度之後，其等效介電常數會有所改變，其可由式(2-10) 得到一近似值[10]。

$$\varepsilon_{re\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r [h + (H - h)]}{h + \varepsilon_r (H - h)} \quad (2-10)$$

另外，懸浮微帶線的特性阻抗(假設 $t=0$)則由式(2-11)得到較精確的值，以便設計 饋入網路[11]。

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{re}}} \ln \left[\frac{F_1}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u}\right)^2} \right] \quad (2-11)$$

其中，

$$F_1 = 6 + (2\pi - 6) e^{-(30.666/z)^{0.7528}} \quad (2-11a)$$

$$\eta_0 = 120\pi (\Omega) \quad , \quad u = \frac{W}{h} \quad (2-11b)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{re}} = \left[1 + \frac{h}{H-h} \left(a - b \ln \frac{W}{H-h} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (2-12)$$

其中，

$$a = \left[0.8621 - 0.125 \ln \left(\frac{h}{H-h} \right) \right]^4 \quad (2-12a)$$

$$b = \left[0.4986 - 0.1397 \ln \left(\frac{h}{H-h} \right) \right]^4 \quad (2-12b)$$

利用前面提到的矩形微帶天線基本理論將天線的寬度及長度求出，把饋入網路與天線元素在同一平面做一結合，設計參數如表 2-1：

Dielectric constant	4.4
Substrate thickness	0.8mm
Loss tangent	0.02
Air gap	5mm
Single patch size	41.6mm(W) x 33.5mm(L)
Feeding line width	0.901mm
Feeding line length	19.96mm

表 2-1：矩形微帶天線設計參數

利用式(2-4)、(2-5)及(2-6)求出天線邊緣的輸入阻抗，再設計一四分之一波長傳輸線饋入，並以特性阻抗 Z_0 的輸入埠進行模擬，如圖 2-7 所示：

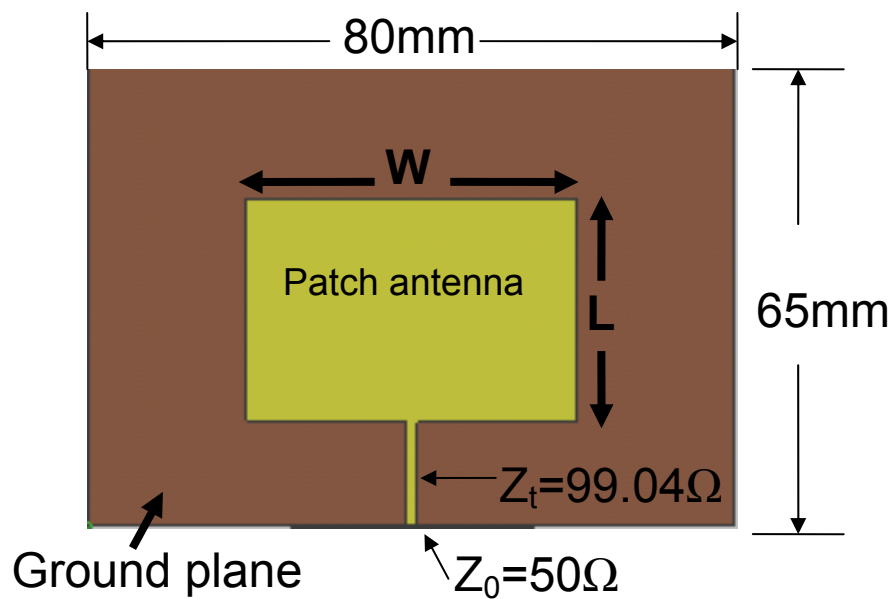


圖 2-7：矩形微帶贴片天線示意圖

當天線共振時，天線邊緣的輸入阻抗 Z_{in} 可藉由 $Z_{in} = Z_t^2 / Z_0$ 計算得知。接著觀察中心頻率為 3.55GHz 的矩形微帶貼片天線其反射損耗與輻射場型，圖 2-8 為反射損耗圖。圖 2-9 為中心頻率 3.55GHz 模擬的輻射場型。

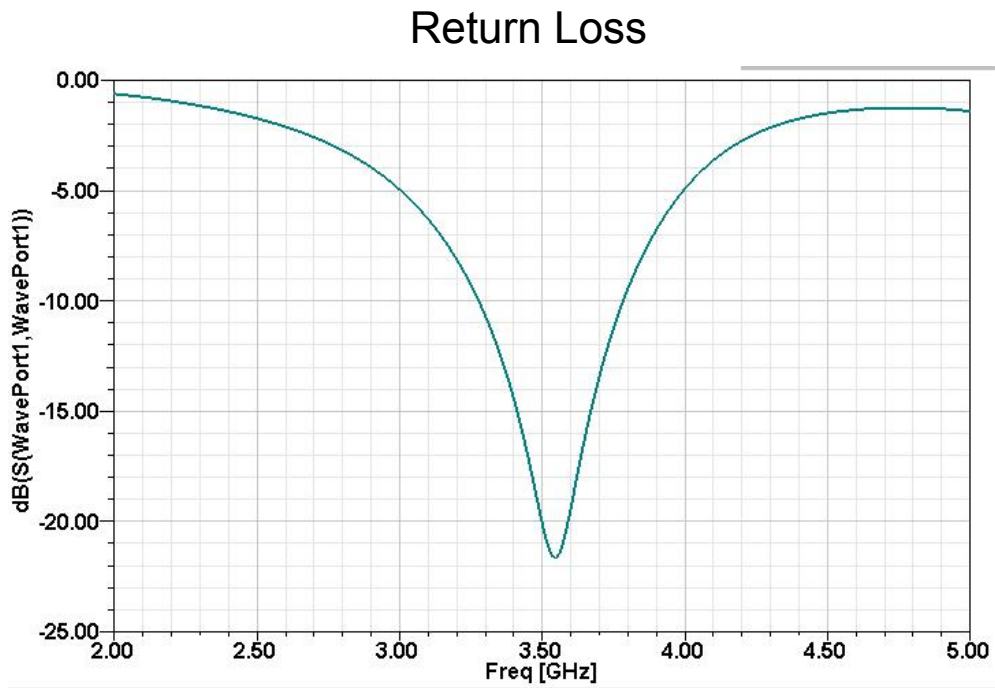


圖 2-8：矩形微帶貼片天線反射損耗

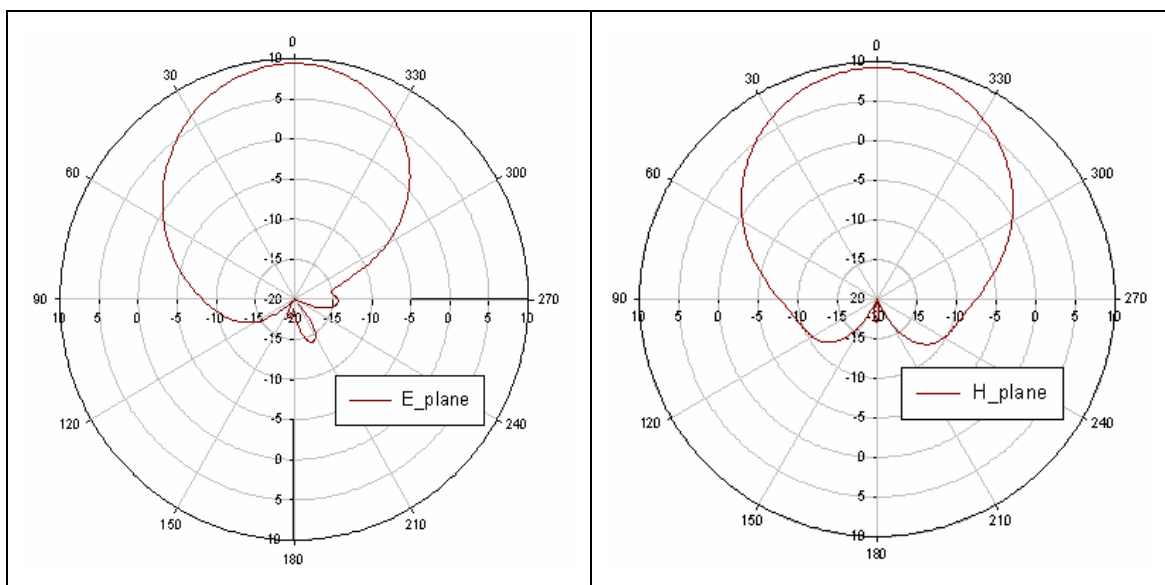


圖 2-9：矩形微帶貼片天線在中心頻率 3.55GHz 模擬的輻射場型

2.2.2 高增益天線陣列設計

首先，以微帶線並聯的饋入結構設計能量一分三的網路，再利用傳輸線作阻抗的匹配[13]，最後再以其寬頻的特性饋入到天線陣列，圖 2-10 為饋入網路示意圖，圖 2-11 及圖 2-12 分別為饋入網路之反射損耗(Return Loss)、插入損耗(Insertion Loss)以及各輸出埠相位圖。

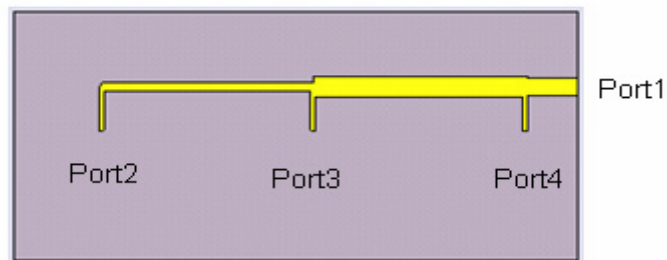


圖 2-10：饋入網路示意圖

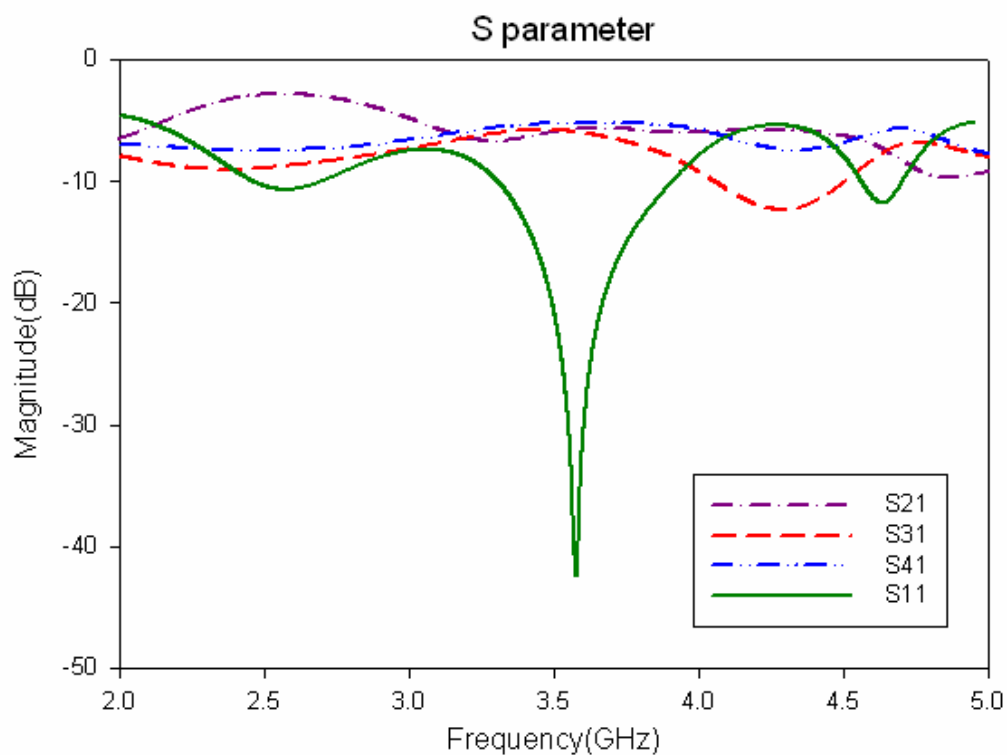


圖 2-11：天線陣列饋入網路之反射損耗及插入損耗模擬圖

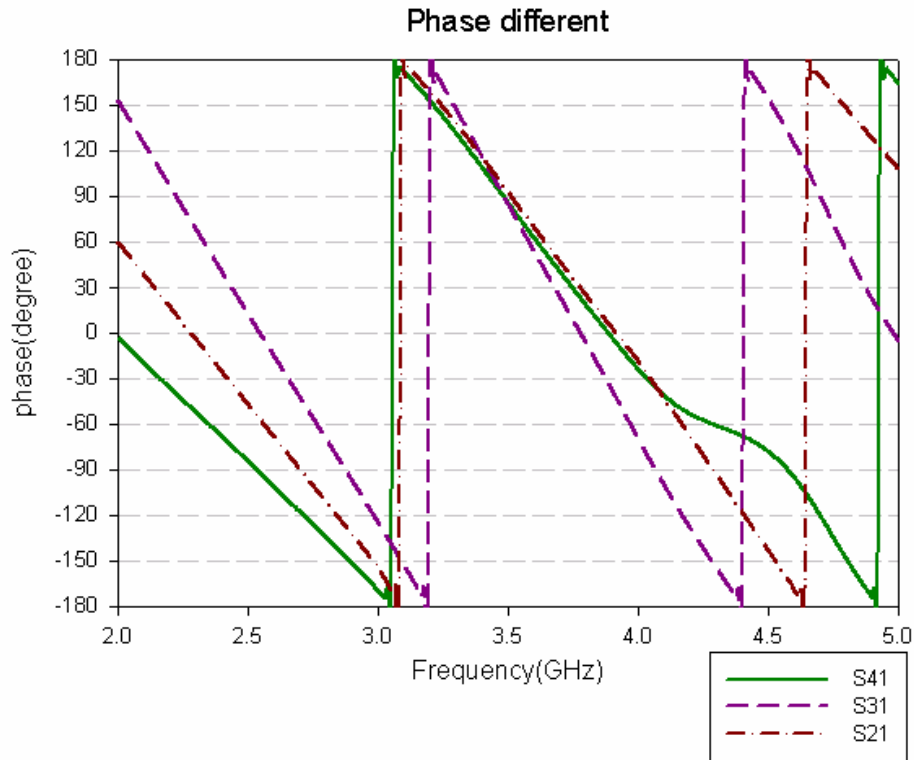


圖 2-12：天線陣列饋入網路各輸出埠相位差

從圖 2-11 可以發現各輸出埠的能量在不同頻率的變化，實線為埠一(port1)的反射損耗，其餘為埠二、三及四的插入損耗，在工作頻率的範圍，輸出埠的能量差值在 2dB 以內。而每個輸出埠在工作頻率的相位差為 20° 以內。

接著我們利用圖 2-10 的分歧器，輸出埠接上天線，三元天線陣列如圖 2-13，觀察其反射損耗(圖 2-14)與輻射場型(圖 2-15)。

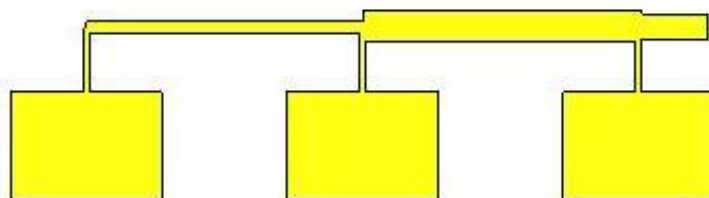


圖 2-13：三元天線陣列

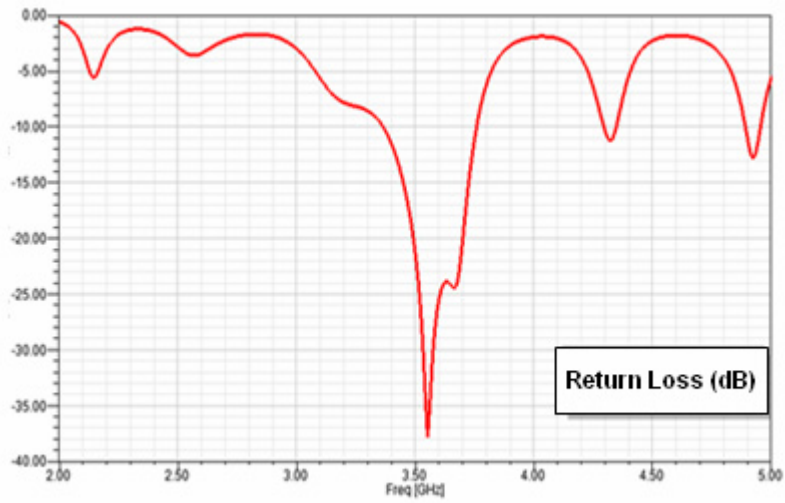


圖 2-14：三元天線陣列反射損耗

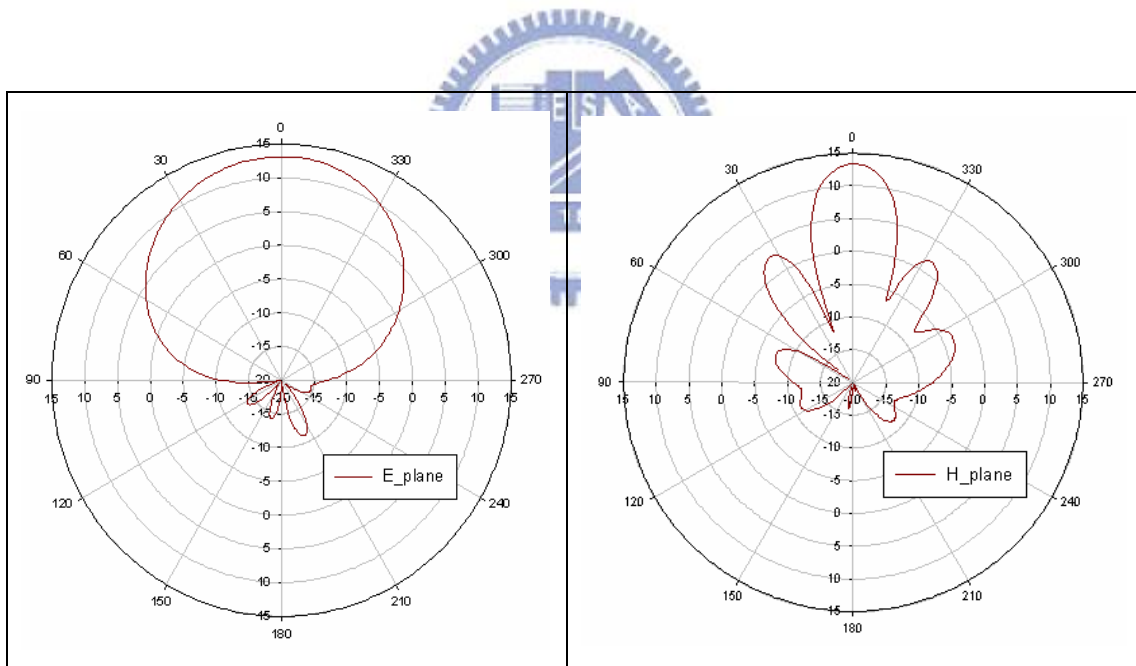


圖 2-15：三元天線陣列在中心頻率 3.55GHz 模擬的輻射場型

由圖 2-14、圖 2-15 了解到反射損耗在工作頻段(3.4GHz~3.7GHz)滿足要求，觀察輻射場型發現增益已可達到 12dBi，此時再利用一組能量一分三的分歧器，設計總天線陣列，預計為三乘以三共九個元素的天線陣列，設計參數如表 2-2：

Dielectric constant(top , bottom)	4.4 , 4.4
Substrate thickness(top , bottom)	0.8mm , 1.6mm
Loss tangent	0.02
Air gap	5mm
Upper substrate size	250mm x 200mm
Ground size	300mm x 250mm

表 2-2：天線陣列設計參數

圖 2-16 為天線陣列結構圖，由於饋入網路阻抗匹配與相位差對天線陣列影響非常大，所以設計其信號饋入端為 50Ω ，以符合實際上使用的 SMA 接頭，使饋入網路匹配。

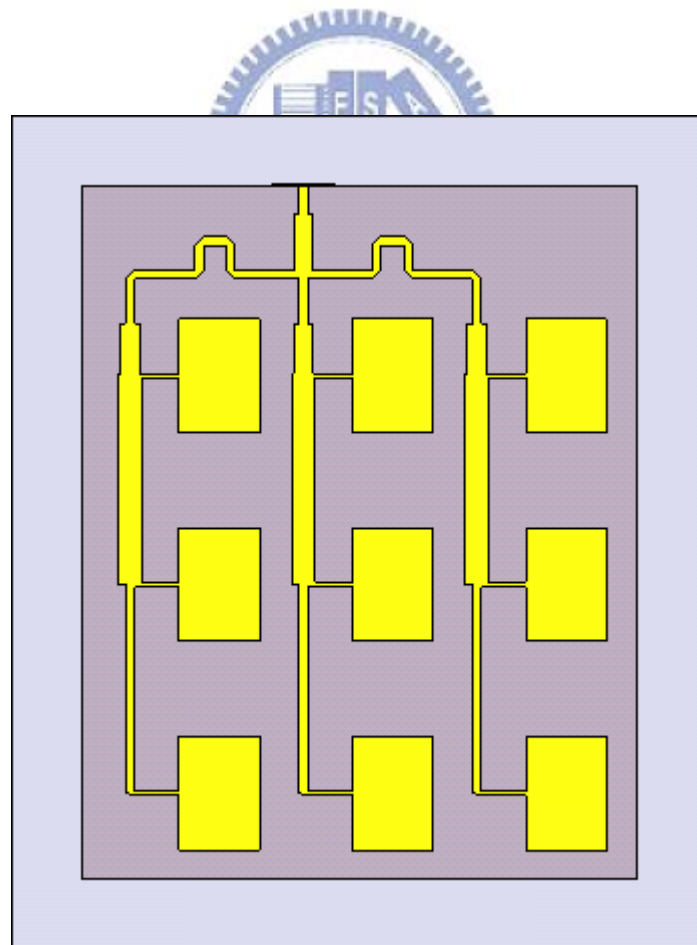
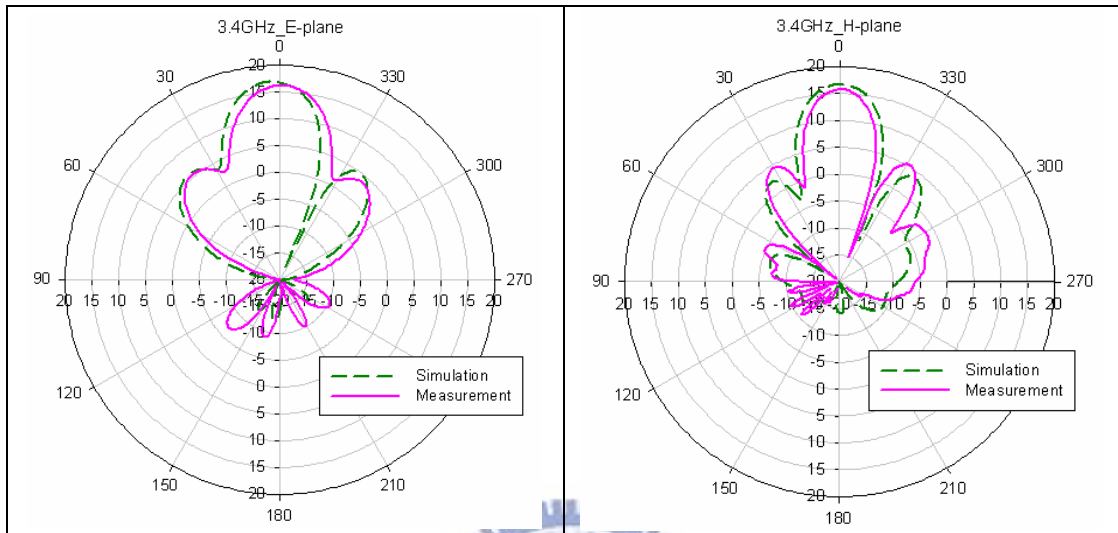
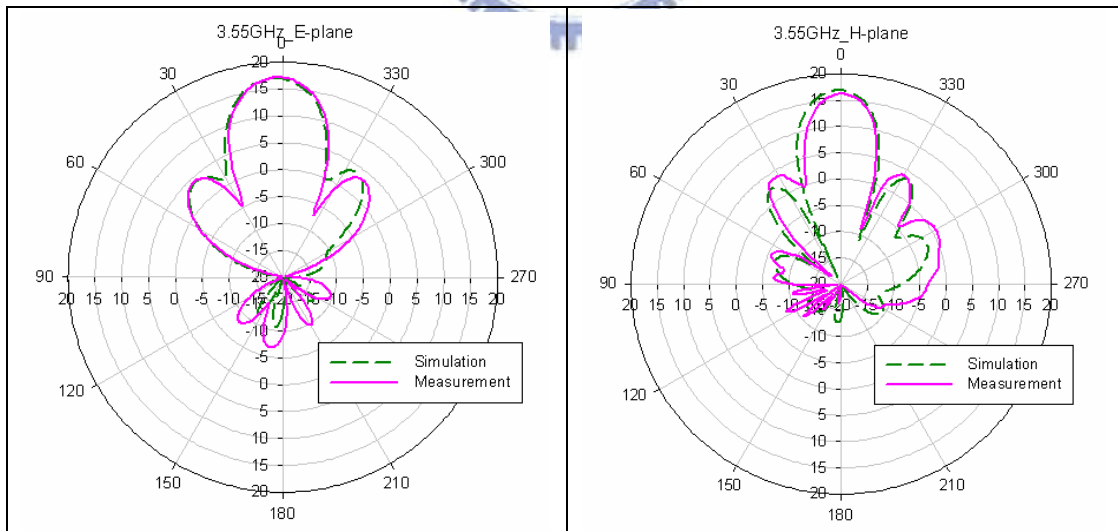


圖 2-16：天線陣列結構俯視圖

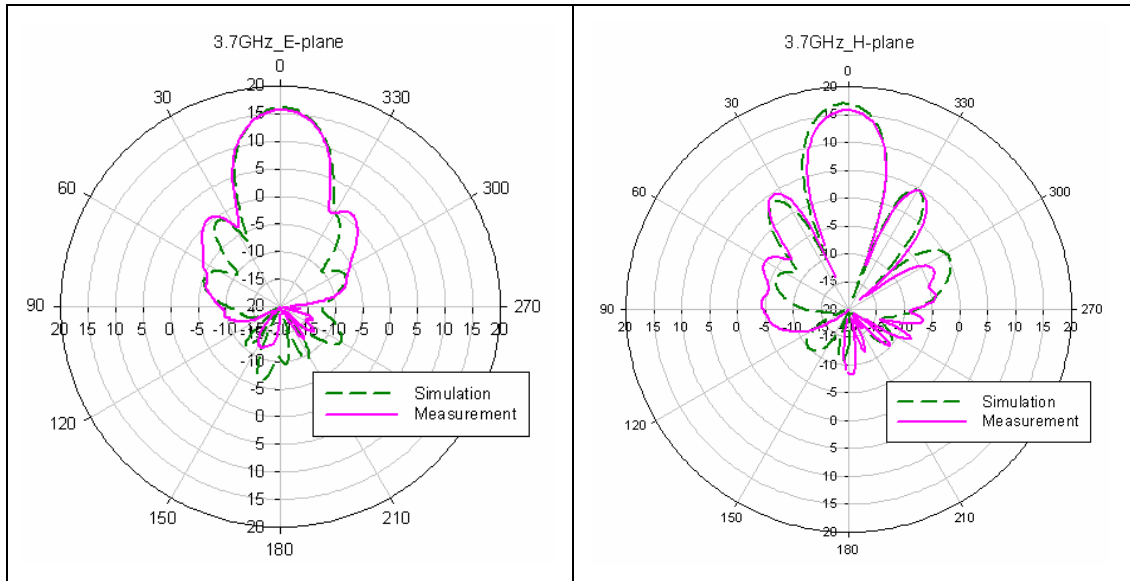
圖 2-17 為天線陣列在(a)3.4GHz、(b)3.55GHz、(c)3.7GHz 的輻射場型，從圖中可看出模擬與量測的輻射場型相當接近，增益也能達到要求。



(a)3.4GHz



(b)3.55GHz



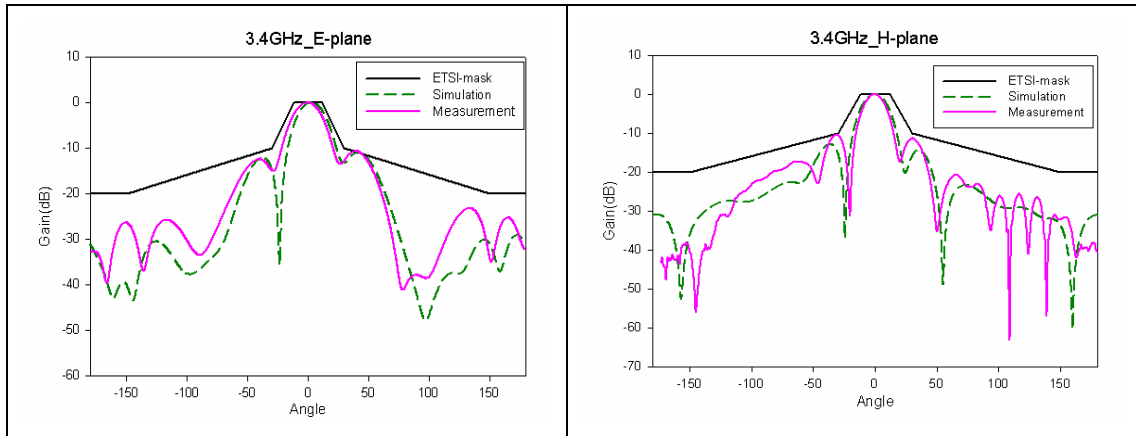
(c)3.7GHz

圖 2-17：天線陣列輻射場型

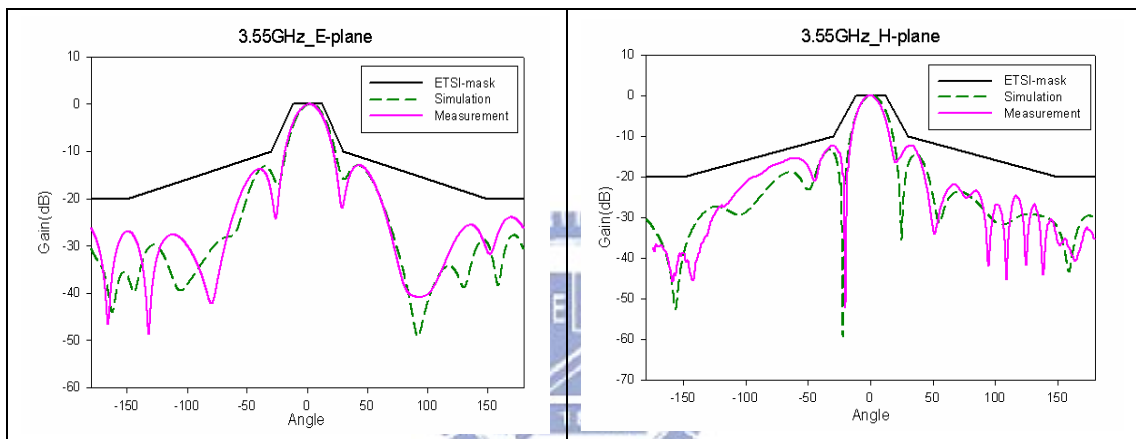
天線結構確定之後，對於其輻射場型的分布需求要符合 ETSI-TS2 的規範。表 2-3 為 ETSI-TS2 對輻射場型分布的要求，以下針對輻射場型與 ETSI-mask 做一比較，如圖 2-18 所示，從圖中發現，除了 3.4GHz 些微超出標準之外，其餘頻段都能滿足輻射場型要求，之後會將改善的部份再做比較。

Co-polar	Angle (°)	Gain (dB)
P0	0	0
P1	12	0
P2	30	-10
P3	90	-15
P4	150	-20
P5	180	-20
Cross-polar	Angle (°)	Gain (dB)
Q0	0	-15
Q1	90	-15
Q2	150	-20
Q3	180	-20

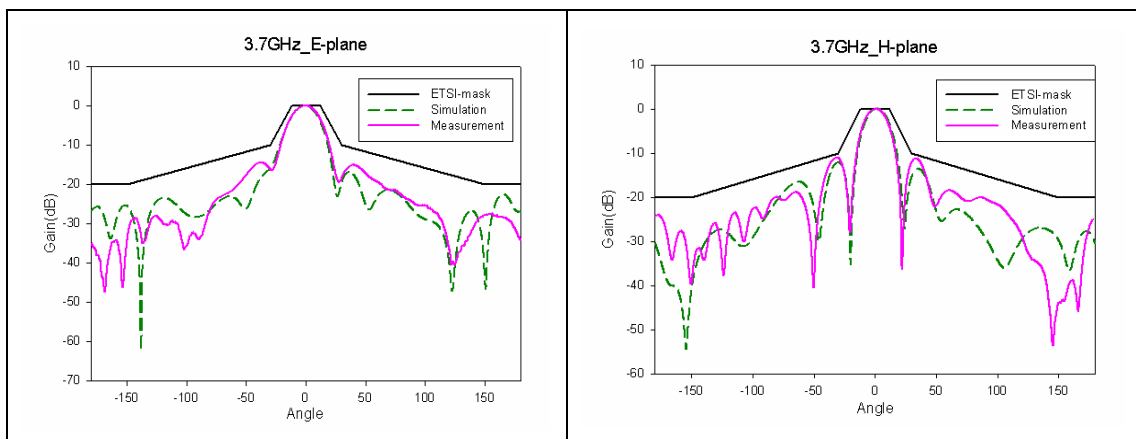
表 2-3：ETSI-TS2 對輻射場型分布之要求



(a)3.4GHz



(b)3.55GHz



(c)3.7GHz

圖 2-18：天線陣列輻射場型與 ETSI-mask 之比較

圖 2-19 為天線陣列模擬與量測的反射損耗，其工作頻率與設計之天線相去不遠，均包含 3.4GHz~3.7GHz。圖 2-20 為實際量測的增益對頻率的變化圖，其增益的全頻段都能大於 14dBi，其中某些頻率點可看出 E-plane 與 H-plane 所量測到的最大增益值並不相同，這主要的原因在於由饋入網路輸出端在在不同頻率會有些微的相位差所致，使得天線的最大增益值會些微偏移一個角度，不過，基本上的趨勢還是相近。

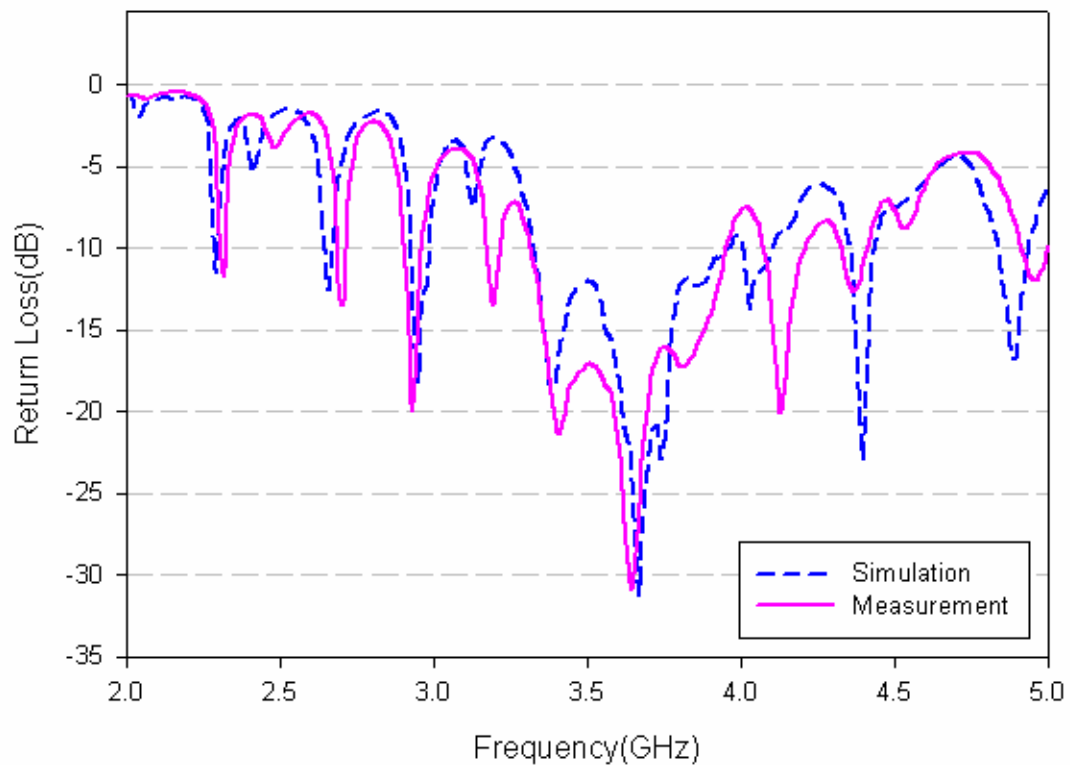


圖 2-19：天線陣列模擬與量測之反射損耗

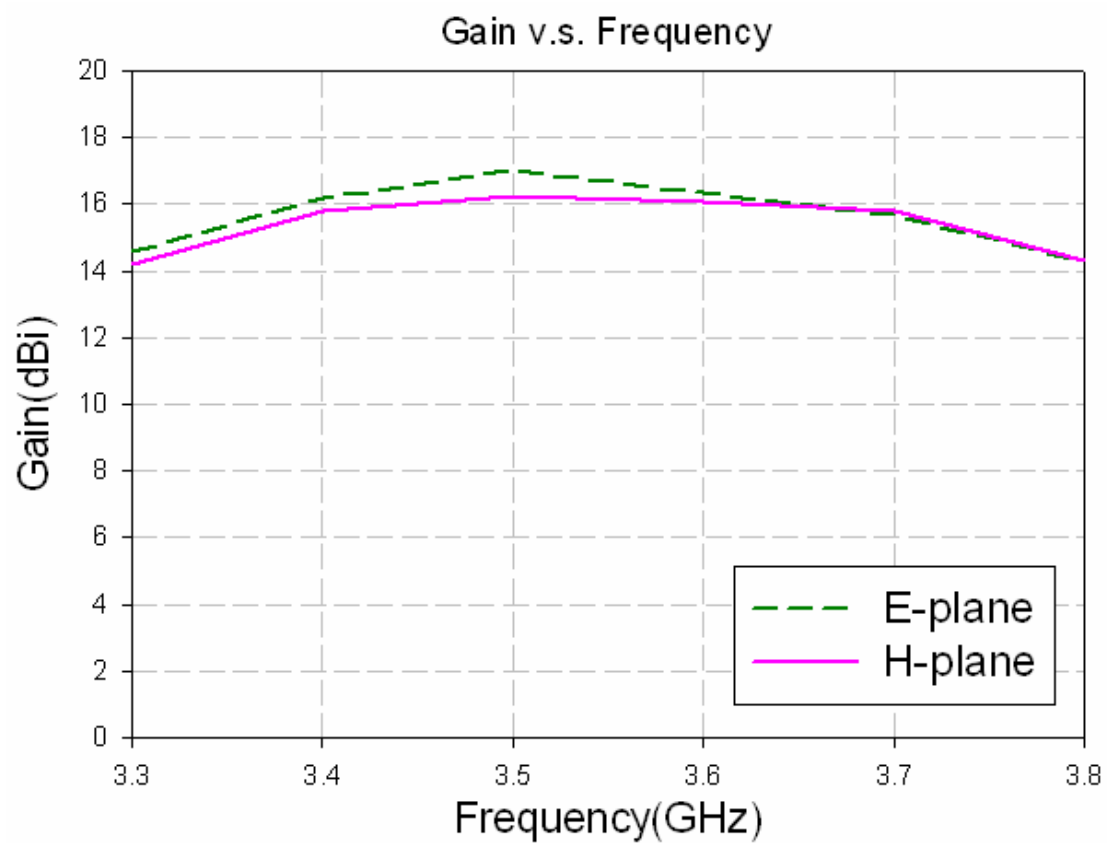
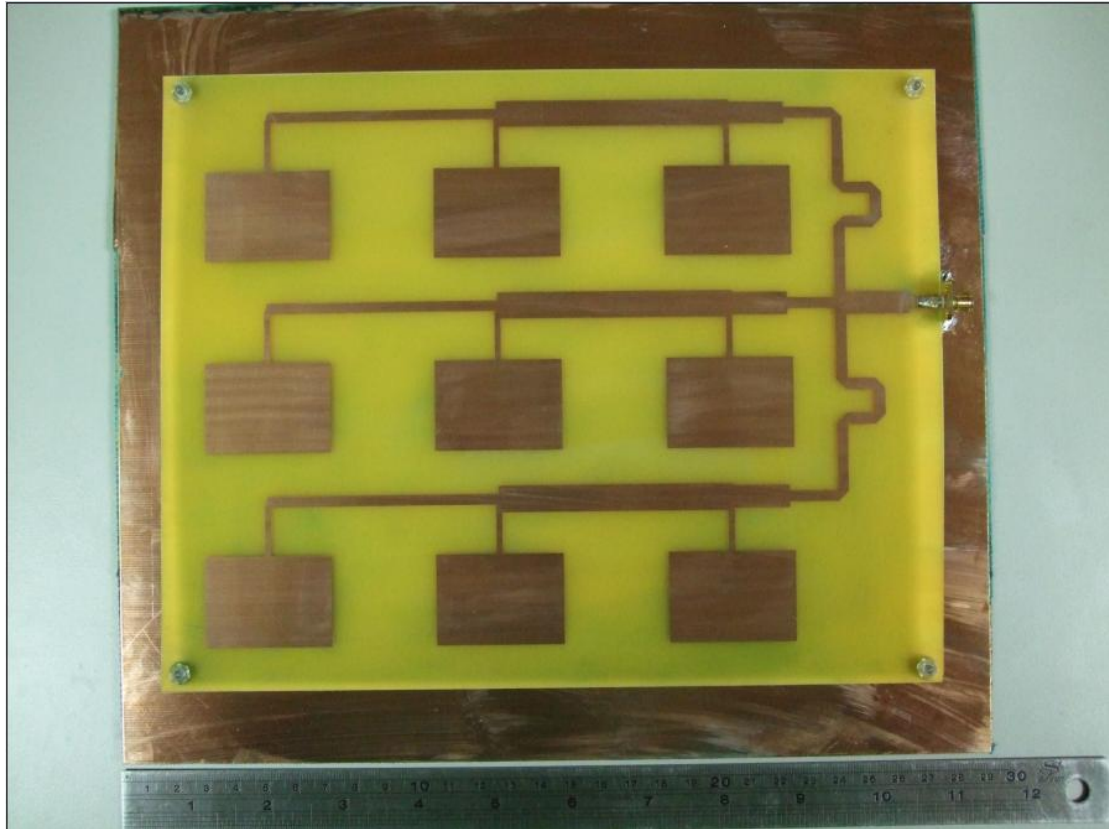


圖 2-20：天線陣列增益對頻率圖

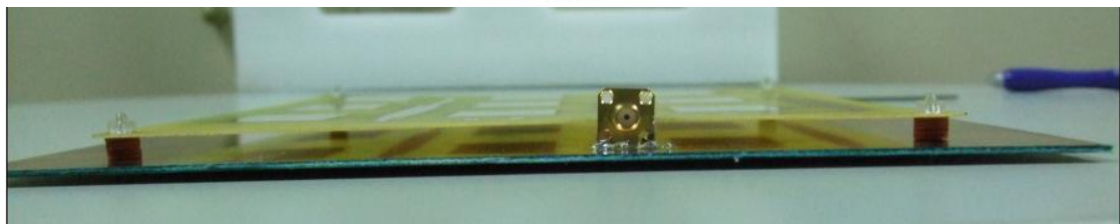


頻率(GHz)	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8
E-plane 增益 (dBi)	14.57	16.19	17.02	16.34	15.68	14.29
H-plane 增益 (dB)	14.21	15.82	16.24	16.07	15.81	14.34

表 2-4：天線陣列增益對頻率表



(a)俯視圖



(b)側視圖

圖 2-21：天線陣列實體圖(a)俯視圖(b)側視圖

第三章 電磁帶隙結構與應用

(Electromagnetic Band-Gap Structure and Its Applications)

3.1 單位晶胞設計與截止帶比較

在天線中，通常在較高之基板厚度及較大之介電常數時，容易產生表面波，干擾天線輻射。為了阻止表面波的傳遞，論文中設計了高阻抗表面，也就是所謂的電磁帶隙(EBG)結構，能有效抑制表面波，提升天線效能。

在近幾年，許多微波領域的研究文獻，利用光子能隙(Photonic Band-Gap, PBG)的概念，也就是在介電係數成週期性排列的三維介電材料中，電磁波經介電函數散射後，某些波段的電磁波強度會因破壞性干涉而呈現衰減，無法在系統內傳遞而在頻譜上形成截止帶[7][8]，應用這個觀念，在平面式傳輸線上設計具有週期性幾何結構的電路，造成電磁波在某些頻段無法傳遞而達到濾波的效果，由於使用於微波頻段，所以稱此種結構為電磁帶隙或電磁能隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)結構。

一個 EBG 結構電路時為一個電路之接地面在沿著某方向或平面，做週期性幾何結構變化所構成的電路，如圖 3-1，

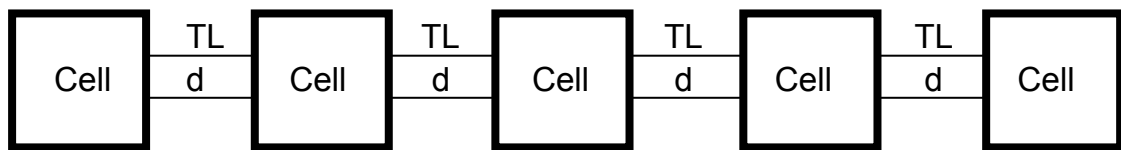


圖 3-1：一維 EBG 結構電路圖

利用 EBG 電路的週期性幾何結構，形成一個電磁波的截止帶，實線一個具有寬頻與良好效能的帶止濾波器(Bandstop Filter)，本論文使用共平面緊密電磁帶隙結構(Uniplanar Compact EBG)如圖 3-2，取代傳統的完整或切割連結通道

的平面結構。每個單位細胞間以細線做連結，細線提供了主要的電感效應，每個單位細胞間以狹縫做為區隔，細狹縫間之互容效應與單位細胞之平面電容，提供了主要電容效應，利用並接的電感、電容效應來達到一寬頻的截止帶。

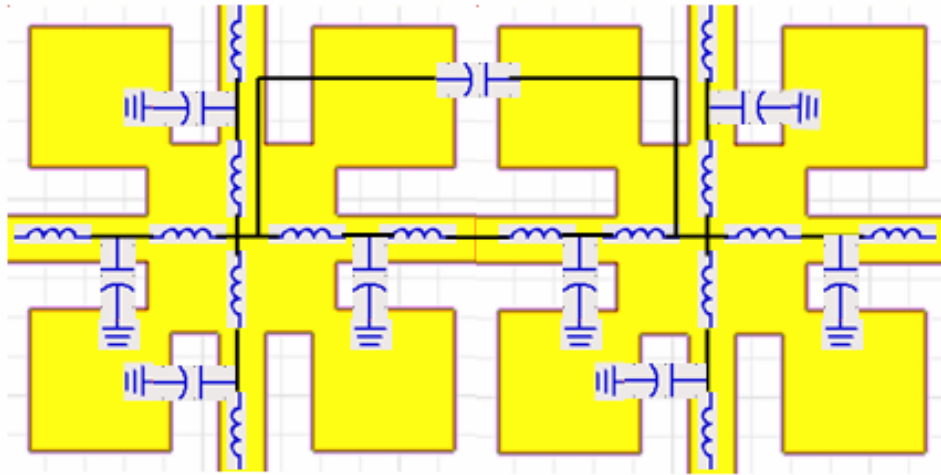


圖 3-2：EBG 結構集總電路圖

為了得到我們需要的截止帶，首先模擬一個理想傳輸線當對照組(圖 3-3)，使用了介電常數值為 4.4 的 FR4 電路板，厚度為 1.6mm，觀察其反射損耗與插入損耗，從圖 3-4 了解到傳輸線從 1GHz 到 15GHz 反射損耗皆在 -20dB 以下，插入損耗 -3dB 以上。

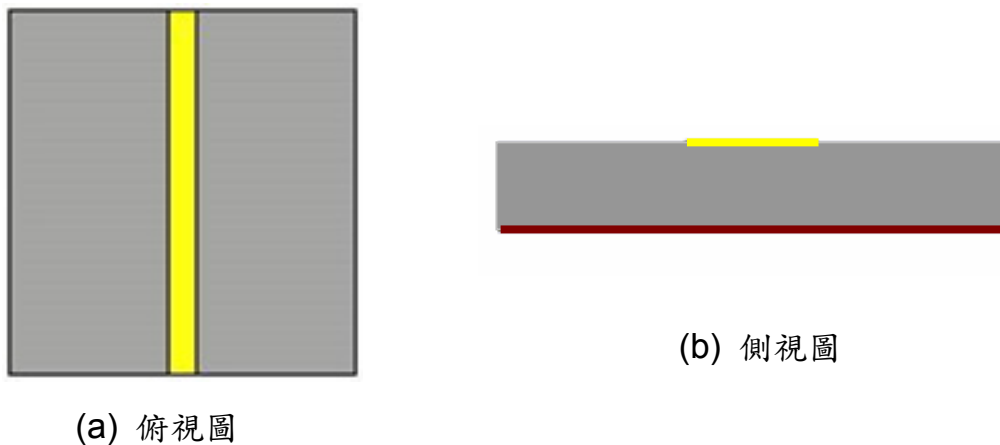


圖 3-3：微帶傳輸線

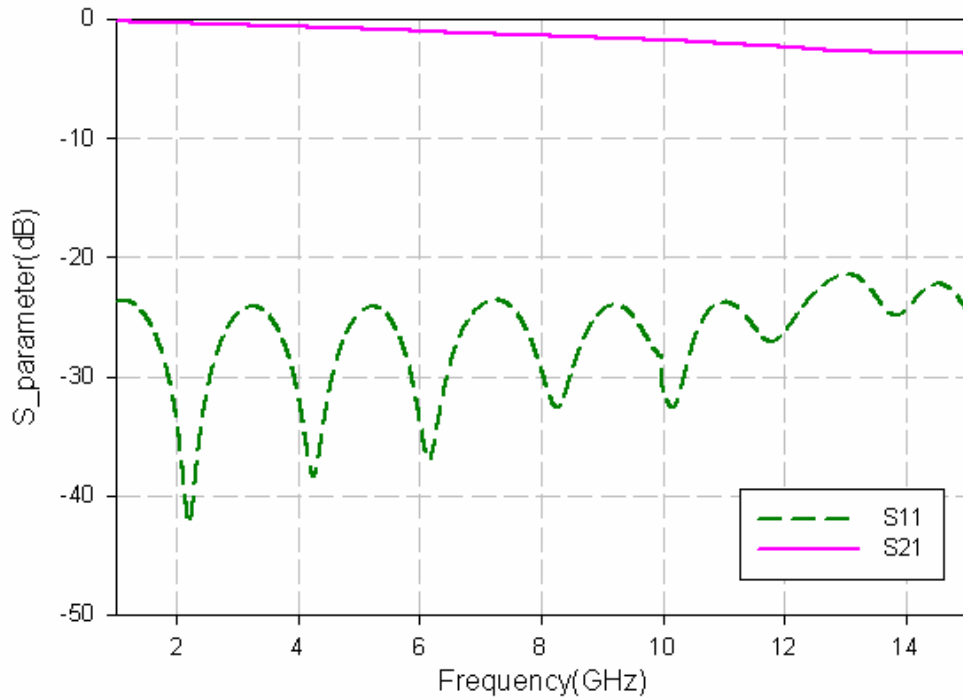


圖 3-4：微帶傳輸線之反射損耗與插入損耗

利用電磁帶隙週期性二維的重複結構如圖 3-5，可以找到我們所需要的截止帶，從微帶線的插入損耗可以明顯得到所設計的截止帶頻段，跟單位晶胞的大小成正相關，整體電路的等效電感與等效電容越大，相對的頻帶也會往低頻跑。

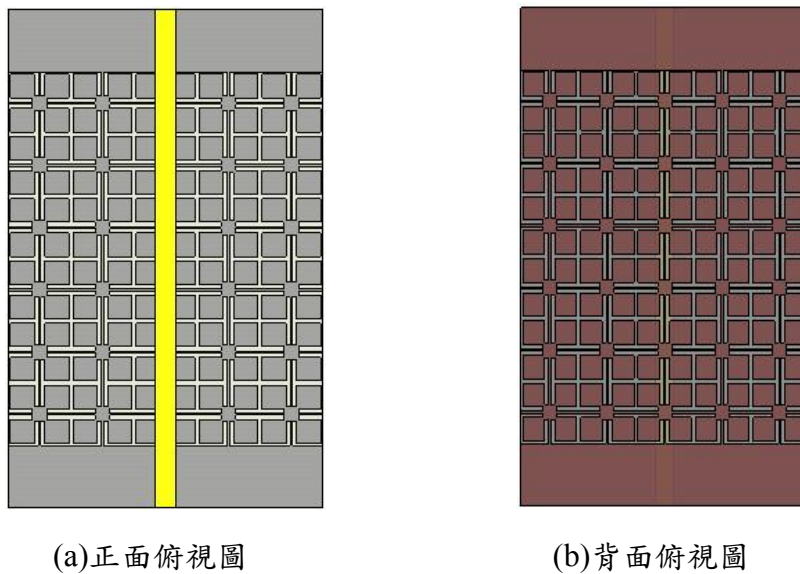
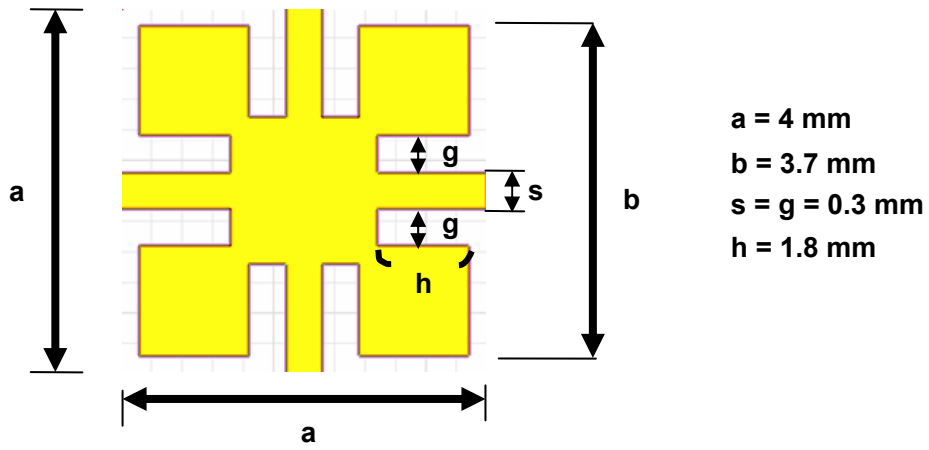
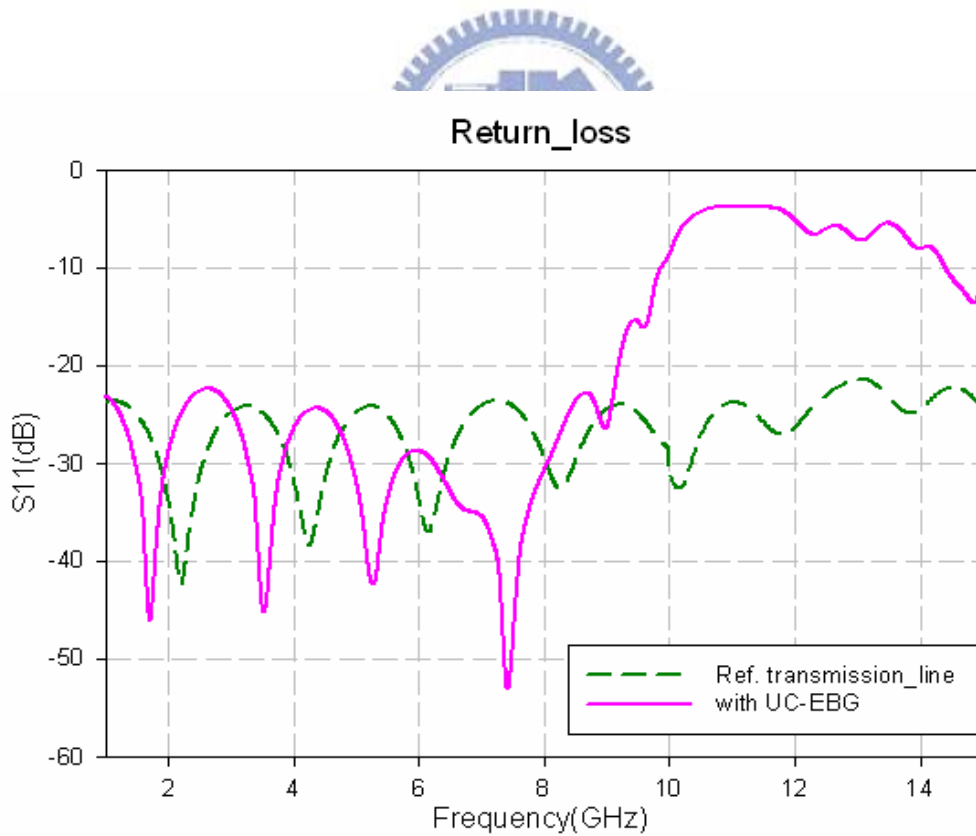


圖 3-5：微帶線加上 EBG 結構正面與背面

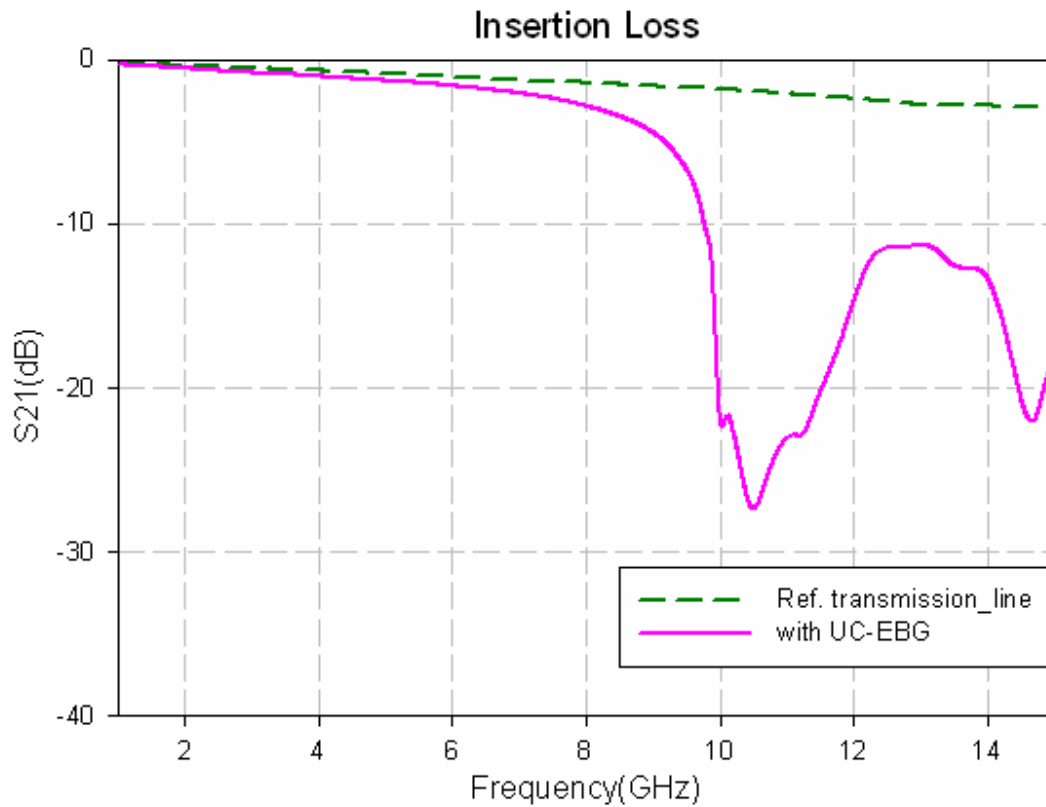
改變單位晶胞大小與截止帶之比較，分別從(圖 3-6)4mm²、(圖 3-7)6mm²、(圖 3-8)8mm²、(圖 3-9)10mm²的晶胞大小可以控制截止帶落在哪些區域。



(a)單位晶胞大小



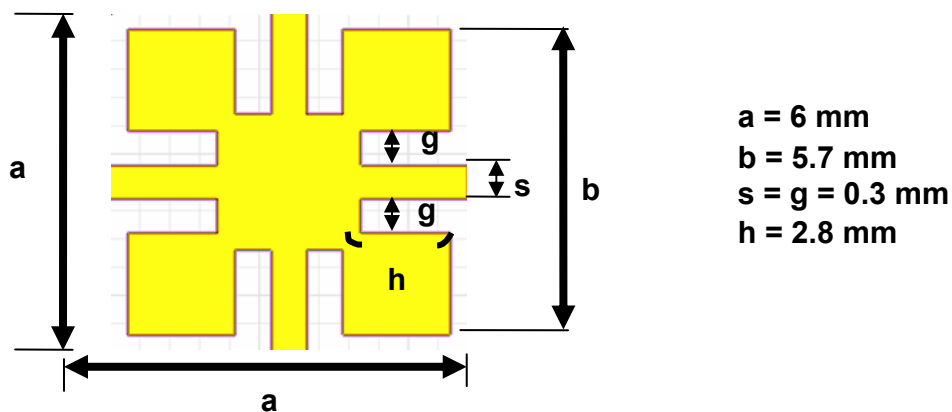
(b)反射損耗



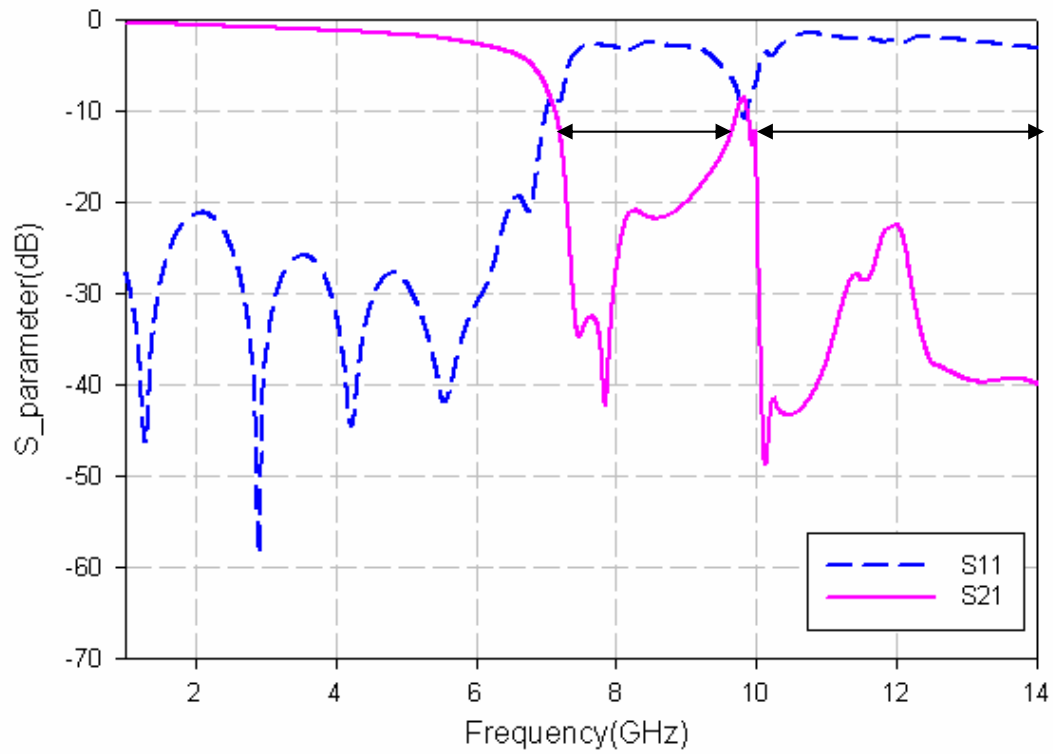
(c) 插入損耗

圖 3-6：微帶線加上 4mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較

從圖 3-6 可以得知從 10GHz 到 12GHz 有一較深之截止帶，14GHz 之後也有截止頻帶，只是實驗目標以低頻為主，故只模擬到 15GHz，繼續改變晶胞大小來設計低頻截止帶。



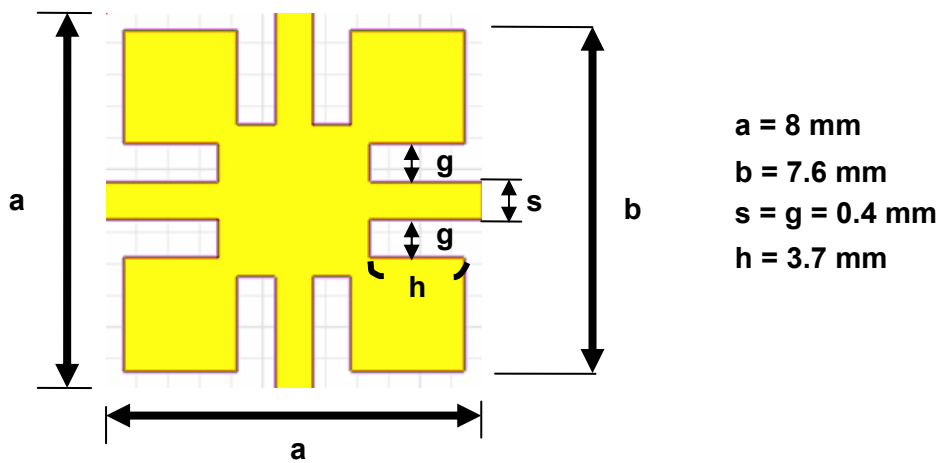
(a) 單位晶胞大小



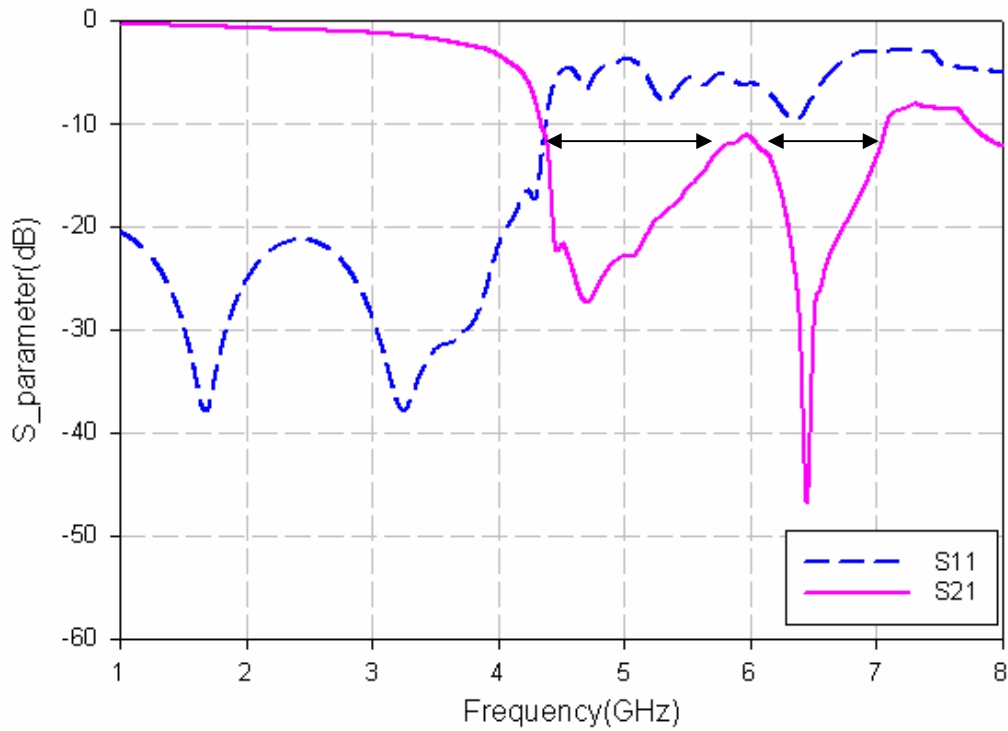
(b) S參數比較圖

圖 3-7：微帶線加上 6mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較

讓 EBG 晶胞變大(6mm^2)跟預期結果相符，可以得到更低頻的截止帶，低頻帶從 7GHz 到 9GHz，高頻帶 10GHz 之後仍然存在極深之截止帶。



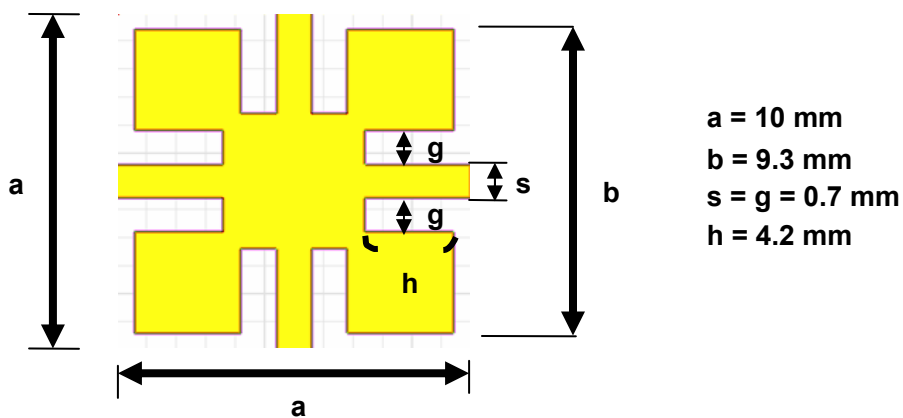
(a) 單位晶胞大小



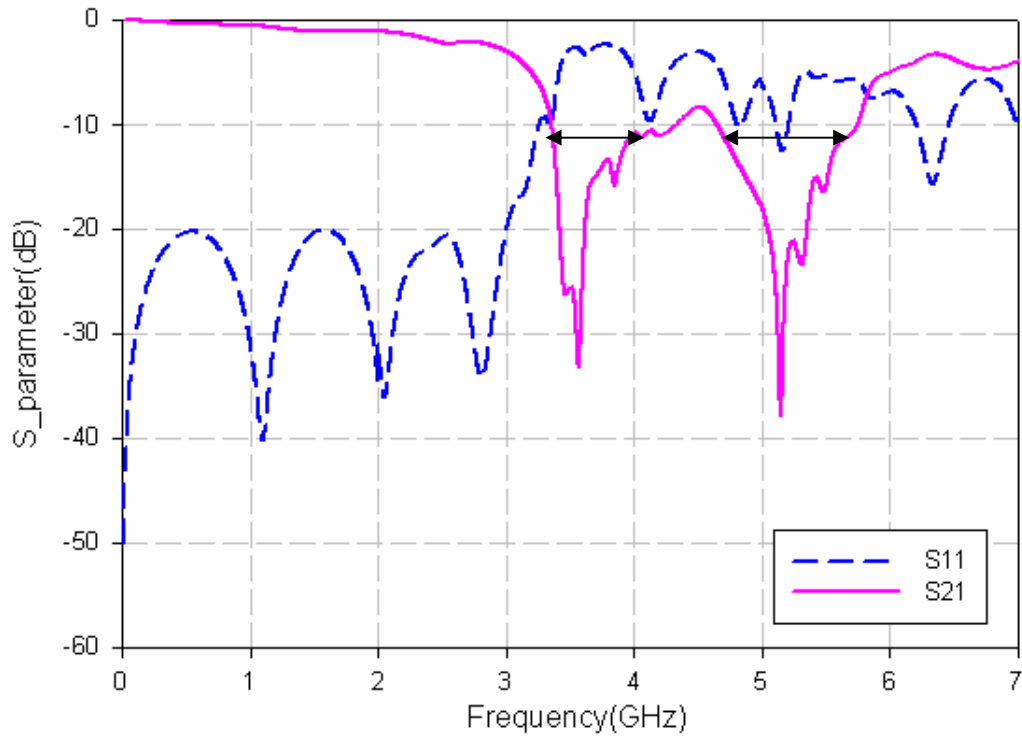
(b) S參數比較圖

圖 3-8：微帶線加上 8mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較

從圖 3-8 的結果得到更低頻的截止帶，座落於 $4.3\text{GHz}\sim 5.8\text{GHz}$ 及 $6.1\text{GHz}\sim 7\text{GHz}$ ，由於論文中所設計的 WiMAX 天線陣列工作頻率在 $3.4\text{GHz}\sim 3.7\text{GHz}$ ，故需再將晶胞大小改變，讓系統能夠共振在更低頻處。



(a) 單位晶胞大小



(b) S參數比較圖

圖 3-9：微帶線加上 10mm^2 EBG 結構之晶胞大小與 S 參數比較

將週期性電磁帶隙結構結合微帶線，可以設計出需要的截止帶，圖 3-9 主要的截止帶在 3.25GHz~4GHz 及 4.65GHz~5.8GHz，已經達到需求的頻帶範圍，下一個目標將結合微帶天線做改善與比較。

3.2 電磁帶隙結構包圍方式之探討

3.2.1 有限接地面的探討

由於設計的微帶天線主要是在邊射(Broad-side)方向輻射，所以需要選擇一個適當的接地面大小，讓輻射場型得到一個最佳值。理論上來說，無限大的接地面可以得到最平滑(Smooth)的輻射場型，只在單邊輻射，不會受到地面干擾；實際上，在有限的空間，必須選擇一個適當大小的接地面，以符合成本與面積要求，而有限的接地面卻容易造成邊緣效應干擾[12]，表面波在接地面邊緣產生繞射場(Diffracted fields)，形成新的波源，以陣列因子的觀點來看，多了新的波源會造成輻射場型加乘上的消長，如圖 3-10。微帶貼片天線主要是以前後兩側差半波長之邊輻射，而有限接地面則會在邊緣產生感應磁流(Induced equivalent magnetic current)，如圖 3-11，從電場的指向可以推得磁流的方向，對照輻射場型容易在邊射方向造成波紋(Ripple)。

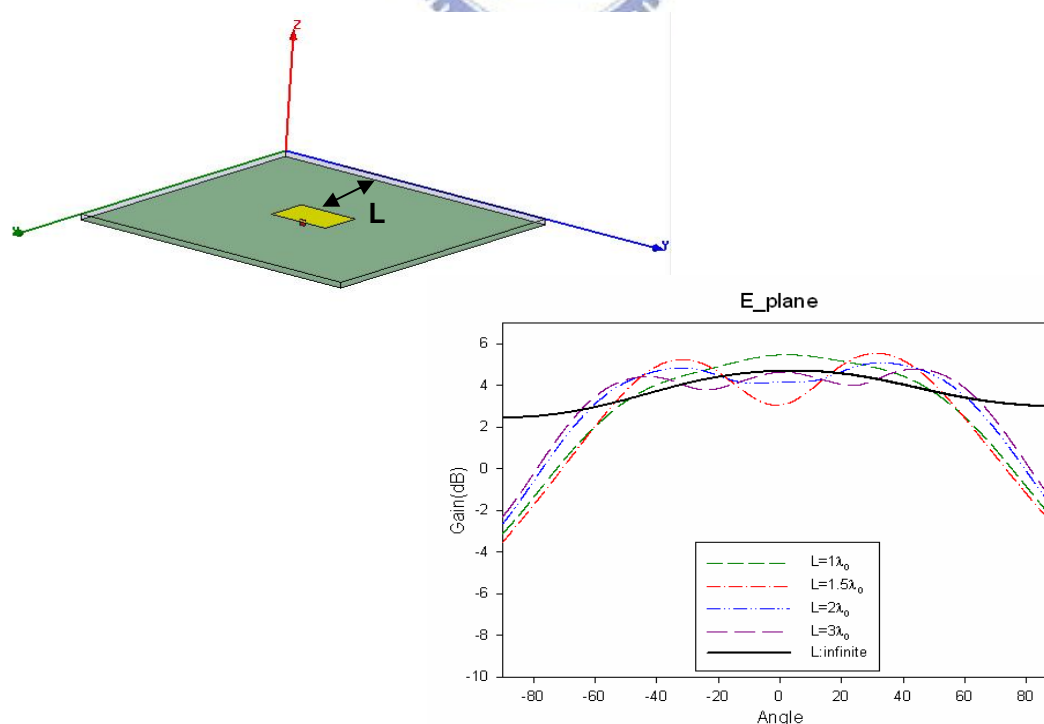


圖 3-10：有限接地面產生之輻射場型比較圖

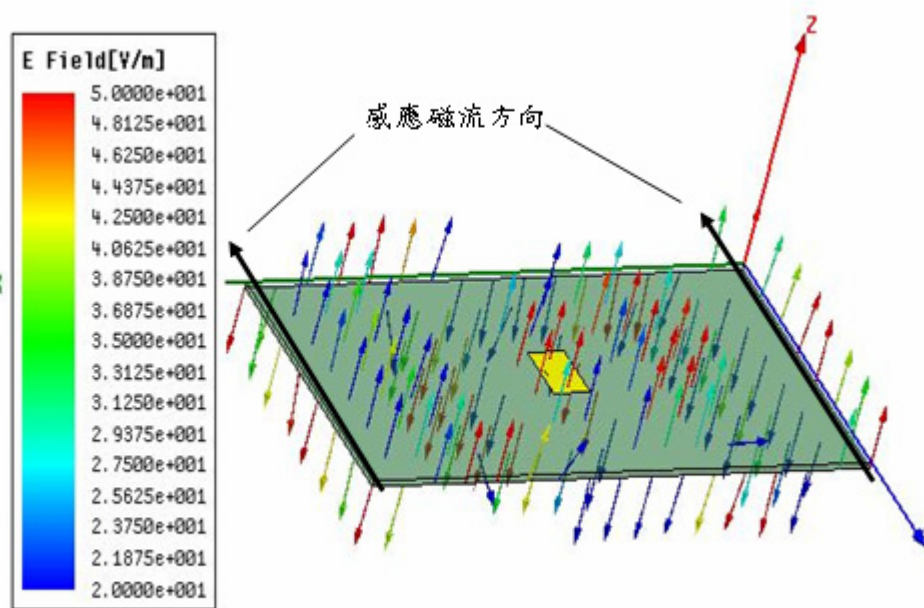


圖 3-11：介質中電場指向之強弱分布與感應磁流方向

由於接地面的大小在 E-plane 會產生波紋來干擾輻射場型，所以論文中以 EBG 週期性結構來做為一個完美磁導體(Perfect Magnetic Conductor：PMC)，也就是人工 PMC(Artificial PMC)，抑制邊緣電場的垂直入射，減弱感應磁流的效應，以改善天線輻射場型。

3.2.2 天線周圍包覆 PMC

傳統上 EBG 以圍滿的方式來改善微帶天線之增益與輻射[13]，並透過晶胞數的不斷增加來提高增益及改善輻射場型，但晶胞數的增加將提高成本、加大 EBG 面積及天線整體體積，高達一定數量時反而會降低天線性能，對於微帶貼片天線而言，EBG 在接地面太靠近天線輻射邊反而影響其輻射機制，造成頻率飄移，因此論文中將探討 EBG 的包圍方式對天線性能之影響，以有最佳效果。

已知高阻抗表面可以阻擋介質中表面波的傳遞，因此先透過理想 PMC 來代替所設計之高阻抗表面 EBG 結構，以分析其特性，找出提升天性能的最佳包圍

方式。

首先把天線周圍包覆 PMC 如圖 3-12，以逼近的方式慢慢擴大 PMC 的面積，一圈 PMC 的寬度與設計的晶胞大小邊長一樣，從輻射場型來看，使用到第二圈時，可以得到最佳的輻射效能如圖 3-13。PMC 包圍有其最佳範圍，取得有效的包圍方式，可以讓天線輻射最佳化。

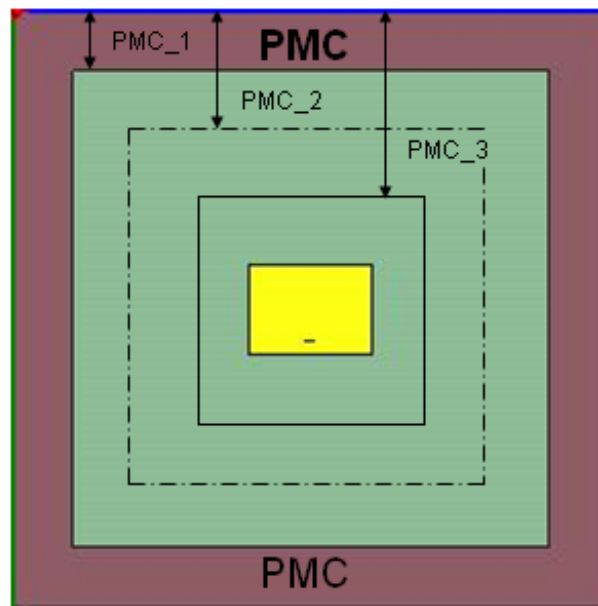


圖 3-12：天線周圍包覆 PMC

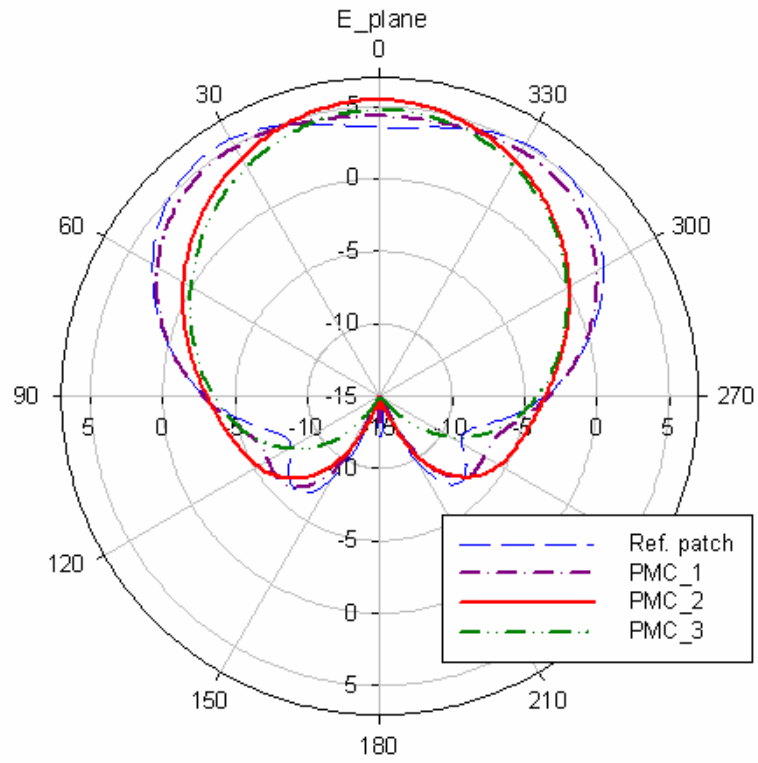


圖 3-13：天線周圍包覆 PMC 之輻射場型比較



	參考天線	一圈 PMC	二圈 PMC	三圈 PMC
0 度增益	3.57dBi	4.32dBi	5.45dBi	4.78dBi
增益改善		0.75dB	1.88dB	1.21dB

表 3-1：天線周圍包覆 PMC 之增益改善比較

3.2.3 輻射邊兩側包覆 PMC

由於微帶天線之表面波傳遞方向以 xz 切面為主如圖 3-14，因此在微帶天線輻射邊的兩側擺放 EBG 結構，以抑制其傳遞，有效改善天線輻射場型。首先，使用理想的 PMC 在天線輻射邊兩側包覆如圖 3-15，對於 PMC 覆蓋面積的大小作一探討，變化 PMC 之覆蓋面積，了解其對天線輻射場型的影響，在邊射(broadside)方向的輻射場型可以有效改善波紋，讓旁波瓣(sidelobe)大幅度降低，如圖 3-16 所示，以兩列 PMC 可以達到較佳效果，再增加一列 PMC 雖些許增加增益，不過 PMC 覆蓋的面積已達飽和，因此從上述可知，在結合 EBG 和微帶天線時，將有一最佳之覆蓋面積，使用最適當之晶胞數，來達到最佳的增益改善。

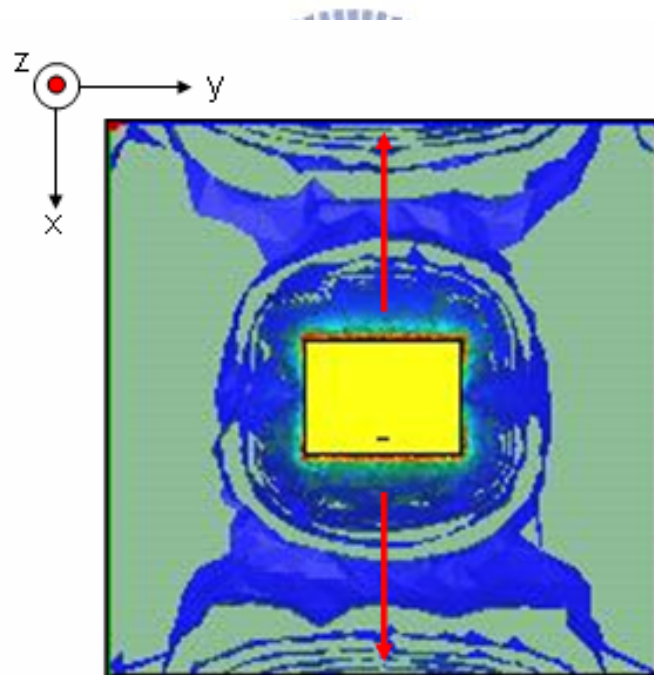


圖 3-14：表面波在介質空間中分布

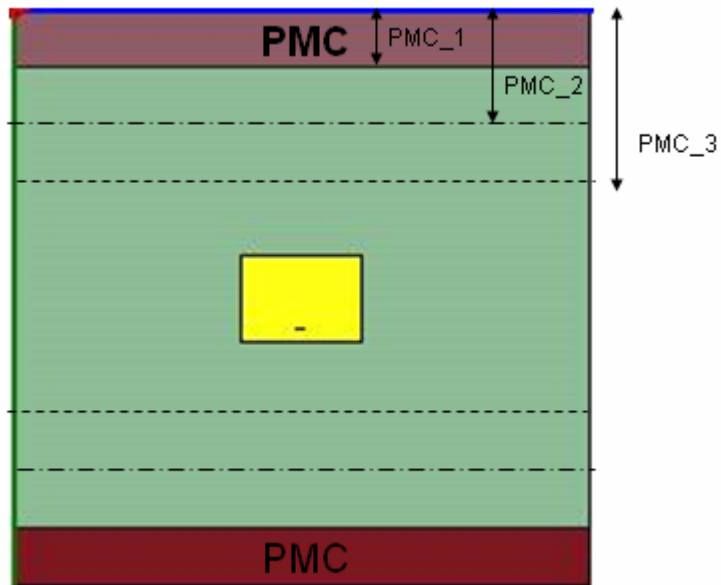


圖 3-15：輻射邊兩側包覆 PMC

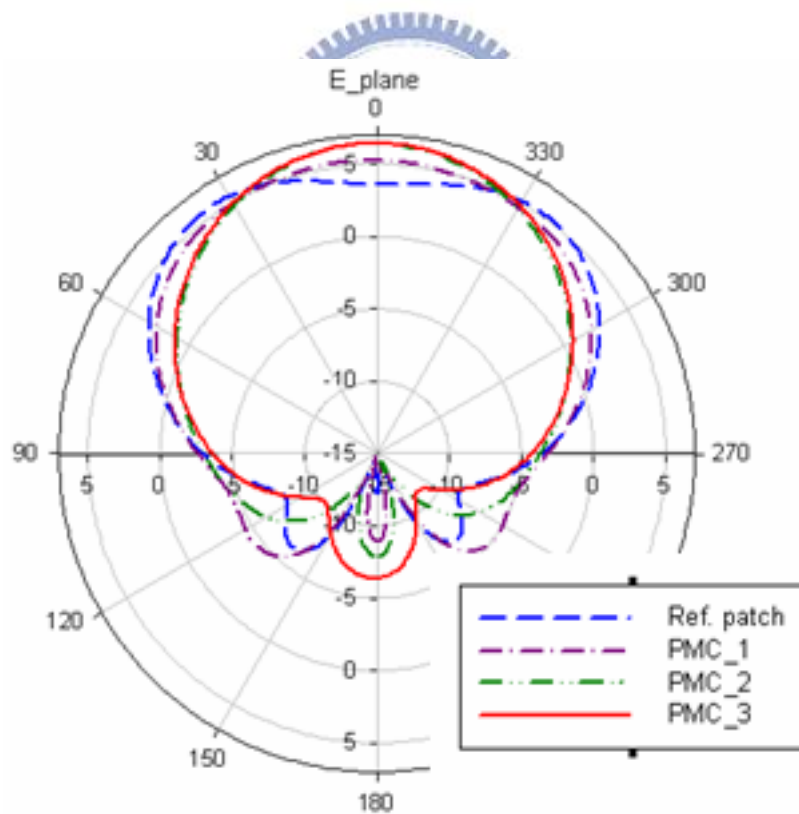


圖 3-16：輻射邊兩側包覆 PMC 之輻射場型比較

	參考天線	一系列 PMC	二列 PMC	三列 PMC
0 度增益	3.57dBi	5.28dBi	6.42dBi	6.44dBi
增益改善		1.71dB	2.85dB	2.87dB

表 3-2：輻射邊兩側包圍 PMC 之增益改善比較

3.3 電磁帶隙結構結合單一微帶天線

以下將結合所設計之 EBG 結構和微帶天線，以改善微帶天線之輻射場型干擾，從前述的探討，先以圍繞式包圍天線做輻射場型比較，如圖 3-17 所示：

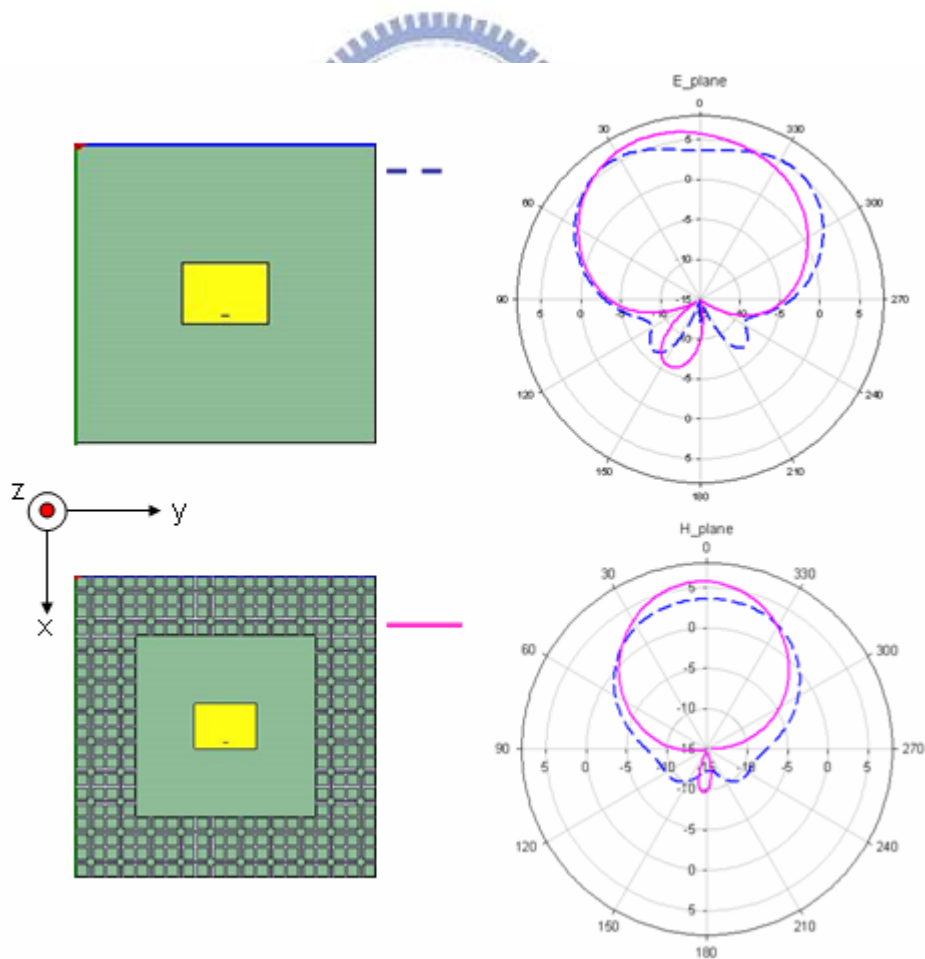


圖 3-17：天線周圍包圍 EBG 之輻射場型比較

	0 度增益
Ref. patch antenna	3.57dBi
圍繞 EBG	5.72dBi
Δ Gain	2.15dB

表 3-3：天線周圍包覆 EBG 之增益改善比較

由於表面波之傳遞主要為 X 軸方向，因此以 EBG 之較寬頻的維度來抑制 X 方向的表面波，其結合方式如下，以兩列 EBG 結構與天線結合比較如圖 3-18：

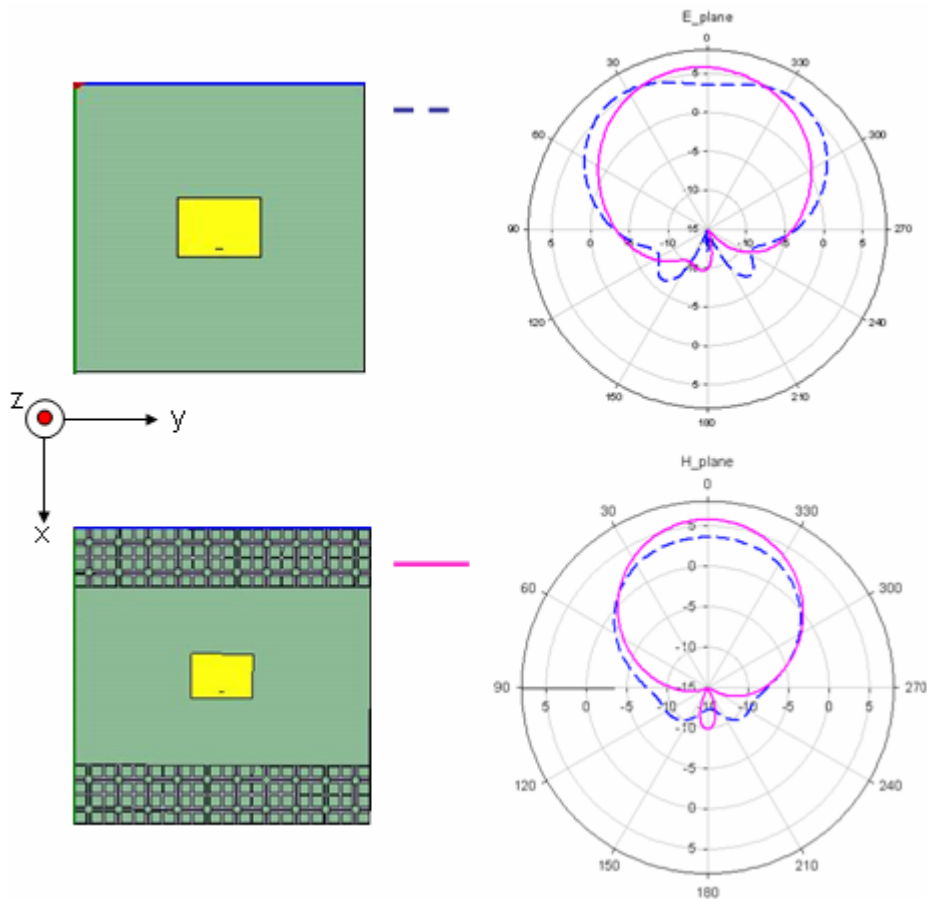


圖 3-18：輻射邊兩側包覆 EBG 之輻射場型比較

	0 度增益
Ref. patch antenna	3.57dBi
輻射邊包覆 EBG	5.77dBi
Δ Gain	2.2dB

表 3-4：輻射邊兩側包覆 EBG 之增益改善比較

兩種包覆 EBG 的情形做比較，使用輻射邊兩側包覆 EBG 對表面波抑制可以達到最直接的效果，再對接地面做變化，令輻射邊到接地面邊緣距離等於 1.5 倍空氣中波長，邊緣的等效感應磁流干擾最大，在垂射(broadside)方向造成 30 度到 60 度的旁波瓣，將晶胞數加到三列使得輻射場型能有最佳效果，如圖 3-19 所示：

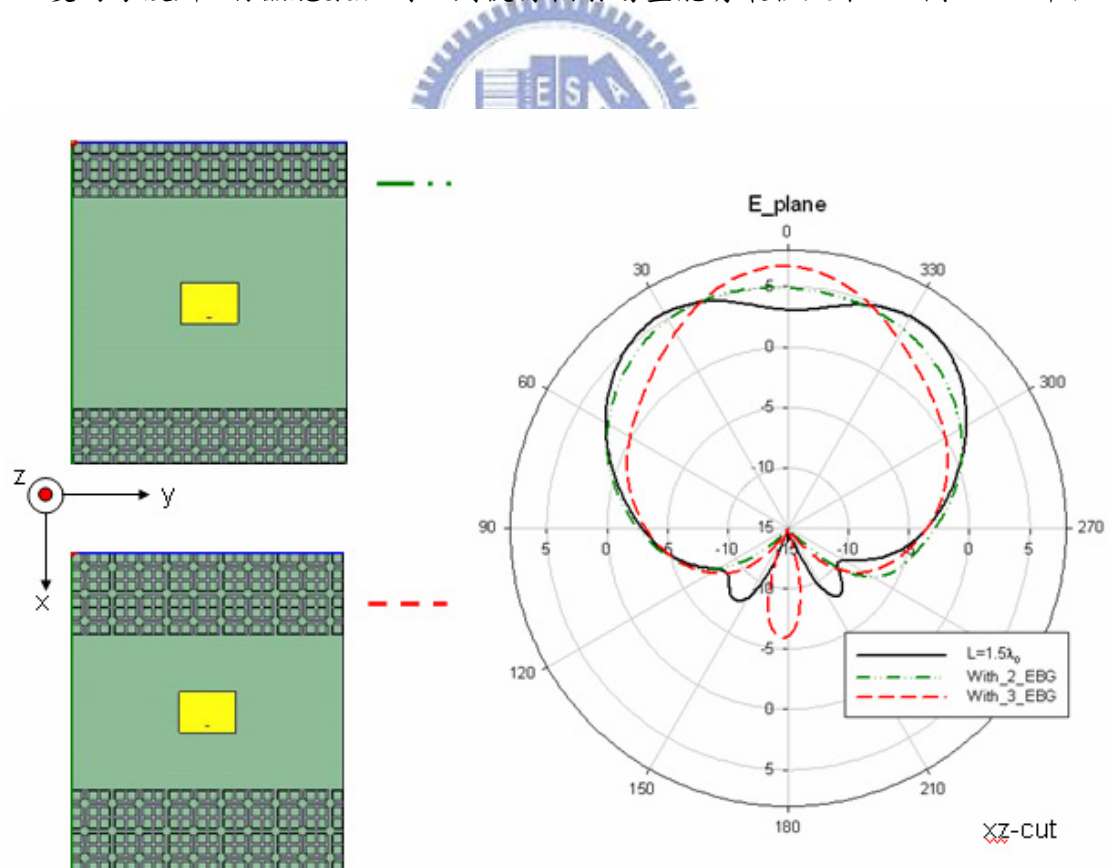


圖 3-19：較大接地面應用更多晶胞數改善輻射場型圖

3.4 電磁帶隙結構結合微帶天線陣列

第二章敘述之高增益天線陣列，由於在 E-plane 產生較大之旁波瓣，因此論文將結合 EBG 結構與天線陣列，改善輻射場型，以符合 ETSI-TS2 規範要求，對原本的天線陣列與改善後的天線陣列作一比較，如圖 3-20 為天線結構示意圖，俯視圖 yz 切面為表面波影響較大的面，因此我們在 E-plane 兩側包覆 EBG，使用三列的 EBG 週期結構，另外，圖 3-21 為(a)3.4GHz、(b)3.55GHz、(c)3.7GHz 輻射場型在 E-plane 的改善比較，可以發現在(a)跟(b)改善的效果特別明顯，旁波瓣減弱許多，而(c)原本旁波瓣就不大，所以改善較不明顯。再跟 ETSI-mask 做比較如圖 3-22，改善後的天線陣列距離輻射場型標準線有較大之安全距離，對實作上的誤差影響會比較小，以下針對輻射場型做一比較。

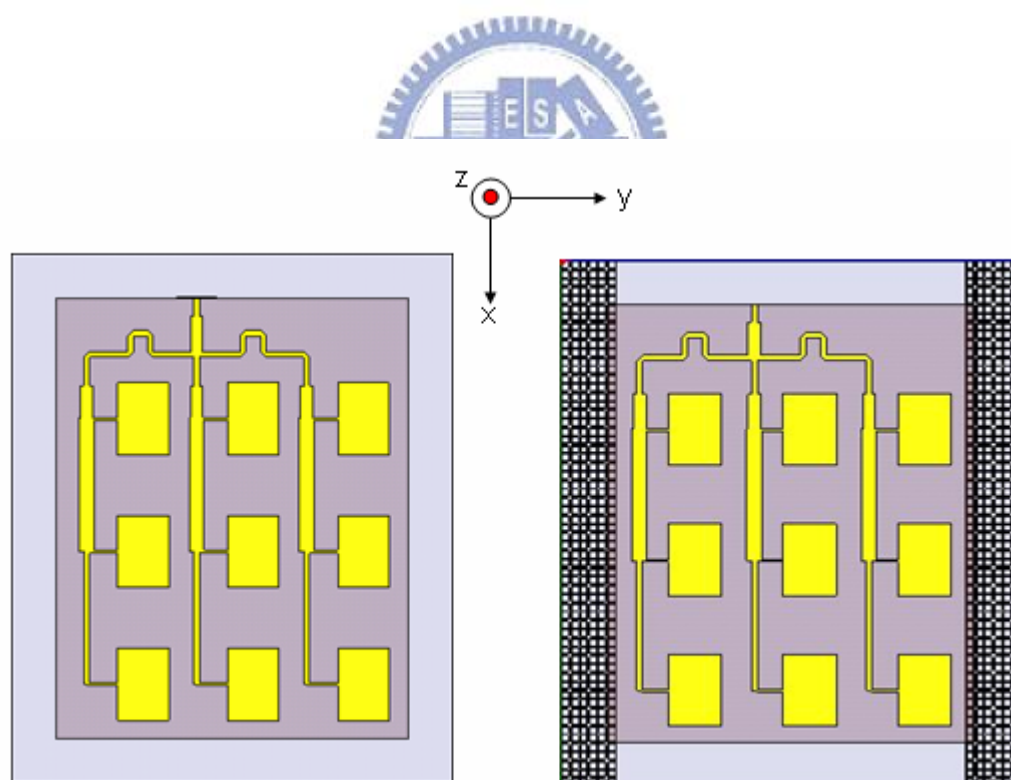
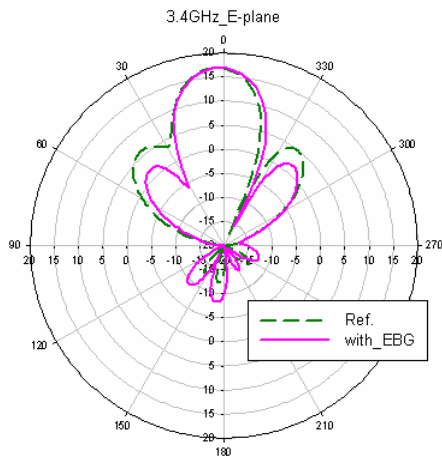
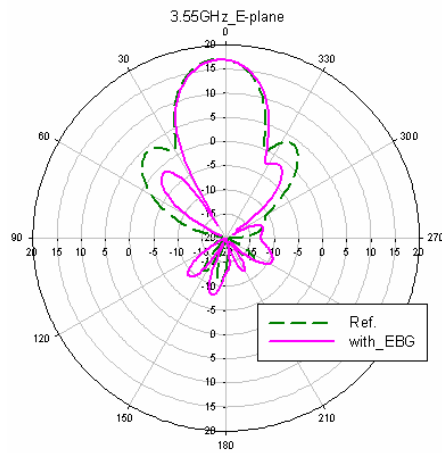


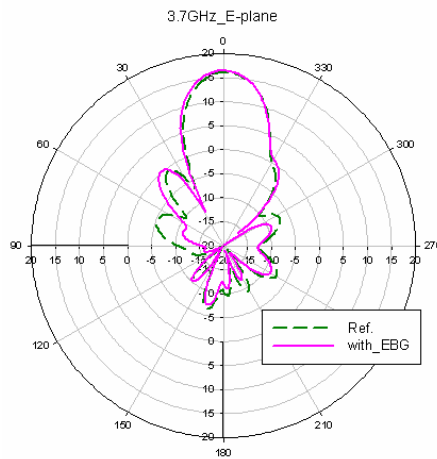
圖 3-20：原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列



(a)3.4GHz E-plane 輻射場型比較



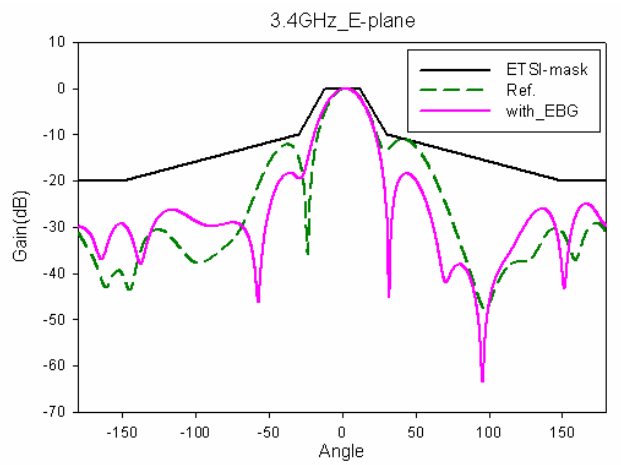
(b)3.55GHz E-plane 輻射場型比較



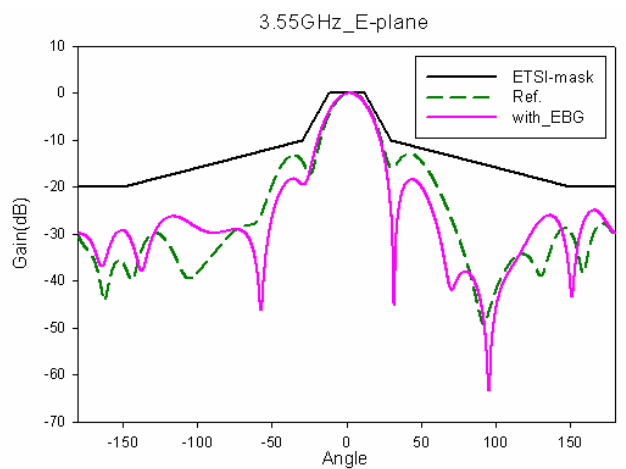
(c)3.7GHz E-plane 輻射場型比較

圖 3-21：原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列輻射場型比較

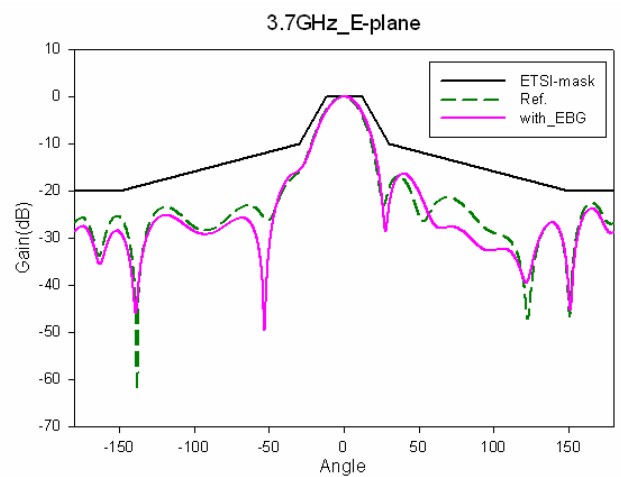
(a)3.4GHz (b)3.55GHz (c)3.7GHz



(a)3.4GHz E-plane



(b)3.55GHz E-plane



(a)3.7GHz E-plane

圖 3-22：原始天線陣列與應用 EBG 之天線陣列與 ETSI-mask 比較

(a)3.4GHz (b)3.55GHz (c)3.7GHz

3.5 模擬與量測結果比較

由上述模擬的結果進行實作及量測的工作，如圖 3-23 為微帶天線結合 EBG 結構的架構，表 3-5 列出了板材的規格，使用的基板是 FR4 玻璃纖維基板並架高，空氣高度為 5mm。

Dielectric constant(top , bottom)	4.4 , 4.4
Substrate thickness(top , bottom)	0.8mm , 1.6mm
Loss tangent	0.02
Air gap	5mm
Upper substrate size	250mm x 200mm
Ground size	300mm x 250mm

表 3-5：天線陣列設計參數

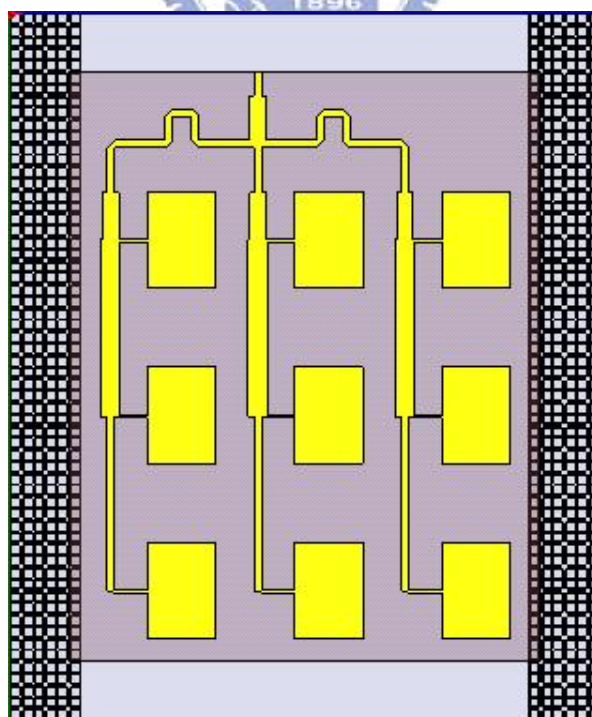
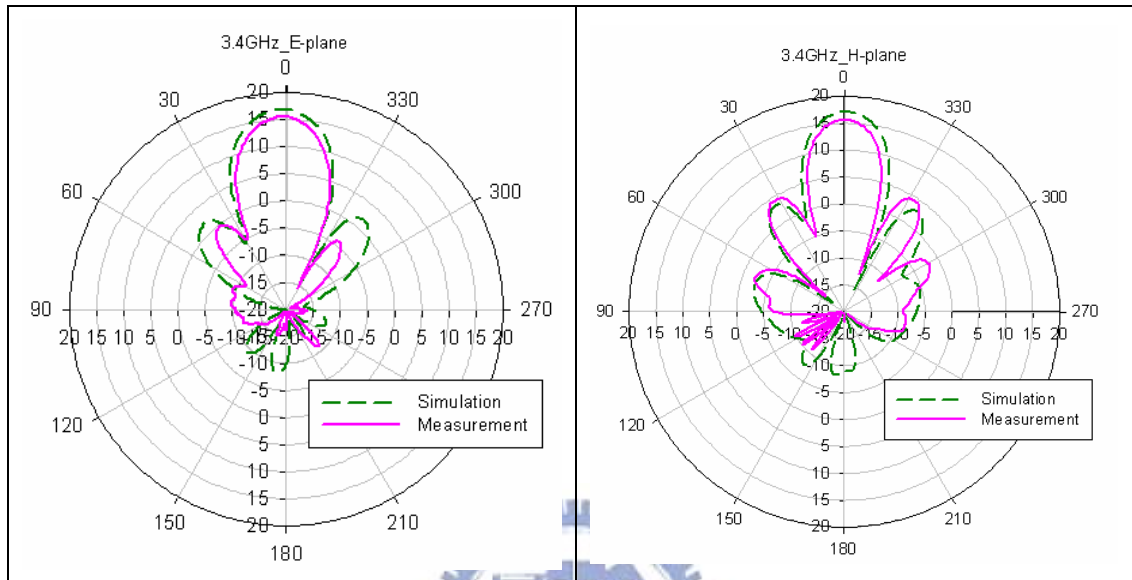
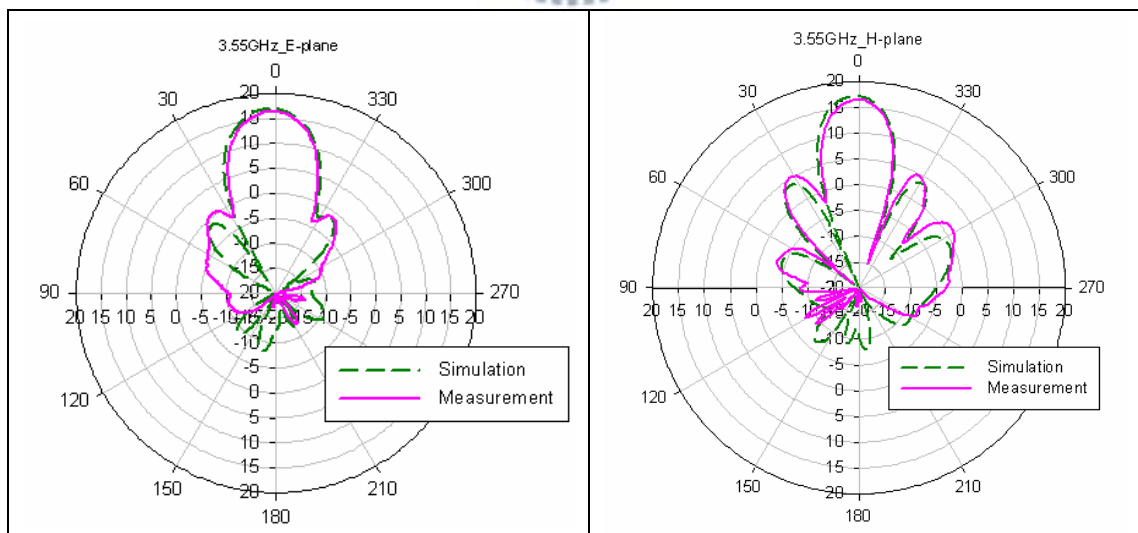


圖 3-23：應用 EBG 之天線陣列結構圖

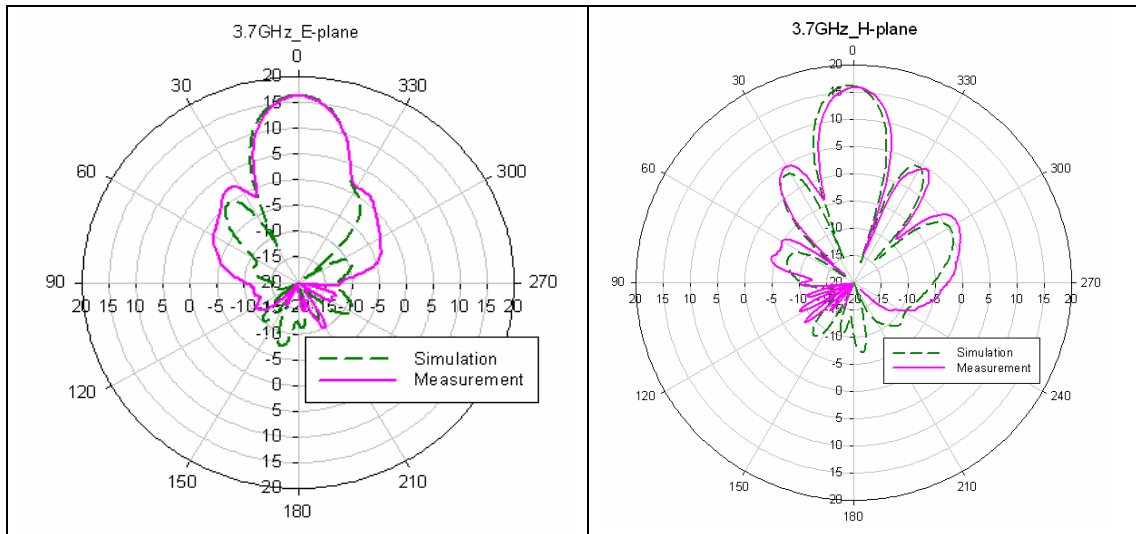
圖 3-24 為天線陣列在 3.4GHz、3.55GHz、3.7GHz 的輻射場型，從圖中可以觀察模擬與量測場型蠻相近的。



(a)3.4GHz



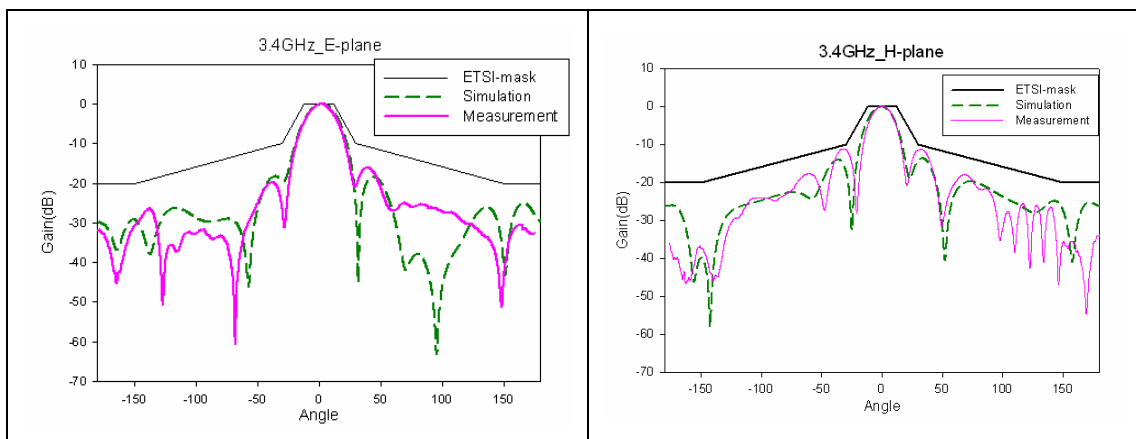
(b)3.55GHz



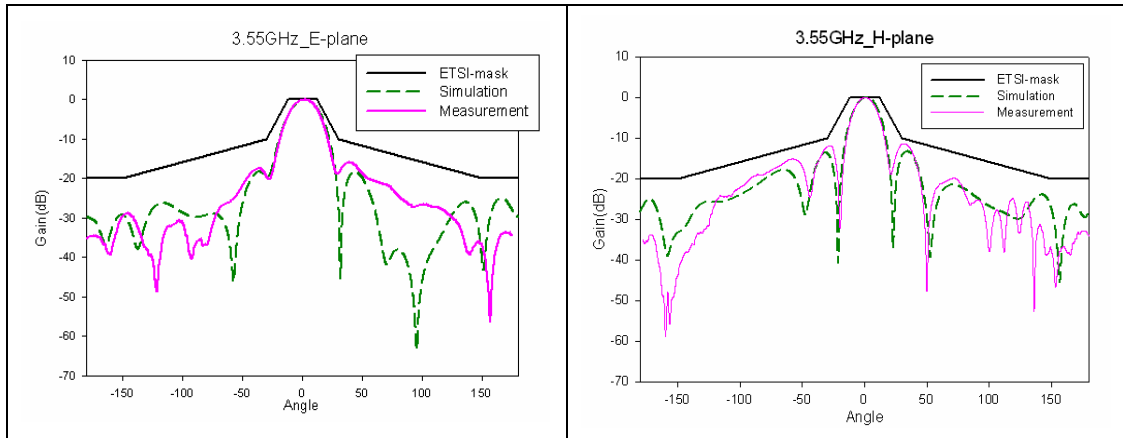
(c)3.7GHz

圖 3-24：天線陣列輻射場型模擬與量測比較

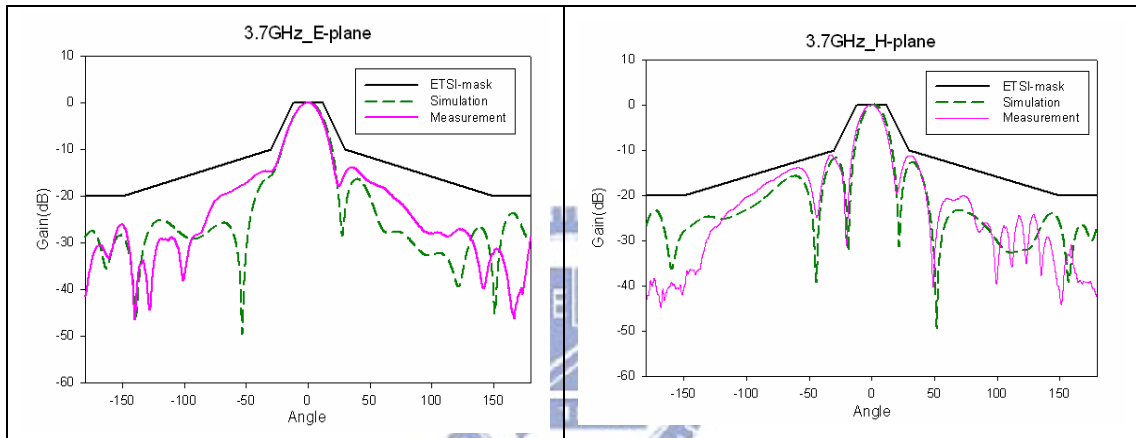
對於其輻射場型的分布需求要符合 ETSI-TS2 的規範，以下針對輻射場型與 ETSI-mask 做一比較，如圖 3-25 所示，從圖中發現，實作及量測輻射場型全部工作頻段都能滿足 mask 要求，完成一組高增益天線陣列。



(a)3.4GHz



(b)3.55GHz



(c)3.7GHz

圖 3-25：天線陣列輻射場型與 ETSI-mask 比較

圖 3-26 為天線陣列模擬與量測的反射損耗，其工作頻率與設計之天線相去不遠，均包含 3.4GHz~3.7GHz，頻寬設計較大的原因在於避免外在因素造成的頻飄，量測出來可達 3.3GHz~3.9GHz，略往高頻飄，不過與設計的反射損耗相當接近。圖 3-27 為實際量測的增益對頻率的變化圖，其增益的全頻段都能大於 14dBi，E-plane 與 H-plane 也較為接近，整理數據如表 3-6。

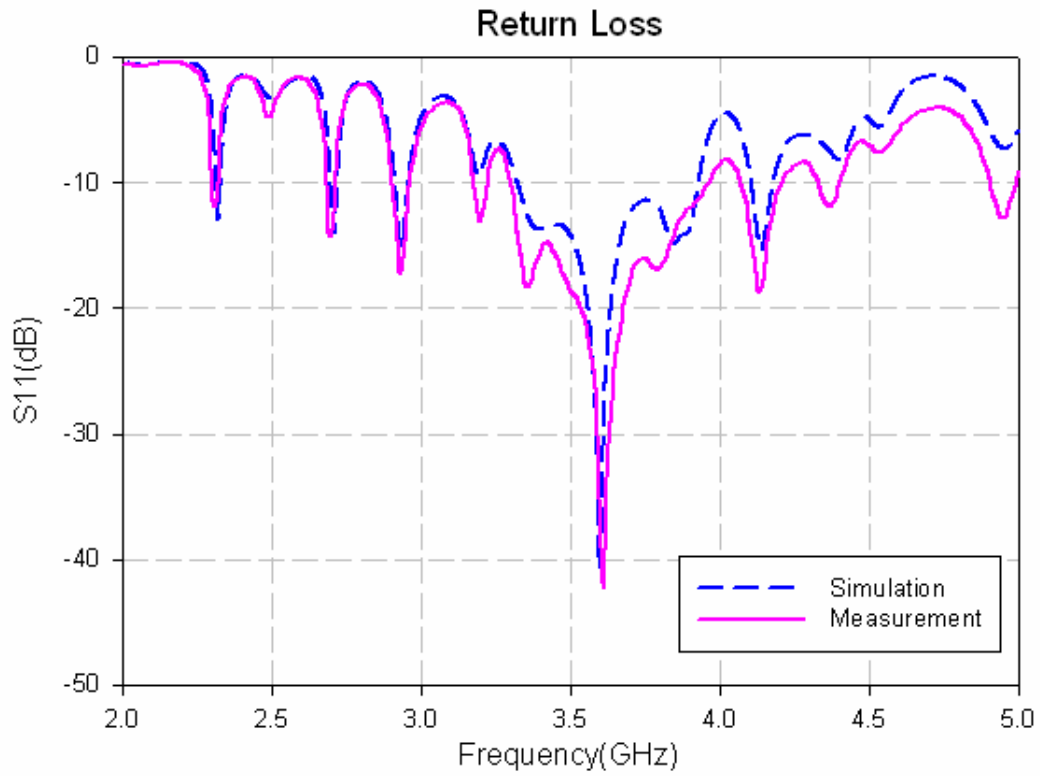


圖 3-26：天線陣列反射損耗模擬與量測比較

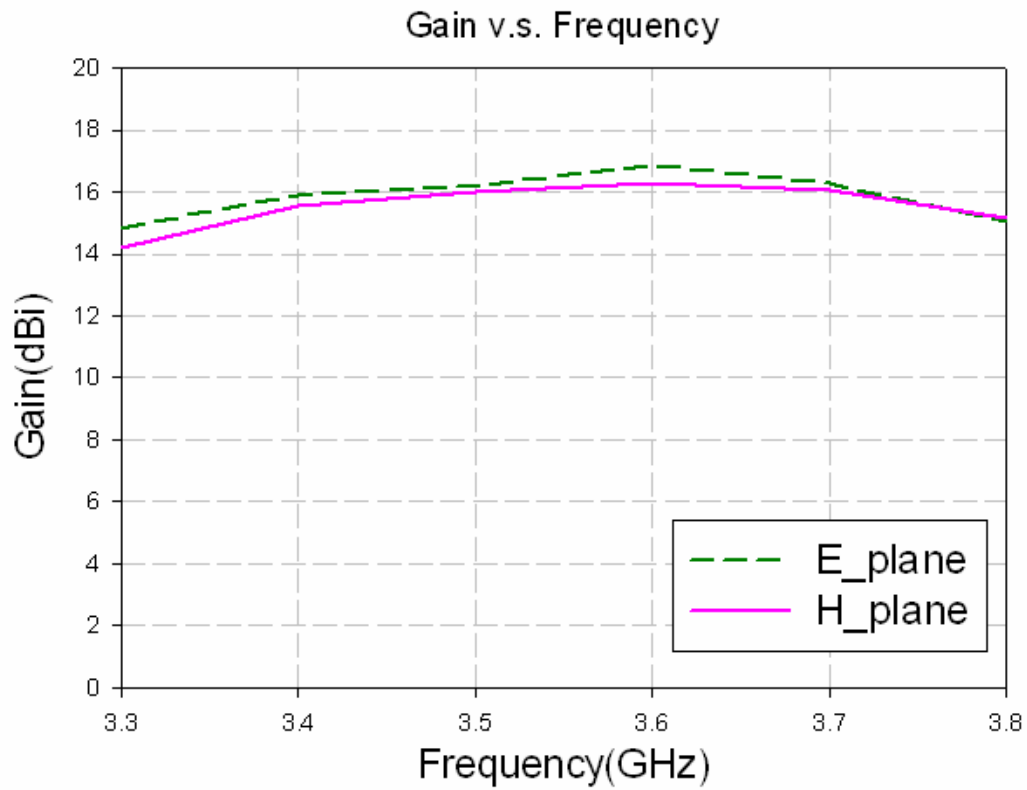


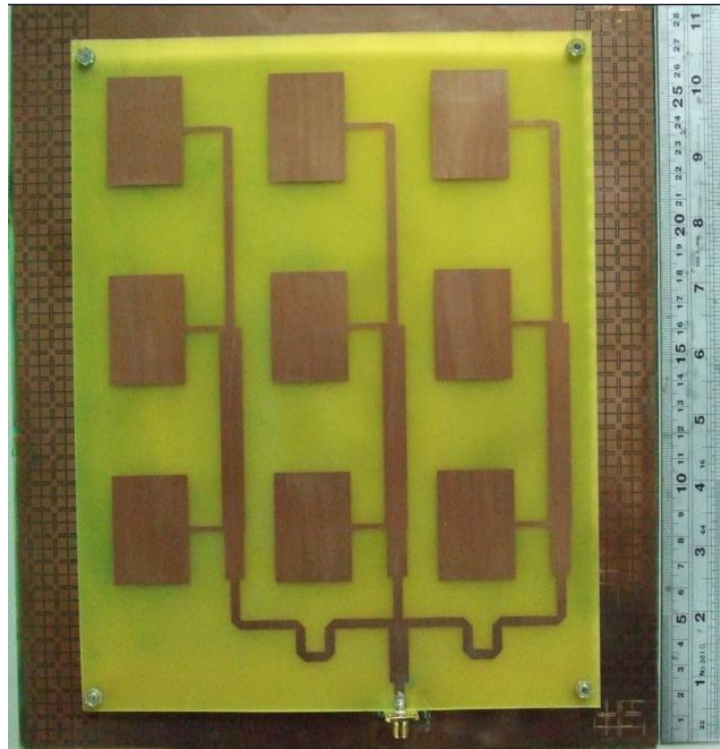
圖 3-27：天線陣列增益對頻率圖

頻率(GHz)	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8
E-plane 增益 (dBi)	14.85	15.91	16.20	16.87	16.27	15.07
H-plane 增益 (dBi)	14.21	15.65	15.98	16.29	16.07	15.18

表 3-6：天線陣列增益對頻率表



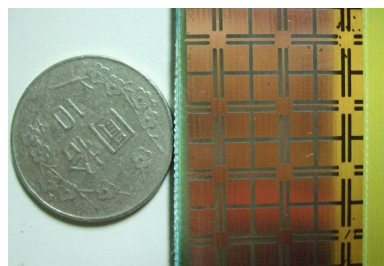
圖 3-28 為實體圖，俯視圖、側視圖與 EBG 實際大小比較。



(a) 俯視圖



(b) 側視圖(空氣高度=0.5mm)



(c) EBG 實體結構

圖 3-28：天線陣列實體圖

第四章 結論

(Conclusion)

本論文主要是研究適用於基地台的 WiMAX 頻段高增益天線陣列，並控制其頻寬、增益及輻射場型能夠符合 ETSI(European Telecommunication Standards Institute)的規範。在論文第二章中提出的高增益天線陣列，是利用一個能量分歧器把能量等效分成三份的饋入網路，接上三組一樣的三元素陣列矩形微帶天線所組成的天線陣列，最高增益可達到 17dBi，工作頻率的增益都能超過要求的 14dBi，輻射場型符合 ETSI-TS2 規範。另外，本論文所提出的天線陣列為印刷式天線，不但具有輕量化的特性且大幅降低製作上的困難度，也減輕了成本的負擔。

透過本論文所設計之 EBG 可有效降低傳統 EBG 結構的製程，僅以 FR4 板材即可自行實作比較，無須鉚釘，並提出有效提升微帶天線增益的包圍方式，在有限的接地面下，可選擇適當的晶胞數來改善天線陣列的輻射場型，抑制表面波對天線的干擾，讓邊際效應產生的感應磁流干擾降到最低，最後在實作及量測部分，驗證我們模擬的結果。

參考文獻

- [1] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
- [2] A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*. New York: Wiley, 1997.
- [3] R. Gardelli, G. La Cono, and M. Albani, “A low-cost suspended patch antenna for WLAN access points and point-to-point links,” *IEEE Antennas and Propagat.*, vol. 3, no. 1, pp. 90-93, 2004.
- [4] H. F. Pues and A. R. Van de capelle, “An impedance-matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas,” *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 37, no. 11, pp. 1345-1354, Nov. 1989.
- [5] Q. Song and X.-X. Zhang, “A study on wideband gap-coupled microstrip antenna arrays,” *IEEE Trans. On Antennas and Propagat.*, vol. 43, no. 3, pp. 313-317, Mar. 1995.
- [6] D. Sievenpiper, L. Z. Romulo, F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, “High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 311-335, Nov. 1999.
- [7] F.-R. Yang, K.-P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, “ A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits,” *IEEE Trans. MTT*, vol. 47, Aug. 1999.
- [8] M. F. Abedin, M. Z. Azad, and M. Ali, “ wideband smaller unit-cell planar EBG structures and their application,” *IEEE Trans. On Antenna and Propagat.*, vol. 56, no. 3, pp. 903-908, Mar. 2008.
- [9] I. J. Bahl and P. Bhartia, *Microstrip Antennas*. Artech House, 1980.
- [10] J.R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*. London : Peter Peregrinus Ltd., 1989.

- [11] K. C. Gupta, R. Garg, I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. Norwood, MA : Artech House, 1996.
- [12] T. Namiki, Y. Murayama, and K. Ito, “ Improving radiation-pattern distortion of a patch antenna having a finite ground plane,” *IEEE Trans. On Antenna and Propagat.*, vol. 51, no. 3, pp. 478-482, Mar. 2003.
- [13] R. Coccioli, F.-R. Yang, K.-P. Ma, and T. Itoh, “ Aperture-coupled patch antenna on UC-PBG substrate,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2123-2130, Nov. 1999.
- [14] F. Yang and Y. Rahmat-samii, “ Microstrip antenna integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structure: a low mutual coupling design for array application,” *IEEE Trans. On Antenna and Propagat.*, vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946, Oct.2003.
- [15] Z. Iluz, R. Shavit, and R. Bauer, “ Microstrip antenna phased array with electromagnetic bandgap substrate,” *IEEE Trans. On Antenna and Propagat.*, vol. 52, no. 6, pp. 1446-1453, June 2004.