

國立交通大學

電信工程學系

碩士論文

緊密的多接收多發送天線系統於無線區域  
網路系統的應用

**Compact MIMO Antenna Systems for WLAN**

**Applications**

研究生：林明達

指導教授：鍾世忠 博士

中華民國九十六年七月

# **Compact MIMO Antenna Systems for WLAN Applications**

研究生：林明達

Student : Ming-Ta Lin

指導教授：鍾世忠 博士

Advisor : Dr. Shyh- Jong Chung

國立交通大學

電信工程研究所

碩士論文



Submitted to Institute of Communication

College 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

July 2007

中華民國九十六年七月

# 緊密的多接收多發送天線系統於無線區域 網路系統的應用

研究生：林明達

指導教授：鍾世忠 博士

國立交通大學 電信工程研究所

## 摘要

本論文提出三個整合多天線於小面積的系統。首先介紹的第一個天線系統，它整合了兩支天線，適用時間分集（time diversity）或是場型分集（pattern diversity），第一支天線是 Sigma 形單極（monopole）天線，第二支天線是由 W 形單極天線所構成的系統，主要是操作在 2.4GHz 頻段，此系統頻寬不錯，且輻射場形也有達到全向性（omni-direction），天線間的信號干擾也可達到要求的 -10dB 以下。接下來介紹第二個天線系統，主要是由方形環狀單極天線系統構成，此架構整合了三支天線，兩支天線負責兩邊的輻射，中間的天線負責往前的輻射以補另外兩支天線往前輻射的不足，且操作頻率在 2.4、4.9、5.2、5.8GHz，符合全頻段的需求，輻射場型在全頻段各方向有互補的效果，但其中有兩支天線的信號干擾略高，約在 -8.5dB。接下來要繼續介紹第三個系統，由四支天線所構成的緊密多接收多發送（MIMO）天線系統，這裡會提出數種天線設計架構並比較各種設計的優缺點，我們會舉幾個實作的天線系統來做例子。天線間信號干擾

的效應就是研究的重點，除了造成基頻信號處理的困難外，也會造成天線間的破壞性干擾使得增益降低，量測的結果會說明信號干擾效應造成的問題，量測結果和心得會在最後討論。



# **Compact MIMO Antenna Systems for WLAN Applications**

Student : Ming-Ta Lin

Advisor ; Dr. Shyh-Jong Chung

Institute of Communication Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

**In this thesis, three compact antenna systems are proposed. In the first system, two antennas are located in the front side of PC card, and it is suitable for time diversity and pattern diversity application. It operates at 2.4GHz band and has wide bandwidth, omni-directional radiation pattern. One of the two antennas was designed to have Sigma shape and another was in W shape. And the interference between antennas is below the required -10dB. The second system is mainly composed by three square-loop ring antennas. Two of these antennas radiate to left and right side of the PC card, and the third antenna radiates forward to compensate the insufficient radiation. Each of these antennas covers the frequency bands of 2.4, 4.9, 5.2, 5.8GHz. In addition, the radiation pattern of these antennas is complementary in all directions to realize pattern diversity. But the highest interference between these antennas is about -8.5dB. The last antenna system is composed by four multi-band antennas to form a compact MIMO antenna system. We will propose several frameworks to design**

compact MIMO antenna system and compare their advantages and disadvantages. Then we will take some experimental examples to introduce these frameworks. The interferential effect among antennas is the researching key point. It causes not only signal process at baseband difficult but also destructive interference to radiation pattern. The interferential effect is discussed in the measured results.



## 誌謝

終於完成碩士班的學業，能夠順利畢業首先要感謝我的指導教授鍾世忠博士，在這兩年期間耐心的指導。在我有疑問時，老師都適時地以他豐富的專業知識和獨到的見解，並且提供豐富的資源，幫助我解決複雜的問題，這篇論文能夠順利完成真的很感謝老師，讓我也能夠學習到許多天線和微波領域相關的知識，由衷的感謝老師的指導。

感謝實驗室的夥伴陪我度過這兩年研究生的生涯：何博、菁偉、小隻信、機車光、小巴、建宏、小花、瘦子小胖、玲玲、喇叭旭、阿雷、警棍、馬爺、和其他我認識的同學，這兩年來大家一起努力的時光，讓我的碩士生活如此充實，最後還要感謝我的家人，在背後默默支持我，精神上的鼓勵和經濟上的支援，讓我碩士班能夠專心完成學業，還能在空閒時自助旅行，感謝我的家人。



# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
表目錄.....	xii
第一章 導論.....	1
1.1 工程背景及需求.....	1
1.2 章節內容介紹.....	3
第二章 多天線系統於無線網路卡前端之應用.....	5
2.1 兩雙極天線（dipole antenna）在 FR4 材質和空氣中輻射彼此耦合的效應.....	5
2.2 W 形與 Sigma 形單極天線置於無線網路卡前端之應用.....	8
2.3 三方形環狀單極天線置於無線網路卡前端之應用.....	13
第三章 四天線置於無線網路卡前端之應用.....	26
3.1 四雙頻小型天線置於無線網路前端的基本架構.....	26
3.2 整合四天線於無線網路卡前端之應用.....	28
3.2.1 使用四同向饋入（架構（a））的 MIMO 天線系統.....	28
3.2.2 使用架構（b）和架構（c）的 MIMO 天線系統.....	43
3.3 天線 1 和天線 4 對天線 2 和天線 3 的影響.....	53
第四章 結論.....	61
參考文獻.....	62

## 圖 目 錄

圖 2.1.1 模擬單極天線信號干擾量的情況圖 (a) 兩支天線結構圖 (b) 模擬信 號干擾量參數圖 .....	7
圖 2.2.1 W 形與 Sigma 形單極天線結構圖 .....	9
圖 2.2.2 W 形與 Sigma 形單極天線模擬與量測的散射參數 (a) 反射損耗 (b) 信號干擾量 .....	10
圖 2.2.3 天線 1 (sigma 形) 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	11
圖 2.2.4 天線 2 (W 形) 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平 面 (c) XZ 平面 .....	12
圖 2.3.1 整合三天線系統結構圖 .....	14
圖 2.3.2 整合三天線系統模擬和量測的反射損耗圖 .....	15
圖 2.3.3 整合三天線系統模擬和量測的信號干擾量數據圖 .....	17
圖 2.3.4 天線 1 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	18
圖 2.3.5 天線 2 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	19
圖 2.3.6 天線 3 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	19
圖 2.3.7 天線 1 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	20
圖 2.3.8 天線 2 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	20
圖 2.3.9 天線 3 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面 .....	20

平面.....	21
圖 2.3.10 天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	21
圖 2.3.11 天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	22
圖 2.3.12 天線 3 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	22
圖 2.3.13 天線 1 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	23
圖 2.3.14 天線 2 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	23
圖 2.3.15 天線 3 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	24
圖 3.1.1 四多頻小型天線整合為 MIMO 天線系統設計架構圖 (a) 四天線同向餌 入架構 (b) 兩兩垂直餌入架構 (c) 天線 2 及天線 3 和天線 1 及天線 4 夾 30 度 到 45 度角餌入架構 (d) 第二種兩兩垂直餌入架構 (e) 混合餌入架構.....	27
圖 3.2.1 使用架構 (a) 四單極天線系統 (1) 結構圖.....	29
圖 3.2.2 架構 (a) 天線系統 (1) 模擬和量測的反射損耗和信號干擾量圖 (a) 反射損耗圖, (b) 信號干擾量圖 1, (c) 信號干擾量圖 2.....	30
圖 3.2.3 架構 (a) 天線系統 (1) 天線 1 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	31
圖 3.2.4 架構 (a) 天線系統 (1) 天線 2 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	32
圖 3.2.5 架構 (a) 天線系統 (1) 天線 1 於 5GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平 面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	32
圖 3.2.6 架構 (a) 天線系統 (1) 天線 2 於 5GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平	

面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	33
圖 3.2.7 架構(a)天線系統(1)天線1於5.8GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	33
圖 3.2.8 架構(a)天線系統(1)天線2於5.8GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	34
圖 3.2.9 使用架構(a)2支方形環狀天線和2支單極天線耦合方形共振環天線結構圖.....	36
圖 3.2.10 2支方形環狀天線和2支單極天線耦合方形共振環天線系統量測的(a)反射損耗圖(b)信號干擾量圖1(c)信號干擾量圖2.....	37
圖 3.2.11 架構(a)天線系統(2)天線1於2.4GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	38
圖 3.2.12 架構(a)天線系統(2)天線2於2.4GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	38
圖 3.2.13 架構(a)天線系統(2)天線3於2.4GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	39
圖 3.2.14 架構(a)天線系統(2)天線4於2.4GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	39
圖 3.2.15 架構(a)天線系統(2)天線1於5.2GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	40
圖 3.2.16 架構(a)天線系統(2)天線2於5.2GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	40
圖 3.2.17 架構(a)天線系統(2)天線3於5.2GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	41
圖 3.2.18 架構(a)天線系統(2)天線4於5.2GHz量測的輻射場型(a)XY平面(b)YZ平面(c)XZ平面.....	41
圖 3.2.19 使用架構(b)4支方形環狀天線的天線系統.....	44

圖 3.2.20 4 支方形環狀天線系統量測的 (a) 反射損耗圖 (b) 信號干擾量圖 1 (c) 信號干擾量圖 2.....	45
圖 3.2.21 架構 (b) 天線系統天線 1 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	46
圖 3.2.22 架構 (b) 天線系統天線 2 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	46
圖 3.2.23 架構 (b) 天線系統天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	47
圖 3.2.24 架構 (b) 天線系統天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	47
圖 3.2.25 使用架構 (c) 的天線系統.....	48
圖 3.2.26 架構 (c) 天線系統量測的 (a) 反射損耗圖 (b) 信號干擾量圖 1 (c) 信號干擾量圖 2.....	50
圖 3.2.27 架構 (c) 天線系統天線 1 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	50
圖 3.2.28 架構 (c) 天線系統天線 2 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	51
圖 3.2.29 架構 (c) 天線系統天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	51
圖 3.2.30 架構 (c) 天線系統天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	52
圖 3.3.1 移除天線 1 和天線 4, 及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻 射場形與整合四支天線的比較 (基本架構 a) (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	54
圖 3.3.2 移除天線 1 和天線 4, 及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻 射場形與整合四支天線的比較 (基本架構 b) (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c)	

XZ 平面.....	57
圖 3.3.3 移除天線 1 和天線 4 與整合四支天線的比較（基本架構 c）(a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面.....	59



## 表目錄

表 2-1 Sigma 形和 W 形天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益....	12
表 2-2 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 1.....	24
表 2-3 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 2.....	25
表 2-4 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 3.....	25
表 3-1 架構 (a) 到架構 (c) 的優缺點比較.....	28
表 3-2 架構 (d) 到架構 (e) 的優缺點比較.....	28
表 3-3 架構 (a) 天線系統 (1) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 1.....	34
表 3-4 架構 (a) 天線系統 (1) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 2.....	35
表 3-5 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 1.....	42
表 3-6 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 2.....	42
表 3-7 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 3.....	42
表 3-8 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天 線 4.....	43
表 3-9 架構(b)天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益:天線 1.....	48
表 3-10 架構(b)天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益:天線 2....	48

表 3-11 架構(c)天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益:天線 1	52
表 3-12 架構(c)天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益:天線 2	53
表 3-13 移除天線 1 和天線 4, 及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較(基本架構 a).....	55
表 3-14 移除天線 1 和天線 4, 及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較 (基本架構 b) .....	57
表 3-15 移除天線 1 和天線 4 與整合四支天線輻射場形的比較(基本架構 c)....	59



# 第一章 導論

## 1.1 工程背景及需求

由於個人無線通訊發展的迅速及對高速資料傳輸的需求，舉凡手機通訊、無線區域網路等，已是日常生活中不可或缺的一環。家庭用戶、公共區域或者是公司企業都需要有區域網路的布建，然而有線區域網路的布建成本高，且線路佈建耗時且彈性低，因此一些臨時性的需求即無法滿足。而近年來有無線區域網路(WLAN)的出現，不僅降低了傳統有線區域網路布建的不方便性，也增加了我們使用上的便利性；因為有了無線區域網路，所以使用者可隨時隨地的克服環境限制不受纜線束縛而自由享受上網的樂趣及方便。為了因應大量的資料傳輸與多媒體，各式各樣新的相關通訊協定也隨之訂定。美國電機與電子工程師學會(IEEE)也將有關無線區域網路(WLAN)相關的協定規範在802.11中。

802.11b 為發展最早的無線區域網路標準，802.11b 工作頻段在 2.4GHz (2.4GHz~2.4835GHz)，其最大能提供的傳輸速率為 11Mbps。而天線在無線通訊系統射頻端中是一很重要的元件，除頻寬的要求外，幅射場形的增益和全向性也是要求的重點之一。在很多文獻中也特別針對於 2.4GHz 的頻段設計天線，如鉤狀天線(hook-like antenna)[3]、單極天線[4]、以及廣泛使用的倒 F 型天線[5]-[7]，這些天線都有尺寸小、製作容易、以及低成本的優點，且這些天線的輻射場型都接近全向性，所以很適合用於無線網路系統中。然而隨著無線網路應用的快速發展，對於傳輸資料的安全性要求越來越重視，傳輸資料量也越來越多，802.11b 的 11Mbps 傳輸速率已不敷需求。

802.11a 的出現在某種程度上則解決了此問題，802.11a 最大能提供 54Mbps 的傳輸速率，其操作頻段位於在 5GHz (5.15~5.35GHz/5.725~5.825GHz) 的頻段上。802.11a 和 802.11b 因為頻段不同，而使得兩者訊號的相容性較低，因此

802.11g 即應運而生。802.11g 工作的頻段與 802.11b 相同，同樣位於免費的 2.4GHz 頻段，但傳輸速度則可與 802.11a 一樣達 54Mbps，比 802.11b 的 11Mbps 快，因此 802.11g 是目前應用主流。

由於目前無線通訊電路的主動元件隨著 IC 製程的快速進步，增加其整合性且大幅縮小其體積，因此各家製造廠都希望可以整合不同的系統於同一個產品中，例如 802.11a/b/g/j 系統的整合，所以天線就必須能夠同時匹配於多個不同的頻段以符合此需求。因此若要供整合 802.11a/b/g/j 的無線區域網路系統，就必須有同時匹配於 2.4~2.5GHz 和 4.85~5.85GHz 的雙頻天線。最近有很多的文獻設計出各式各樣操作在 2.45GHz 與 5GHz 的雙頻天線[8]-[12]。在這些設計中，他們都有尺寸小、製作簡單、成本低、且易與平面電路板做結合等優點。而大部分文獻中的共振型雙頻天線，都是採用兩種相同的共振機制利用長度的不同產生雙頻，且大部分高頻的操作頻段 5GHz 的頻寬都不大，只足夠給 HIPERLAN/2 使用，而不足夠給 802.11a 系統使用，例如雙層倒 F 型天線[8]、雙 U 型天線[9]、正 F 型天線[10]、以及雙 T 型天線[11]等。

全球化的時代來臨，也代表了系統的設計要能夠因應各個國家所訂定的規格，所以本論文一開始討論只能應用於 2.4GHz 頻段的天線系統，然後逐一討論到整合四支天線，且能夠操作在全頻段，天線間的干擾要在 -10dB 以下，能應用於現在流行的 MIMO 天線系統，例如由四支彎折的倒 F 型天線構成的系統[13]、運用介電共振腔天線[14]整合的系統等。因為無線通訊中有多重路徑衰減的問題，可利用分集式技術改善，在本論文也提出如何適當的減少兩天線間互相干擾的效應，並在有限空間中設計出分集式天線。

在另一方面隨著無線通訊需求的迅速發展，社會多媒體訊息交流的急遽增加，為了因應大量的資料傳輸與多媒體，因此頻譜已成為日益寶貴的資源，所以除了各式各樣新的相關通訊協定的訂定外，未來無線通訊技術將因此需特別加強無線接取(Radio Access)能力的提升，以期望能達到最佳的頻譜運用效率，而整合多天線應用於多接收多發送 (MIMO : multi-input and multi-output) 即為一提

升頻率資源效率、系統容量和通訊品質的有效途徑。在傳統的無線網路應用中通常都是用空間分集(Spatial Diversity)，產生互補式的輻射場型獲得分集增益(Diversity Gain)，以來對抗無線通道的多路徑衰減現象以加強無線接取能力。最後本論文提出整合四支天線的系統，而天線的場形也在各方向具有互補的效果，此可解決多重路徑衰減的問題，全頻段皆可操作滿足 802.11 a/b/g/j 的需求。

## 1.2 章節內容介紹

本論文共分為三個章節。第一章為導論，說明本論文研究的相關背景及動機。在 MIMO 天線系統中的應用，主要有兩個目標要達到，第一個是為了解決天線多重路徑衰減的問題，所以天線幅射場型的設計必須達到全向性或是不同的天線在不同的方向有互補的功能，不同的天線在不同的方向互補的功能即場型分集(pattern diversity)；第二個是為了增加系統的容量，即多路傳輸(multiplexing)，每支天線都發射不同的信號，所以天線間的隔離度(isolation)要很高。為了滿足上述兩個需求，天線操作頻段要能夠涵蓋全頻段(802.11a/b/g/j: 2.4, 4.9, 5.2, 5.8GHz 頻段)，且輻射場型要能夠涵蓋各方向，天線間的隔離度要達到-10dB。

本論文設計所用的模擬軟體皆使用 HFSS。在第二章中，一開始會說明傳輸線間和天線間干擾效應的問題，再來介紹第一個天線系統，是由 Sigma 形和 W 形單極天線所構成的系統，主要是操作在 2.4GHz 頻段，輻射場形也有達到全向性，天線間的干擾也可達到要求的 -10dB 以下，接下來介紹第二個天線系統，主要是由方形環狀單極天線系統構成，設計方法、量測結果會在此呈現。第三章要繼續介紹第三個系統，由四支天線所構成的緊密多接收多發送天線(MIMO)系統，天線間干擾的效應就是研究的重點，除了造成基頻信號處理的困難外，也會造成天線間的破壞性干涉使得增益降低。在這裡我們會提出幾個設計的架構，

各種餽入方式和使用不同的天線，天線架構的優缺點比較和結論會完整的敘述，並說明本論文的量測結果與心得。

本論文所提出的 MIMO 天線系統架構，可以提供設計者使用各種架構和不同天線時該考慮的重點和彼此間妥協。



## 第二章 多天線系統於無線網路卡前端之應用

本論文首先介紹天線和傳輸線間耦合的效應，接下來介紹由兩支單極天線所構成的系統，利用兩支餌入方向垂直的天線，和天線間的接地面金屬，達到降低天線間的干擾。輻射場型的全向性，由天線上的輻射電流和餌入端附近接地面上的橫向電流進行輻射來完成，因為同時具有兩個垂直方向的輻射電流，由天線理論對偶極（dipole）天線的探討，可以由偶極天線的輻射場型，利用重疊原理（superposition），得到接近圓形（即所謂全向性）的輻射場型。本章節將對此系統的設計原理做簡單的基本介紹。本章最後一節會介紹一個由三支方形環狀天線構成的天線系統，除了涵蓋 IEEE802.11 操作的全頻段外，輻射場型在各方向皆有互補的效果。



### 2.1 兩雙極天線（dipole antenna）在 FR4 材質和空氣中輻射彼此干擾的效應

因為在無線網路卡上，能利用的空間有限，天線和餌入線必須置於很小的面積，所以設計的考量除了天線本身造成的耦合外，傳輸線靠太近也會有耦合的效果，所以本節要分別討論餌入傳輸線和天線靠近時的耦合量，耦合就會造成干擾。無線網路卡的應用上，天線和餌入傳輸線能使用的面積約為寬度 48mm×高度 30mm，在這麼小的面積下要整合多天線在上面，所以應用於 2.4GHz 頻段時，天線間的距離約為在空氣中傳播的 0.2 倍波長，可以預期天線間的耦合量將會很大，且實際天線應用時，餌入傳輸線的距離（此定義為傳輸線中點和傳輸線中點的距離）通常會保持在 8mm 以上，在此假設傳輸線最小的距離為 10mm，原因是天線設計完後還要考慮下線後還會有匹配 pi 電路要預留空間，模擬由 1.5GHz

模擬到 6.5GHz，結果可知在距離 10mm 時，兩傳輸線間的信號干擾量很小，信號干擾量在最高的 6.5GHz 約為-28dB。

電磁波在空氣中傳播，在 2.4GHz 時的半波長約 6.25 公分，在 5GHz 頻段時的半波長約 3 公分；在 FR4 (PCB 板材質： $\epsilon_r = 4.4$ ， loss tangent=0.02) 板中傳播時，在 2.4GHz 的半波長約 3.4 公分，在 4.9GHz 的半波長約 1.4 公分。由天線理論[1]的討論，天線間耦合和考慮餌入網路的耦合，可由餌入埠（port）互阻來等效，所以我們量測就只考慮由餌入端看到的散射參數，且由量測的散射參數和相位可以得到等效互阻[2]，這就考慮到傳輸線、天線間所有的耦合效應，在此我們模擬在 4.9GHz，兩天線在空氣中的信號干擾情形。圖 2.1.1 (a) 是模擬兩支偶極天線信號干擾情況的結構圖，餌入是同軸電纜線以防傳輸線間的耦合，在此採用圖 2.1.1 (a) 的擺設法是因為半波長偶極天線輻射場型在  $\theta=90^\circ$  輻射強度最強， $\theta=0^\circ$  時，輻射最弱的條件下天線靠很近耦合量仍很低，圖 2.1.1 (b) 是模擬信號干擾 (S21) 參數圖。由模擬的結果顯示，在操作頻率時，天線間的距離約電磁波在介質中的半波長，兩天線間的信號干擾量會降低到-13dB 以下。



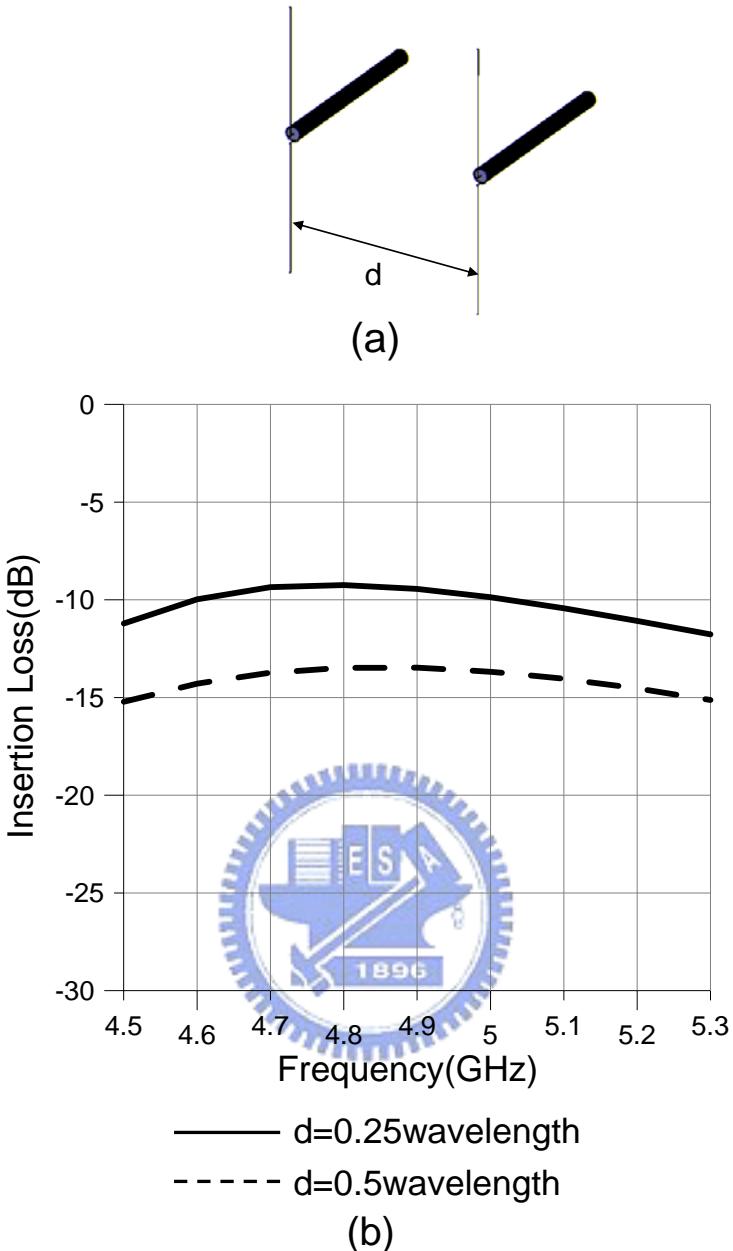


圖 2.1.1 模擬單極天線信號干擾量的情況圖 (a) 兩支天線結構圖 (b) 模擬信  
號干擾量參數圖

天線在輻射時，會由三種不同的路徑造成干擾，使發射的信號被其它天線收到，而此被其它天線接收到的信號會由接收的天線再輻射，除了此再輻射的信號，自己也有發射的信號，發射信號的天線本身也受到其它天線干擾，這就是天線間的耦合效應，會造成系統的傳輸率降低。天線的干擾效應主要由餌入線靠太近造成的耦合、天線旁接地面金屬的感應電流流到其它天線附近的干擾、和天線

輻射在空間中傳播被其它天線接收的耦合所造成。

降低耦合的方法有好幾種：第一種是運用在微帶天線[15]，微帶天線是利用邊緣漏電場所產生的等效磁流輻射，所以適當選取餌入線的位置，在其電流最強節點使用開關（switch）開路，和微帶天線的輻射機制相反，就能使發射信號周圍的天線不共振而降低干擾；第二種是在天線周圍放置週期結構，電磁波在某個頻段時，會有類似帶斥（Band notch）的效果而不傳播，這樣天線發射的信號就不會傳播到周圍的天線，此結構也稱為電磁頻隙(Electromagnetic-Bandgap:EBG)[16][17][18]結構；第三種是在天線附近接地金屬所產生的感應電流路徑上，挖狹槽（slot）[19]，以增加電流路徑讓流到周圍天線的電流已經很小，或是挖四分之波長的狹槽，由電磁學知，四分支波長傳輸線，原來短路的節點經過四分之波長的轉換後變成開路，這樣感應電流在此點看到開路就不會再往周圍天線流而降低干擾；第四種是由S參數推得等效相對阻抗，如Z12，在天線間加入元件等效成負阻抗去消去耦合的等效阻抗[20]，第五種天線極化方向垂直；第六種是使用反射元件將能量往某個方向推，不使其能量輻射到其它天線的方向等，在此我們因面積限制，無法使用EBG結構，且為達到雙頻，要符合低頻的操作頻率，天線尾端可能需要彎折，不可能只用一種極化方向的天線，且要整合四支天線，消去阻抗法複雜也無多餘空間放置其它元件，挖狹槽也不能完解決干擾問題，因為還有來自空間的輻射耦合，所以要整合多天線在小面積且彼此的信號干擾量要低是困難的。

## 2.2 W形與Sigma形單極天線置於無線網路卡前端之應用

這一節要討論兩單極天線置於無線網路卡前端的應用，在此我們應用是在802.11b/g，所以操作頻率是在2.4GHz頻段，圖2.2.1為此天線的結構圖，此系統主要是由兩支單極天線所構成，右邊天線定義為天線1，左邊天線定義為天線

2，此天線系統是操作在 2.4GHz 頻段，頻寬要求在 100MHz，且其中一支天線要有輻射全向性的特性，天線是製作在 PCB 板 (FR4 材質)，電磁波在 FR4 板和空氣中傳播等效的四分之波長約為 18mm，但在此我們單極天線是設計平面印刷式天線，所以等效上看到的天線尺寸還要增加。此天線架構的尺寸是  $w_1 = 1.531\text{mm}$ ，餌入線寬讓傳輸線特性阻抗是 50 歐姆， $w_2 = 15\text{mm}$ ， $w_3 = 20\text{mm}$ ，兩天線佔用的面積相同， $d_1 = 2.5\text{mm}$ ， $d_2 = 2.469\text{mm}$ ， $d_3 = 1\text{mm}$ ， $d_4 = 6\text{mm}$ ， $d_5 = 8\text{mm}$ ， $d_6 = 8.5\text{mm}$ ， $d_7 = 5\text{mm}$ ， $d_8 = 6.5\text{mm}$ ， $d_9 = 1\text{mm}$ ， $d_{10} = 3.2345\text{mm}$ ， $d_{11} = 2.5\text{mm}$ ， $d_{12} = 3.969\text{mm}$ ， $d_{13} = 7.5\text{mm}$ ， $d_{14} = 2\text{mm}$ ， $d_{15} = 7.5\text{mm}$ ， $d_{16} = 2.5\text{mm}$ ， $d_{17} = 10\text{mm}$ 。

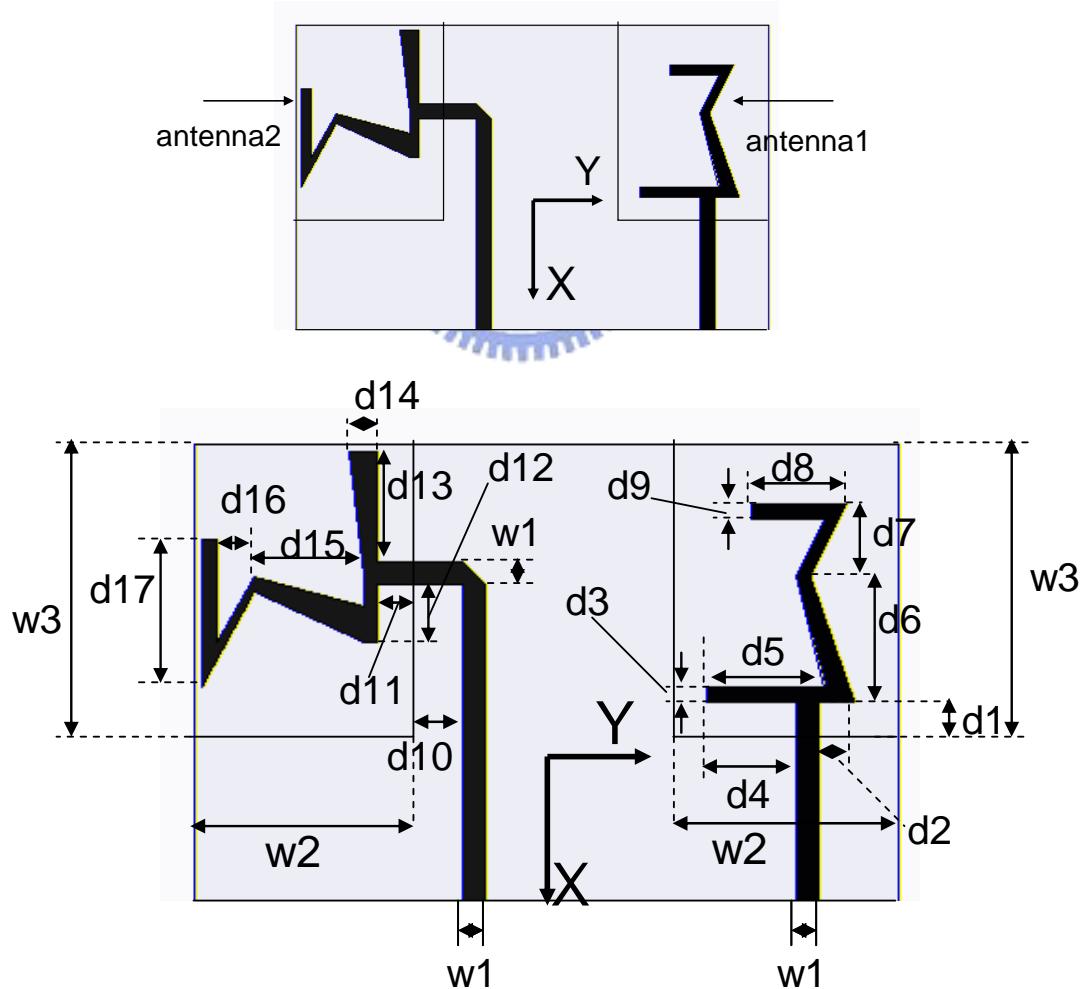


圖 2.2.1 W 形與 Sigma 形單極天線結構圖

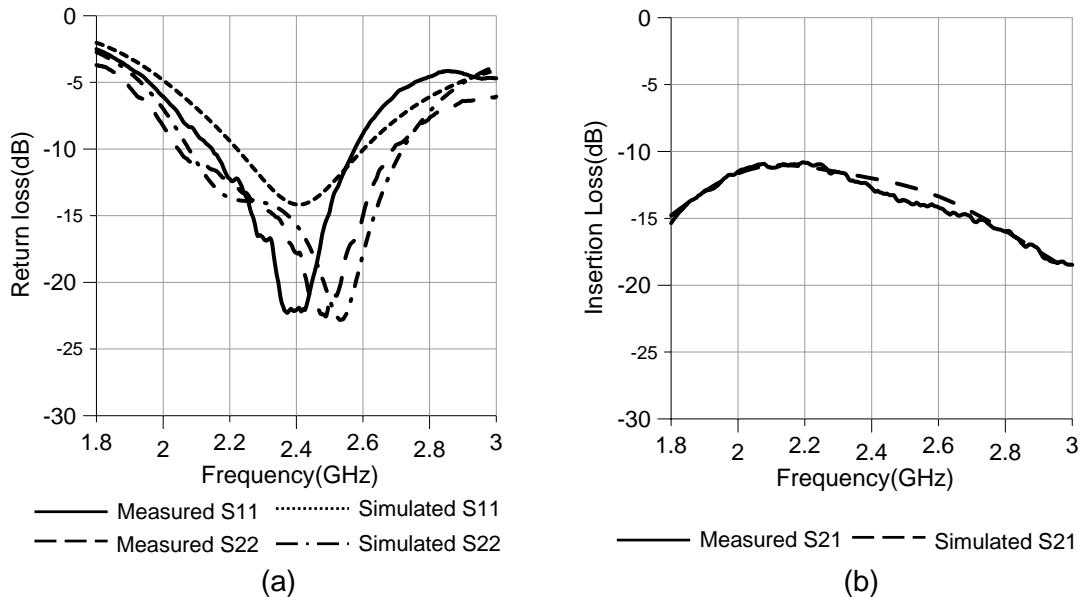


圖 2.2.2 W 形與 Sigma 形單極天線模擬與量測的散射參數 (Scattering Parameters) (a) 反射損耗 (Return loss) (b) 信號干擾量 (Insertion Loss)

由天線理論映像法[1]知道四分之波長單極天線等效於二分之波長的偶極天線，所以天線設計由餌入端開始算，到天線末端總長度為 18mm，但模擬之後發現操作頻率偏高，所以我們調整 d8 和 d17 的長度，天線 2 採用 W 形狀是因為此天線為華邦電子公司合作計畫，所以設計為華邦電子公司英文名第一個字母 W 形狀，d4 和 d13 為調整餌入電容匹配參數。

圖 2.2.2 為模擬和量測的反射損耗 (Return loss) 和信號干擾量圖，模擬和量測的數據也很接近，量測所得天線 1 的頻寬是 426MHz、天線 2 的頻寬是 642MHz，且在操作頻率 2.4GHz 時天線間的信號干擾量為 -13dB，達到 -10dB 的要求，天線 2 比天線 1 頻寬還寬是因為天線 2 是先走一段和接地金屬平行的餌入，這一段會和接地金屬上的感應電流產生破壞性干涉造成損耗，輻射損耗比天線 1 的損耗高，由微波工程[2]得知損耗較高的共振結構會有較高的頻寬。

由映像法[1]知，單極天線除了天線本身有輻射電流，餌入端的接地金屬也

會有感應電流，所以有限大小的接地金屬對天線的特性就會有影響。因為本系統的應用是採平面印刷式天線，所以接地金屬的電流在靠近餌入端和餌入電流方向垂直，且會沿著接地金屬的形狀流。2.1 節有提到輻射電流的極化方向彼此垂直的話，可以降低天線的耦合，如圖 2.2.1 所標示，天線 1 和天線 2 餌入的方向彼此垂直是為了讓餌入電流彼此垂直，天線旁接地金屬的挖槽大小的選定是為了讓天線 1 接地金屬上的感應電流的路徑長度夠長，到靠近天線 2 接地金屬上的電流和感應電流已經很小以達到降低信號干擾量的效果。天線 1 的輻射，因為同時具有兩個垂直極化方向的電流，所以可以達到全向性的輻射場型。天線 2 的設計和餌入端不垂直是為了有兩個不同的極化分量，讓輻射場型更接近全向性，但接地金屬上的感應電流和天線的輻射電流在往右邊的輻射有所抵消，使得在 XY 平面和 YZ 平面的輻射場型會偏向一邊，圖 2.2.3 和圖 2.2.4 為量測的輻射場型，輻射場型在每個平面量測的平均增益（average gain）和峰值增益（peak gain）整理於表 2-1。

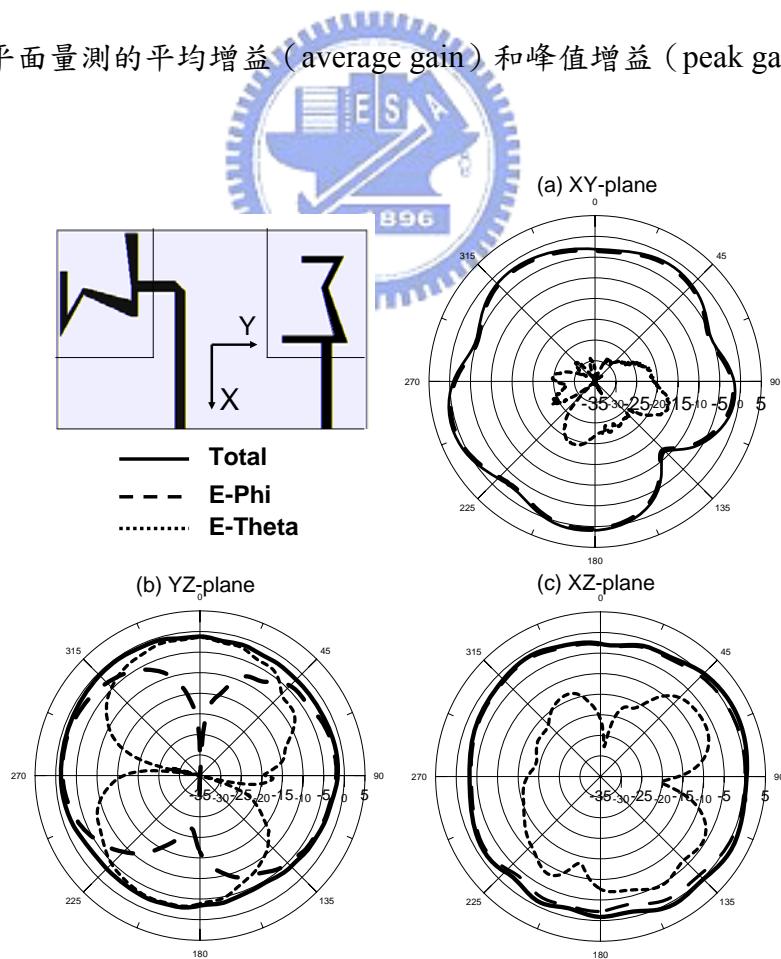


圖 2.2.3 天線 1 (sigma 形) 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

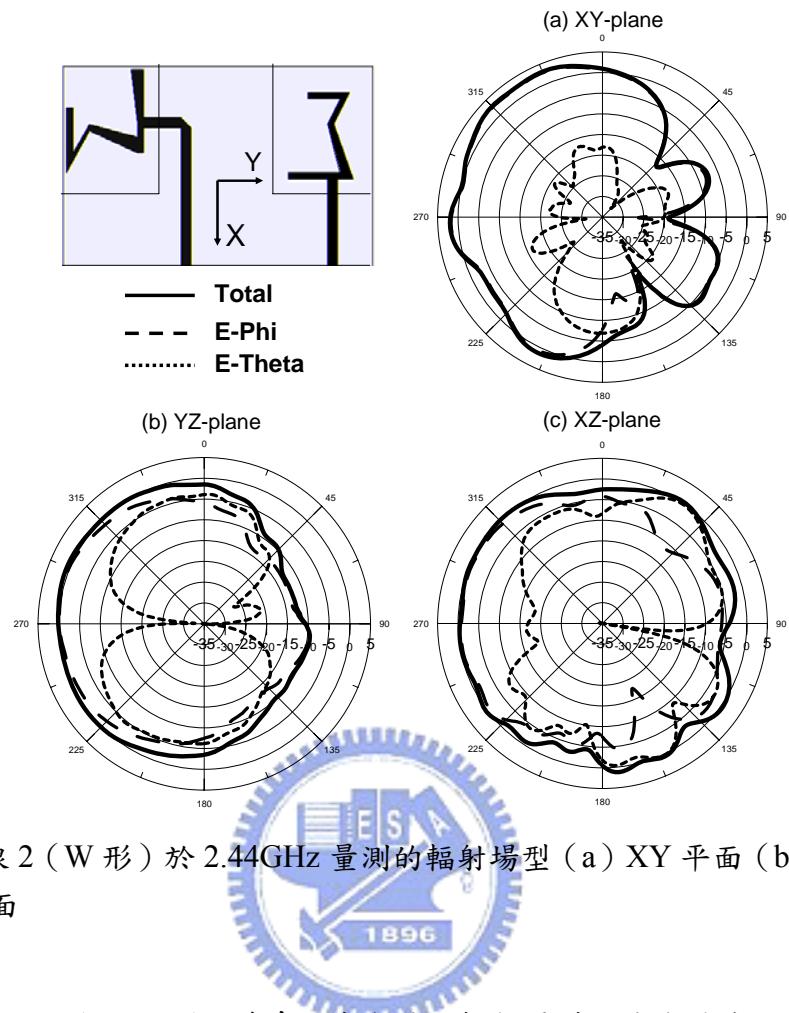


圖 2.2.4 天線 2 (W 形) 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面  
(c) XZ 平面

表 2-1 Sigma 形和 W 形天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益

	XY 平面	YZ 平面	XZ 平面
天線 1	平均增益： -2.05dBi  峰值增益：0.09dBi	平均增益： -2.00dBi  峰值增益： -0.45dBi	平均增益： -0.78dBi  峰值增益：1.32dBi
天線 2	平均增益： -1.14dBi  峰值增益：3.13dBi	平均增益： -2.52dBi  峰值增益：0.78dBi	平均增益： -1.04dBi  峰值增益：1.23dBi

## 2.3 三方形環狀單極天線置於無線網路卡前端之應用

應用於多接收多發送（MIMO）天線系統時，天線間的信號干擾若太高將使基頻端的信號處理無法解出原來信號，所以天線間的信號干擾必須降低到-10dB以下，這也限制了天線能擺設的位置。在此我們將其中兩支天線擺設在無線網路卡的兩旁，另一支擺設在前端靠中間的位置如圖 2.3.1 所示，天線間的距離盡量拉開以降低干擾，但實際的應用能使用的面積有限，所以只單純利用天線間的距離和接地金屬去阻擋天線間的信號干擾，是很難達到要求的-10dB，而這個天線系統也有這個問題，天線 2 和 3 之間的信號干擾量就達到-8.68dB。右上角接地面的缺角是為了給晶片天線（chip antenna）放置，視設計者的需要，若有需要可以再增加。

天線 1 到天線 3 是由傳輸線餌入一開路共振環結構，由第一節知道 2.4GHz 等效二分之波長約為 3.4 公分，即 34mm，天線 2 開路環長度約為二分之波長，但是天線 1 和天線 3 開路共振環長度比天線 2 短，因為天線 1 和天線 3 周圍被接地金屬圍繞對地電容較大緣故，所以尺寸上比天線 2 小。天線 1 到天線 3 於高頻 5GHz 頻段主要是由較短的分支進行輻射。

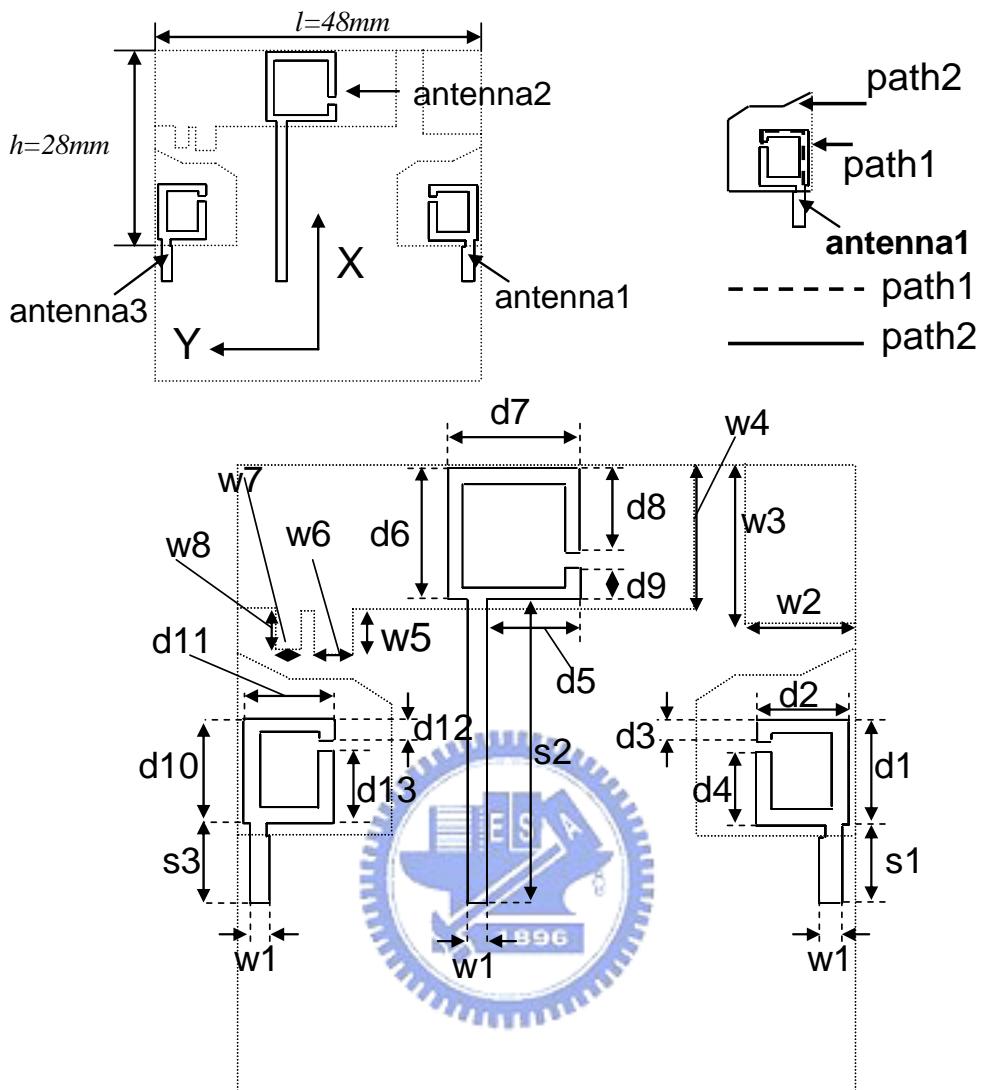


圖 2.3.1 天線結構圖

此天線系統的尺寸是  $w_1 = 1.55\text{mm}$ ， $w_2 = 8.5\text{mm}$ ， $w_3 = 12\text{mm}$ ， $w_4 = 11\text{mm}$ ， $w_5 = 3.5\text{mm}$ ， $w_6 = 3\text{mm}$ ， $w_7 = 2\text{mm}$ ， $w_8 = 3\text{mm}$ ， $s_1 = 6\text{mm}$ ， $s_2 = 23.5\text{mm}$ ， $s_3 = 6\text{mm}$ ， $d_1 = 7.8\text{mm}$ ， $d_2 = 7\text{mm}$ ， $d_3 = 1.5\text{mm}$ ， $d_4 = 5.63\text{mm}$ ， $d_5 = 7.3\text{mm}$ ， $d_6 = 10\text{mm}$ ， $d_7 = 10.3\text{mm}$ ， $d_8 = 6.3\text{mm}$ ， $d_9 = 2.6\text{mm}$ ， $d_{10} = 7.9\text{mm}$ ， $d_{11} = 7\text{mm}$ ， $d_{12} = 1.6\text{mm}$ ， $d_{13} = 5.73\text{mm}$ 。

由上一節對方形環狀天線的模擬可知，天線輻射除了天線本身的輻射電流外，靠近天線的接地上面上電流也幫助輻射或是造成破壞性干涉，所以我們可以調整天線 1 路徑 1 長度(圖 2.3.1 所標示)，或是接地面環繞天線部分路徑 2(圖 2.3.1)

所標示)的長度和形狀，來調整天線的共振長度和電流分佈位置以得到我們想要的電流路徑長，此方形環狀天線也是個濾波器的結構，環狀開路環長度在 2.4GHz 頻段約為半波長，所以可以達到雙頻的效果。因為天線能使用的面積只有 4.8CM  $\times$  2.8CM，所以縮小天線面積增加接地面繞在天線周圍的長度，所以環繞天線 1 和 4 的接地面往內延伸，以匹配各頻段操作。

此天線系統也是在 FR4 板上實現，使用的板厚度是 0.8mm，FR4 板的基本係數在前面已經介紹過，在此不再敘述。這架構模擬是利用 Ansoft HFSS 模擬軟體所模擬，圖 2.3.2 是模擬和量測的反射損耗數據圖。反射損耗(Return loss)10dB 頻寬在操作頻率 2.4GHz 可操過 350MHz，5GHz 的頻寬超過 1GHz 符合要求。

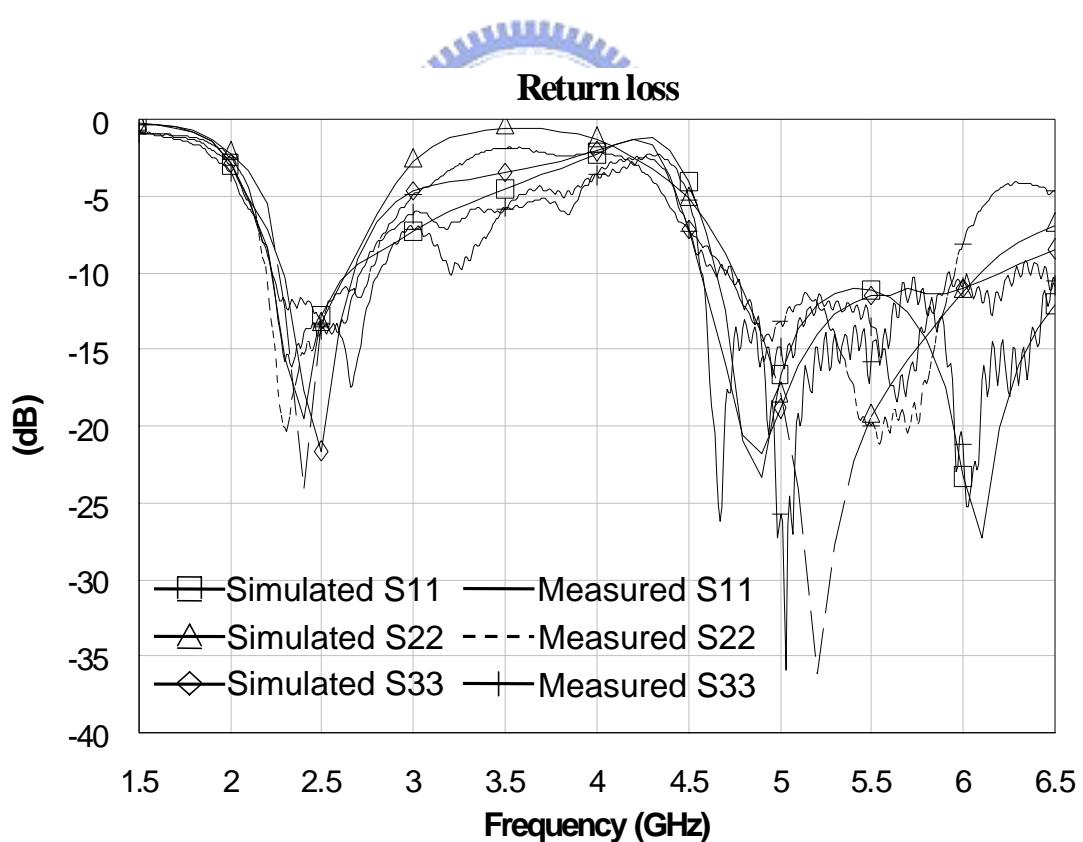
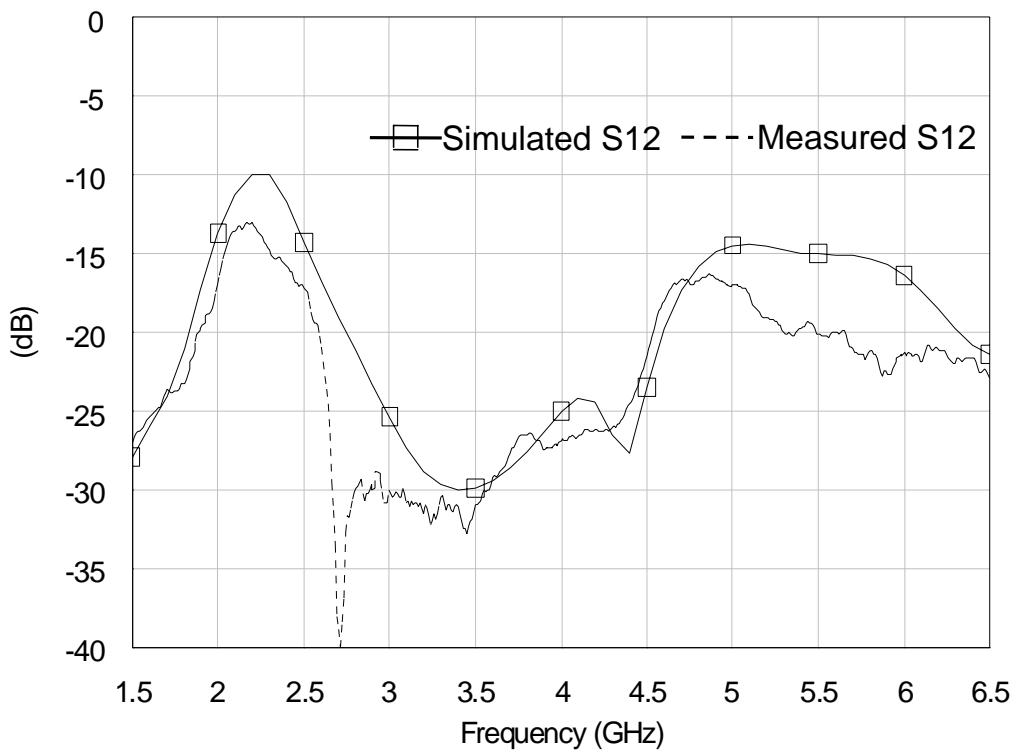
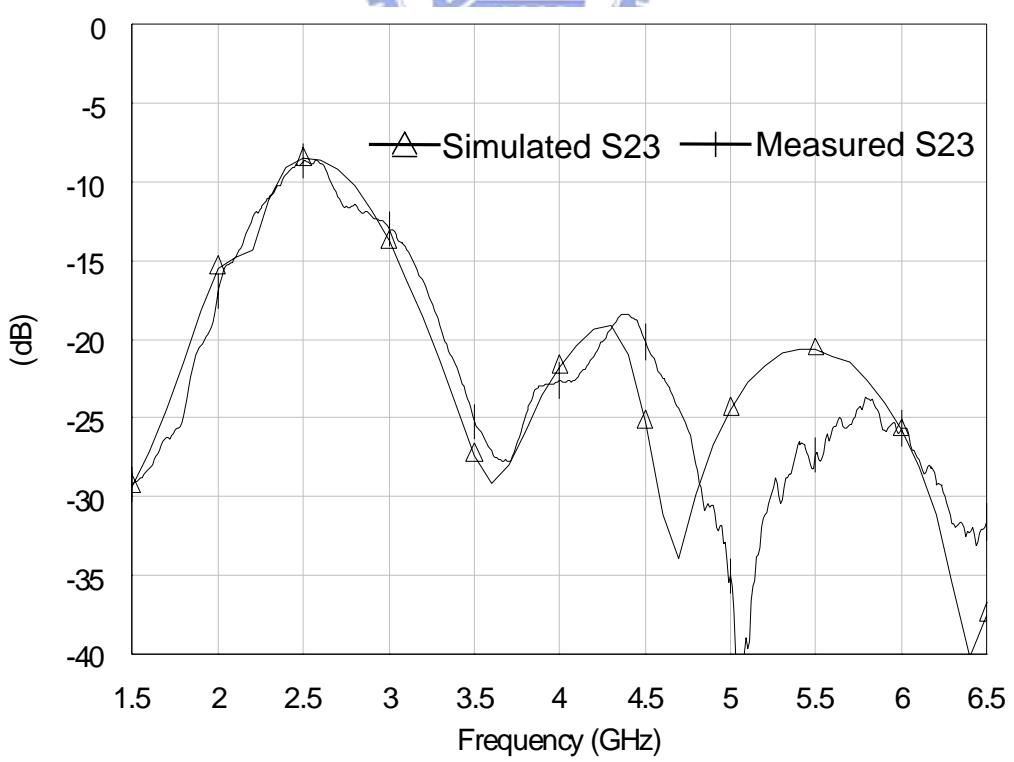


圖 2.3.2 整合三天線系統模擬和量測的反射損耗圖



(a)



(b)

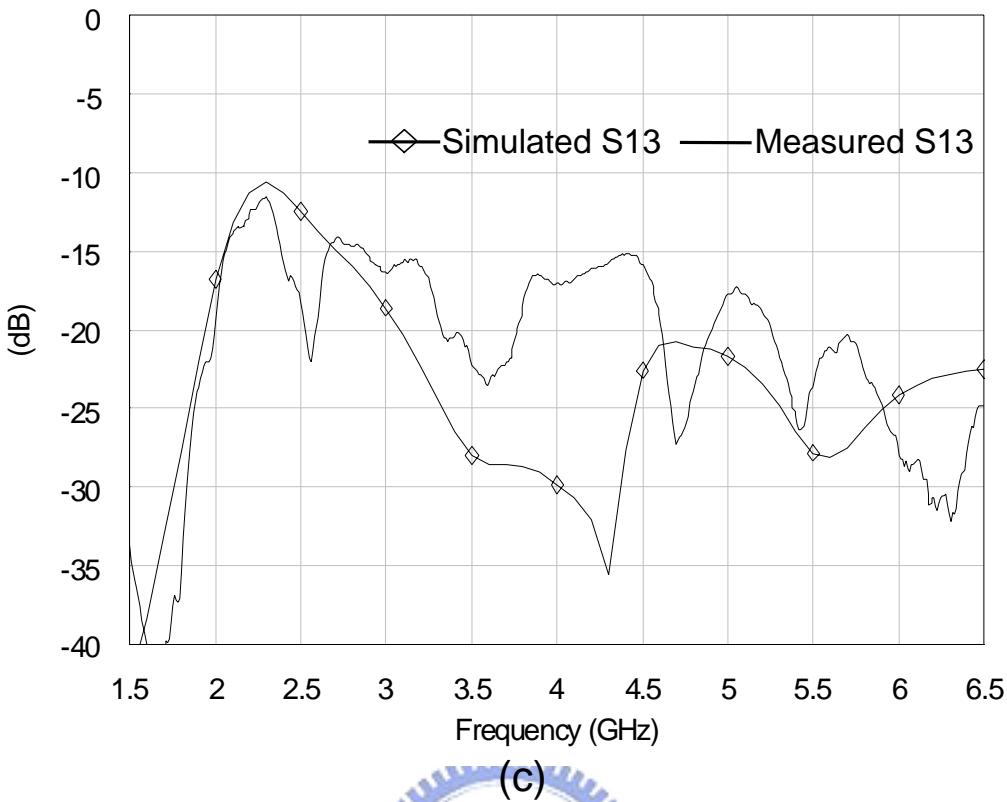


圖 2.3.3 整合三天線系統模擬和量測的信號干擾量數據圖 (a) 天線 1 和天線 2 模擬和量測的信號干擾量 (b) 天線 2 和天線 3 模擬和量測的信號干擾量 (c) 天線 1 和天線 3 模擬和量測的信號干擾量

由量測的數據可知：只有在操作頻段 2.4GHz 內，天線 2 和 3 間的信號干擾量達到-8.68dB，其它天線 1 和 2 間、天線 1 和 3 間的信號干擾量皆在-10dB 以下，5GHz 頻段的耦合量皆在-10dB 以下，這是因為在 5GHz 頻段，電磁波在介質基板中傳播半波長約 16.2mm，而在這頻段裡，天線間的距離相對於波長約 1.2 個半波長，所以低頻的信號干擾量是還需要改進的地方。

下列圖 2.3.4 到圖 2.3.15 是量測的輻射場型，以下量測天線的條件是當一支天線餽入信號時，另外兩支天線接上 50 歐姆的負載。由量測的輻射場型圖觀察可知，當其中一支天線幅射場型在某個方向增益不高時，會有另外兩支天線補償，這就是場型分集的設計，以圖 2.3.4 到 2.3.6 為例，天線 1 的 XY 和 YZ 平面的輻射場型主要是負責右邊的輻射，天線 2 主要是向前輻射，XY 和 YZ 平面在兩邊的輻射就較弱，天線 3 就補天線 1 和天線 2 向左邊輻射的不足，由其它頻段

的輻射場型觀察得知亦有場型互補的功能。輻射場型在每個平面量測的平均增益和峰值增益整理於表 2-2 到表 2-4。

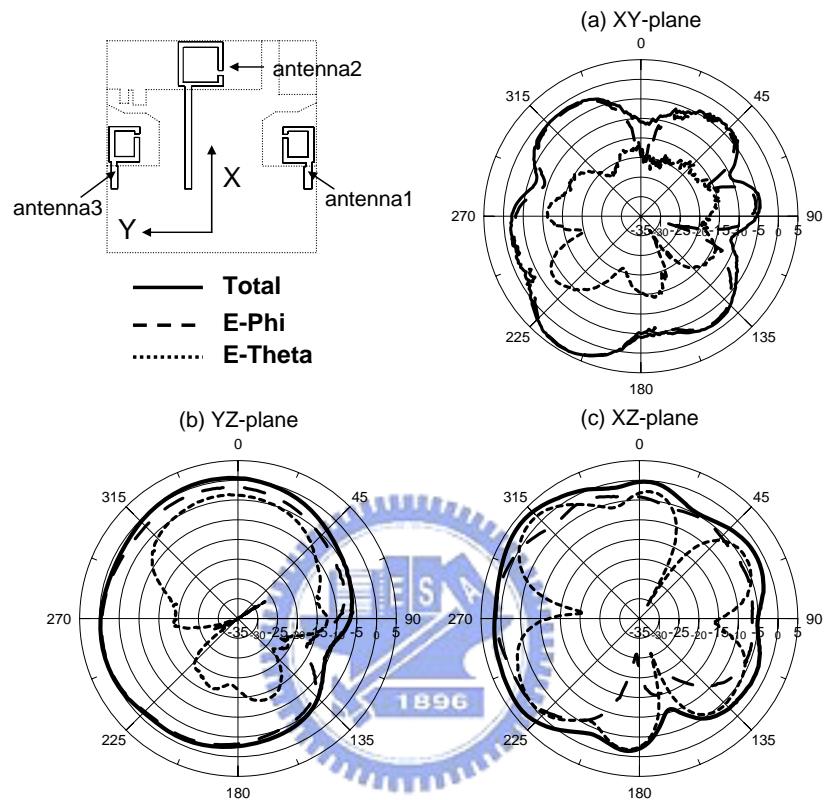


圖 2.3.4 天線 1 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

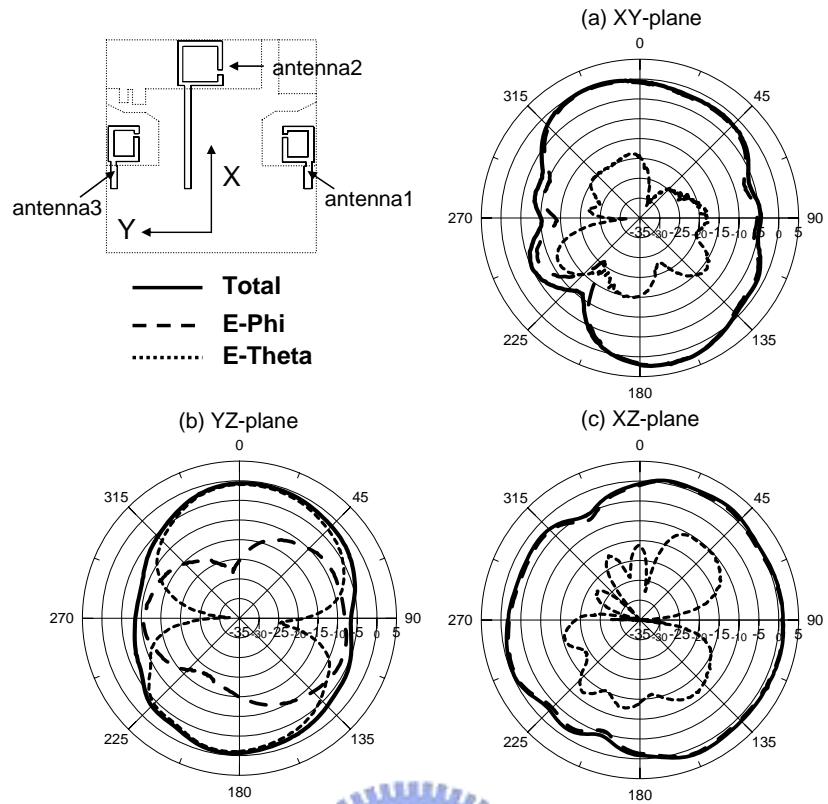


圖 2.3.5 天線 2 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

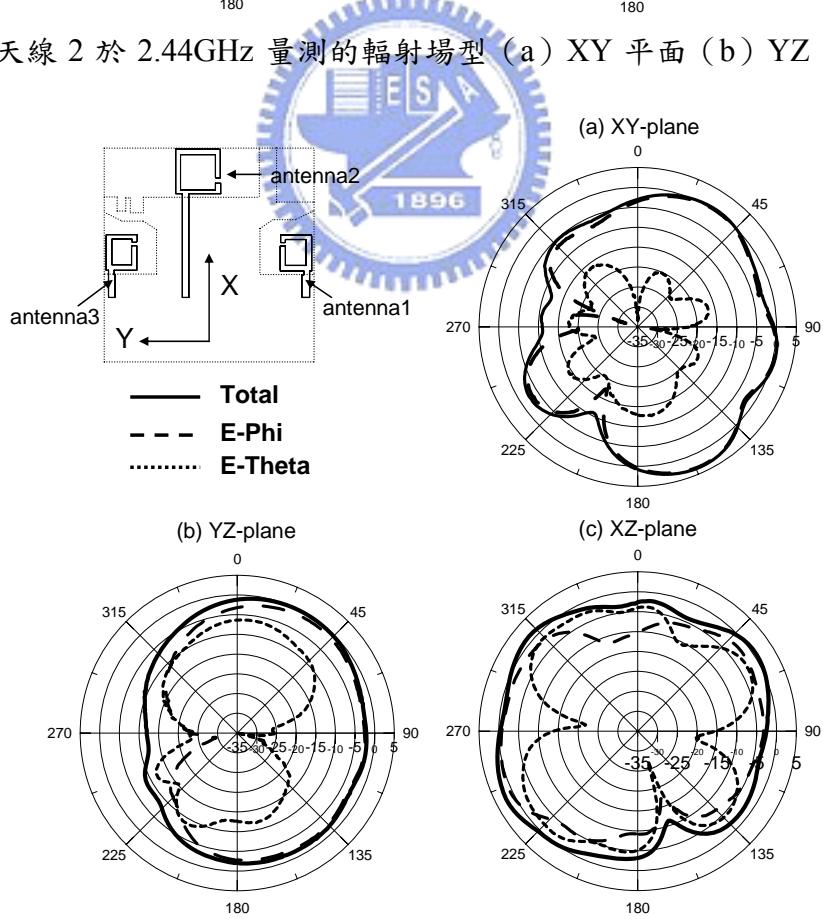


圖 2.3.6 天線 3 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

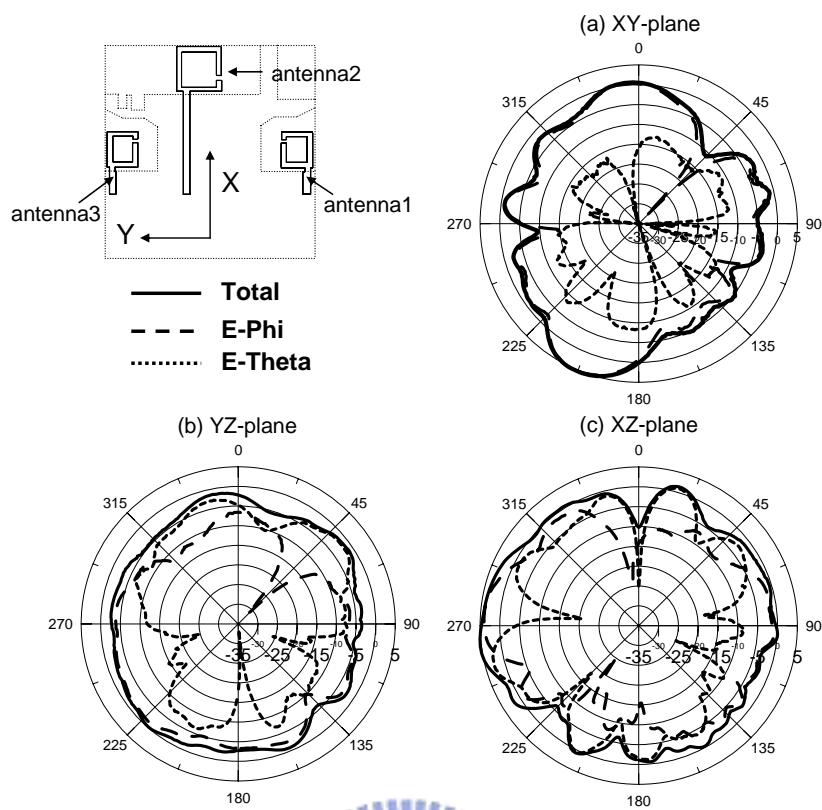


圖 2.3.7 天線 1 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

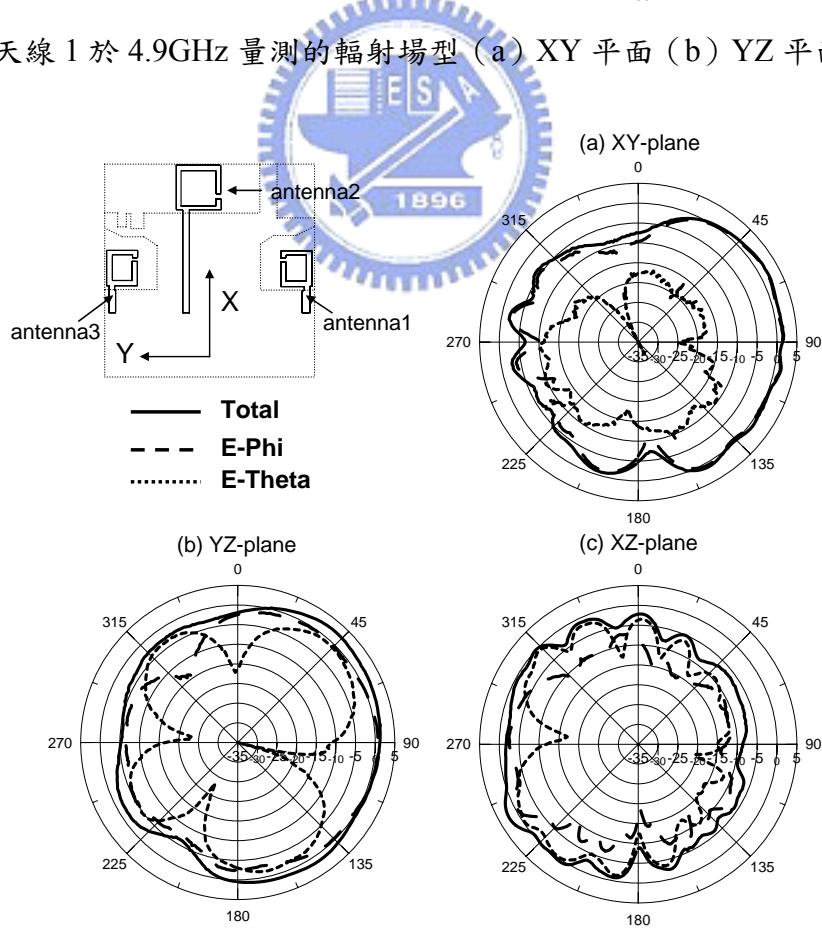


圖 2.3.8 天線 2 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

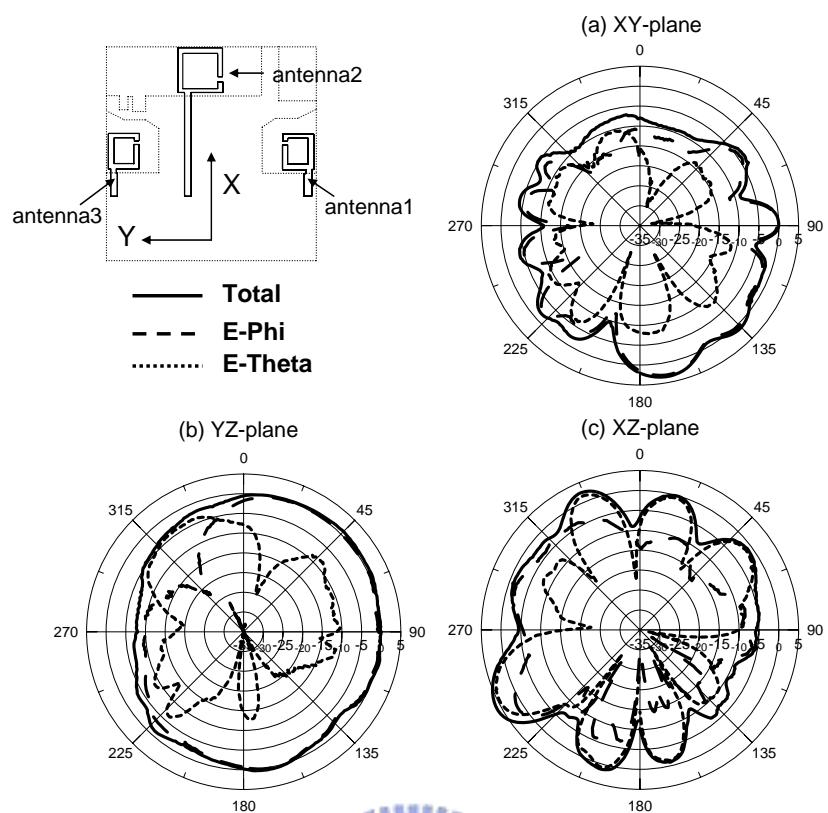


圖 2.3.9 天線 3 於 4.9GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

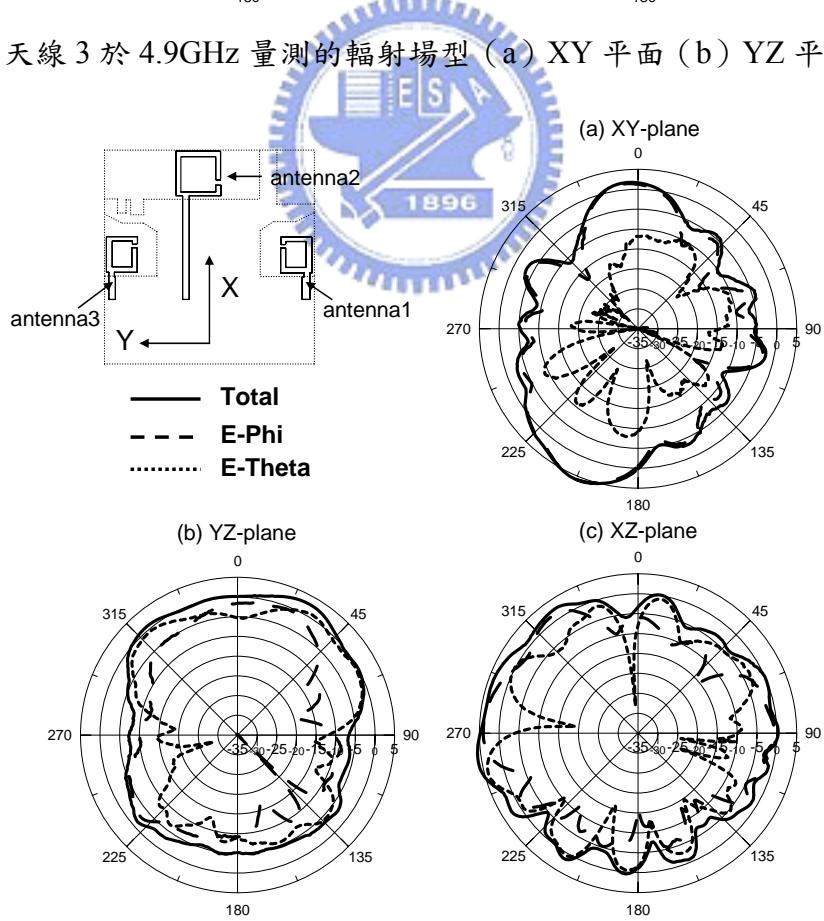


圖 2.3.10 天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

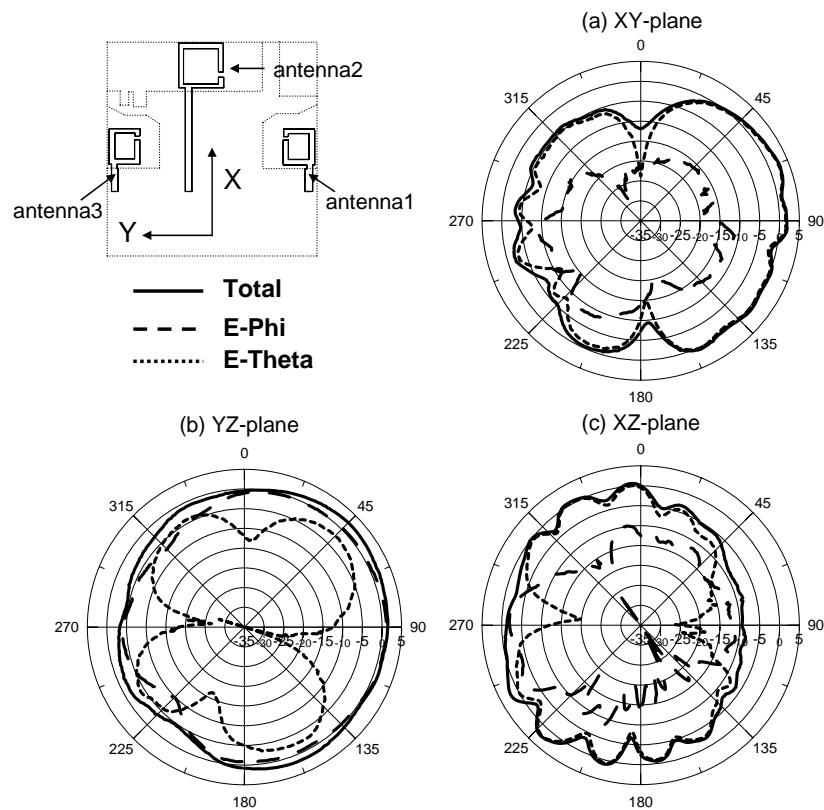


圖 2.3.11 天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

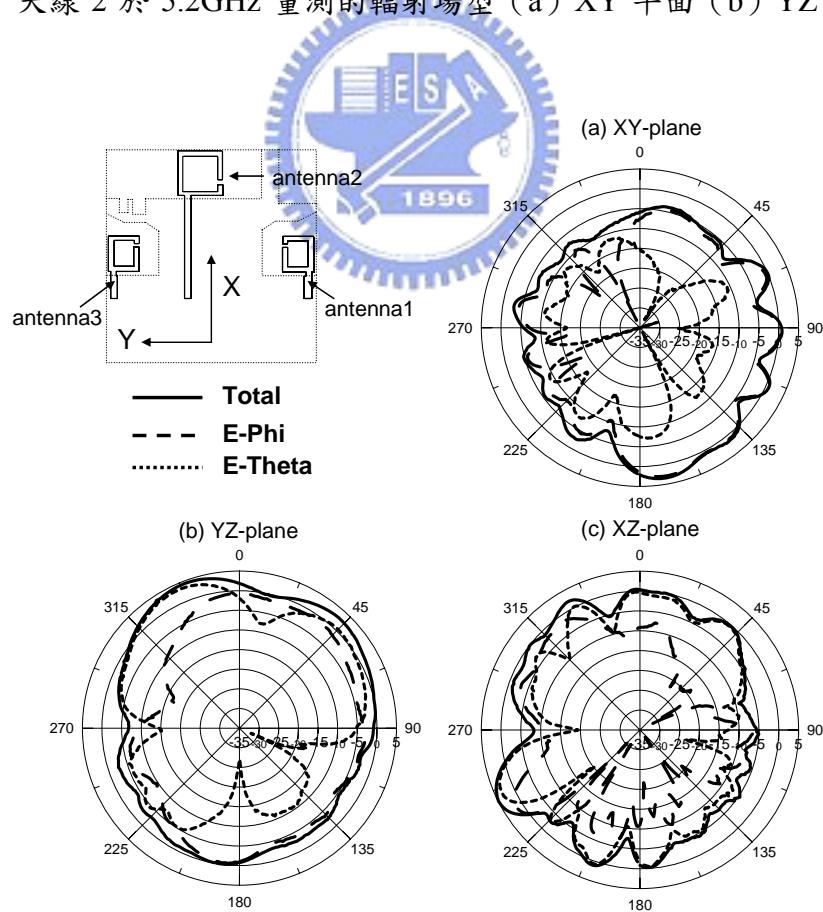


圖 2.3.12 天線 3 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

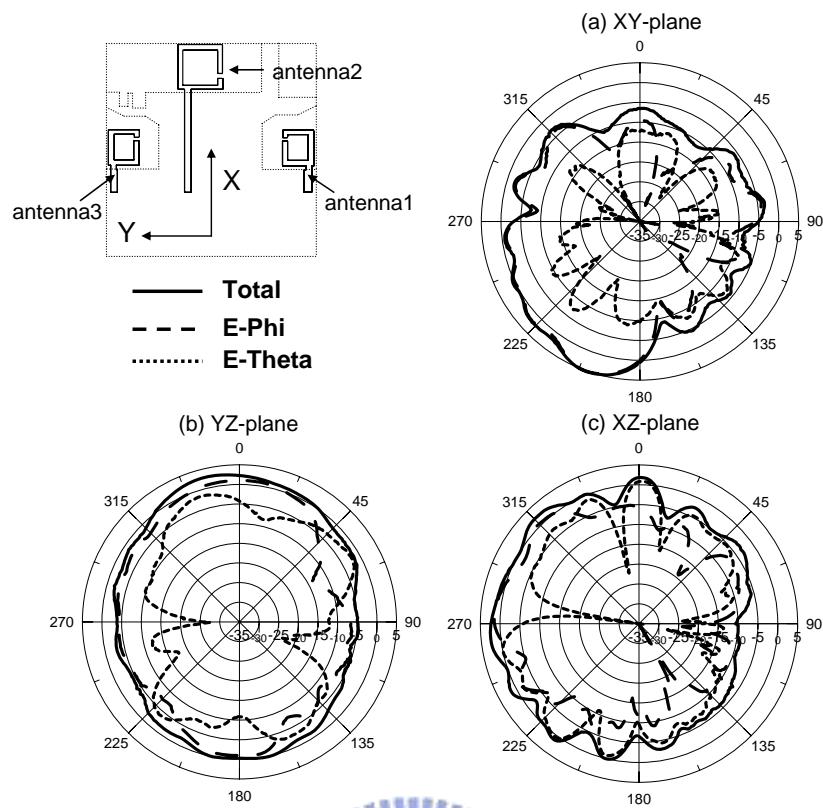


圖 2.3.13 天線 1 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

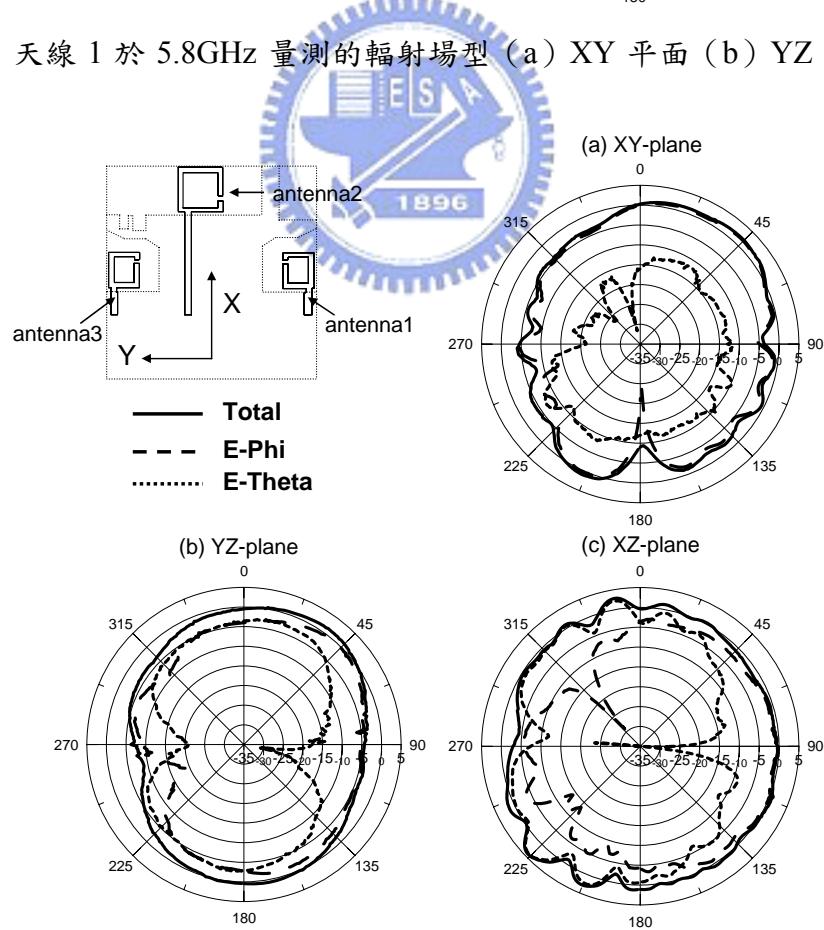


圖 2.3.14 天線 2 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

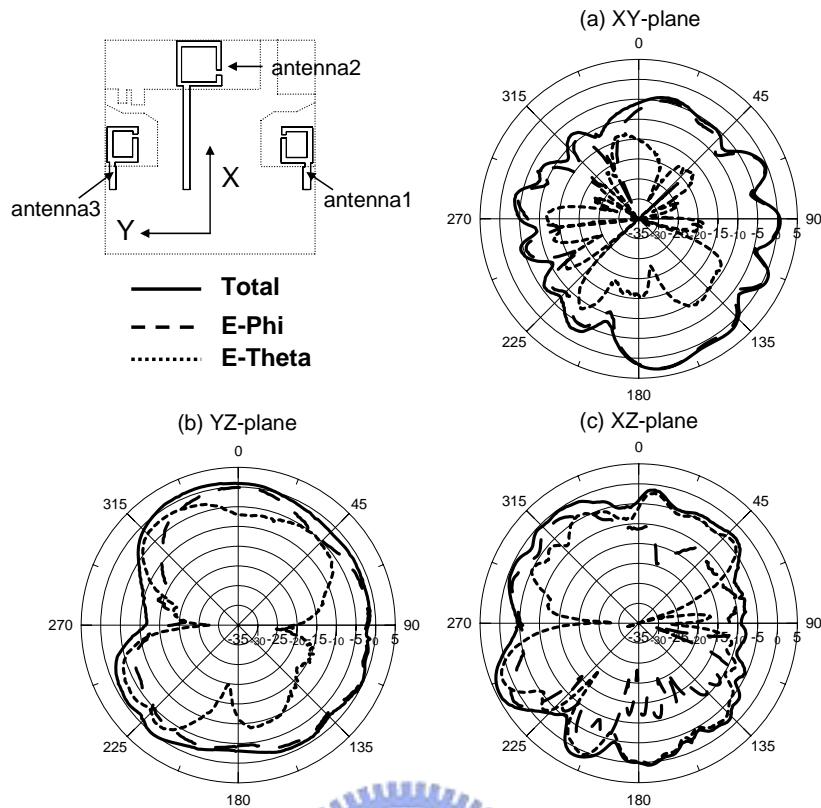


圖 2.3.15 天線 3 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

表 2-2 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 1

	2.44GHz		4.9GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-2.31dBi	4.19dBi	-1.45dBi	5.33dBi
YZ平面	-1.86dBi	0.75dBi	-2.71dBi	-0.13dBi
XZ平面	-0.4dBi	3.45dBi	0dBi	5.32dBi
	5.25GHz		5.80GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-1.4dBi	5.95dBi	-2.16dBi	5.2dBi
YZ平面	-1.87dBi	2.89dBi	-1.06dBi	2.84dBi
XZ平面	0.37dBi	5.92dBi	-1.5dBi	2.59dBi

表 2-3 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 2

	2. 44GHz		4. 9GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-1. 91dBi	2. 68dBi	-1. 54dBi	1. 99dBi
YZ平面	-3. 14dBi	-0. 53dBi	-0. 4dBi	2. 6dBi
XZ平面	-0. 37dBi	1. 72dBi	-2. 78dBi	2. 44dBi
	5. 25GHz		5. 80GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-1. 57dBi	2. 72dBi	-1. 59dBi	2. 04dBi
YZ平面	-0. 07dBi	2. 44dBi	-1. 6dBi	1. 46dBi
XZ平面	-2. 16dBi	2. 53dBi	0. 14dBi	4. 26dBi

表 2-4 三方型環狀單極天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 3

	2. 44GHz		4. 9GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-1. 59dBi	3. 56dBi	-2. 92dBi	3. 5dBi
YZ平面	-3. 01dBi	-0. 11dBi	-1. 39dBi	0. 92dBi
XZ平面	-1. 09dBi	2. 28dBi	-1. 45dBi	6. 11dBi
	5. 25GHz		5. 80GHz	
	平均增益	峰值增益	平均增益	峰值增益
XY平面	-2. 46dBi	3. 45dBi	-2. 67dBi	3. 09dBi
YZ平面	-0. 09dBi	4. 37dBi	-1. 39dBi	1. 27dBi
XZ平面	-1. 68dBi	4. 91dBi	-1. 84dBi	4. 31dBi

### 第三章 四天線置於無線網路卡前端之應用

本章一開始介紹數種不同餌入方式的 MIMO 天線系統，由上一章的量測結果得知方形環狀天線在頻寬和場型增益上皆有不錯的特性，所以其中兩支天線還是維持方形環狀單極天線的設計，另外兩支天線則可使用倒 F (inverted-F antenna) 天線、單極天線 (monopole antenna)、晶片天線 (chip antenna)、平面倒 F 型 (planar inverted-F antenna) 天線等架構，且此系統最大的問題就是天線間信號干擾的問題，除了造成先前提到信號處理的問題，還有增益降低的問題，這會在本章第二節做詳細的討論。第三節會討論天線 2 和天線 3 增益為何會降低，最後在第三節做討論和總結。

#### 3.1 四雙頻小型天線置於無線網路卡前端的基本架構



第一小節會先介紹整合四多頻小型天線的基本架構和其優缺點，圖 3.1.1 為天線餌入的架構示意圖，天線旁所標示的 1、2、3、4，代表天線 1 到天線 4，圖 3.1.1 (a) 為四天線同向餌入的架構，此架構的優點是四天線可以整合在更緊密的面積上，缺點是天線 1 和天線 2、天線 3 和天線 4 間的信號干擾量會達到約 -7dB，天線 2 和天線 3 間的信號干擾量達到接近 -6.5dB，且沒空間放置共振器或是降低互阻的電路，3.1.1 (b) 為天線 1 和天線 4 的餌入方式垂直天線 2 和天線 3，此架構的優點是天線 2 和天線 3 在 2.4GHz 頻段的信號干擾量可以降低到 -10dB 以下，且天線 1 和天線 2 間的信號干擾可以放置共振結構或電路來解決信號干擾的問題，缺點是佔用較大的面積，且天線 1 和天線 2、天線 3 和天線 4 間的信號干擾量會達到約 -5dB，3.1.1 (c) 為天線 2 和天線 3 餌入方式和天線 1 與天線 4 夾一個銳角 30 度到 45 度餌入，此架構的優點是天線 2 和天線 3 餌入方向大略成垂直，但模擬和量測後發現天線間的信號干擾可能會由接地金屬的電流造成，或是輐射的電磁場在空間中造成的信號干擾，且天線 1 和天線 2 之間、天線 3 和天

線 4 之間信號干擾量會達到約-6.5dB，且切角餌入佔用的面積較大，天線 1 和天線 2、天線 3 和天線 4、天線 2 和天線 3 間必須放置共振器和降低互阻的電路，

3.1.1 (d) 餌入方式和架構 (b) 相反，此架構的優點較少，天線若是靠接地金屬太近的話，所產生的感應電流較大且和天線上的餌入電流反向，所以一般設計天線都會離接地金屬遠一點讓感應電流較小，天線 1 和天線 4 就會有離接地金屬太近的問題，若要克服此問題就要將天線 1 和天線 4 佔用的高度增加，但我們能用的面積高度最多到 28mm，這將會佔用太多的面積，所以這個架構並不採用，3.1.1 (e) 的架構有架構 (a) 和架構 (b) 的優缺點，這裡所提到的優缺點整理於表 3-1，3-2。其它餌入的方式可由上述的幾種架構裡面挑一兩種餌入方式去組合，優缺點在前面已詳述。實際天線設計時可能不會將天線擺置地如此對稱，視設計是否需要將其中一支天線的增益提高或是其他需要做調整。

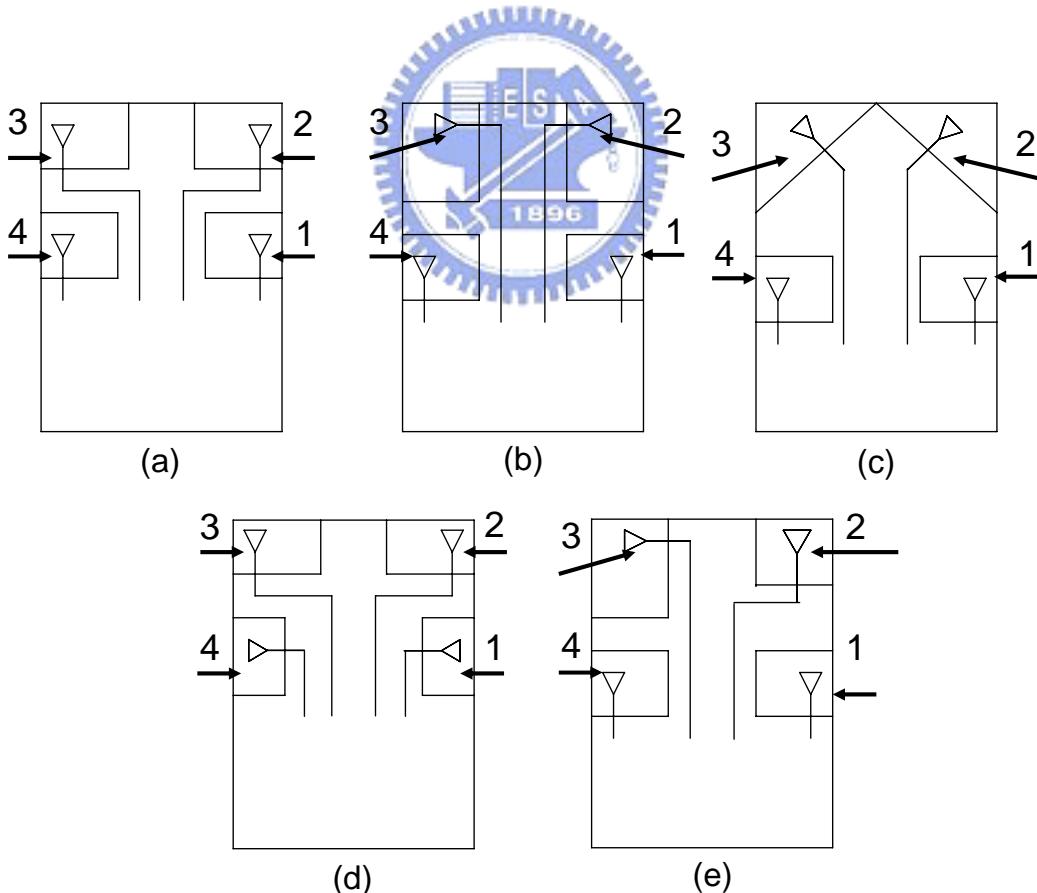


圖 3.1.1 四多頻小型天線整合為 MIMO 天線系統設計架構圖 (a) 四天線同向餌入架構 (b) 兩兩垂直餌入架構 (c) 天線 2 及天線 3 和天線 1 及天線 4 夾 30 度到 45 度角餌入架構 (d) 第二種兩兩垂直餌入架構 (e) 混合餌入架構

接下來的 3.2 節會一一介紹應用上述架構的天線系統設計，模擬和量測結果會在 3.2 節和 3.3 節詳細敘述，本章天線因結構複雜，在此我們只呈現天線的架構圖，各尺寸參數我們忽略不介紹。本章節中所有天線架構使用的板材皆為 FR4 (PCB 板材質： $\varepsilon_r = 4.4$ ，loss tangent=0.02)，板材厚度為 0.8mm。

表 3-1 架構 (a) 到架構 (c) 的優缺點比較

架構	(a)	(b)	(c)
優點	面積小	天線 2 和天線 3 干擾低，天線 1 和天線 2 間可放置降低干擾結構	天線 2 和天線 3 餽入呈垂直。
缺點	沒空間放置共振結構或是降低干擾的電路。	天線 1 和天線 2 干擾高，面積大。	天線 1 和天線 2、天線 2 和天線 3、天線 3 和天線 4 間必須放置降低干擾結構，面積大。

表 3-2 架構 (d) 到架構 (e) 的優缺點比較

架構	(d)	(e)
優點	較少	綜合 (a) 和 (b) 優點
缺點	天線 1 和天線 4 佔用面積大	綜合 (a) 和 (b) 缺點

## 3.2 整合四天線於無線網路卡前端之應用

### 3.2.1 使用四同向饋入 (架構 (a)) 的 MIMO 天線系統

上一節已經介紹過 3 種天線實現的架構，這裡我們要討論使用第一種架構的天線，這架構主要是四支同向饋入的天線構成。這裡我們列舉 2 支天線說明，第

一個天線系統是由四支單極天線所構成，圖 3.2.1 為此天線系統的結構圖，面積為  $48\text{mm} \times 24\text{mm}$ ，佔用的面積很小，天線 1 和天線 4 維持方形環狀單極天線，天線 2 和天線 3 為 T 形天線，天線 1 和天線 4 在第二章已經介紹過，T 形天線主要設計是利用兩條不同的電流路徑造成共振，以達到雙頻的效果，圖 3.2.2 (a) 為模擬和量測的反射損耗圖，圖 3.2.2 (b) 和圖 3.2.2 (c) 為模擬和量測的信號干擾量圖，可以看到天線最高的耦合量約為  $-7\text{dB}$ ，信號干擾量高是因為天線 2 輻射時接地金屬上的電流路徑太短，感應電流流到天線 3 附近，天線 1 和天線 2 距離很近，且此設計在  $5\text{GHz}$  的頻段匹配上，T 形天線的頻寬較差無法滿足設計的需求。

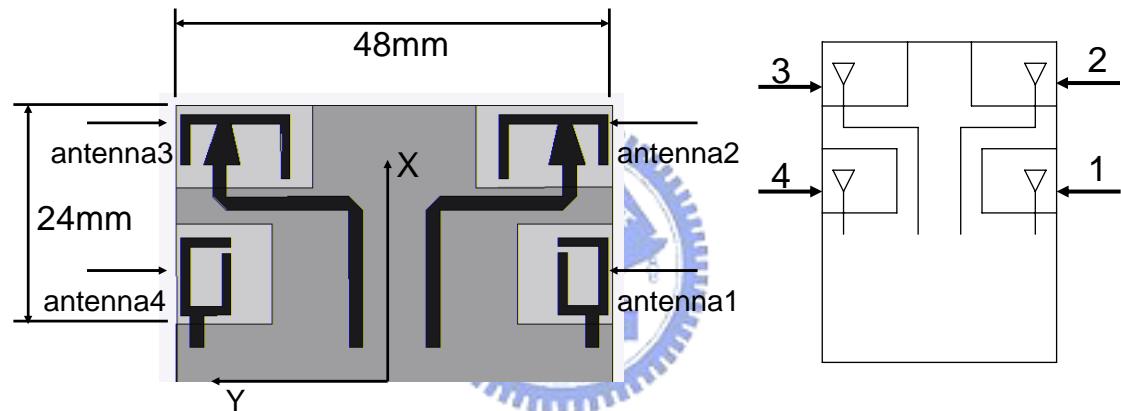
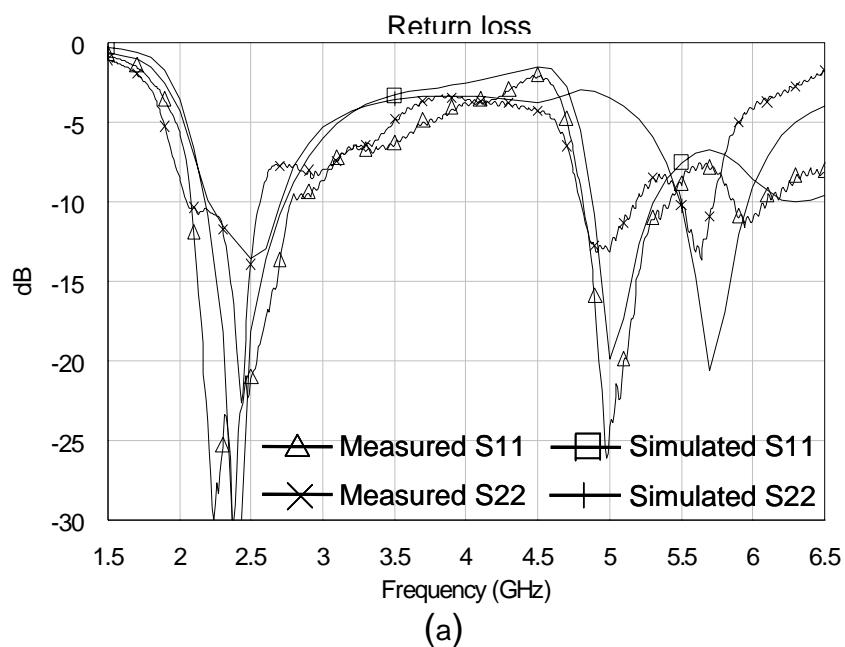
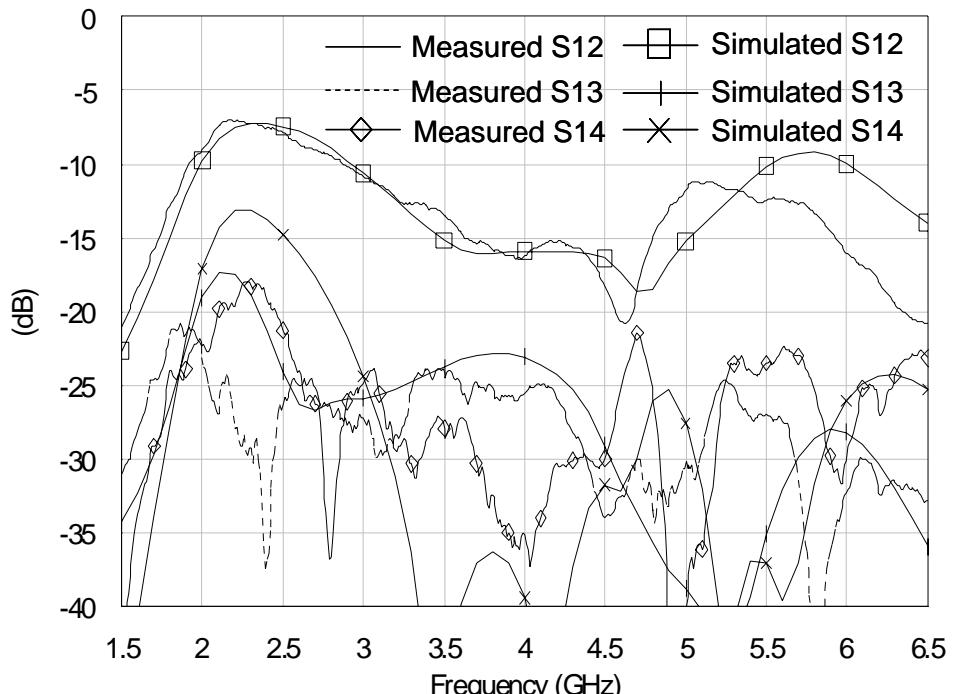


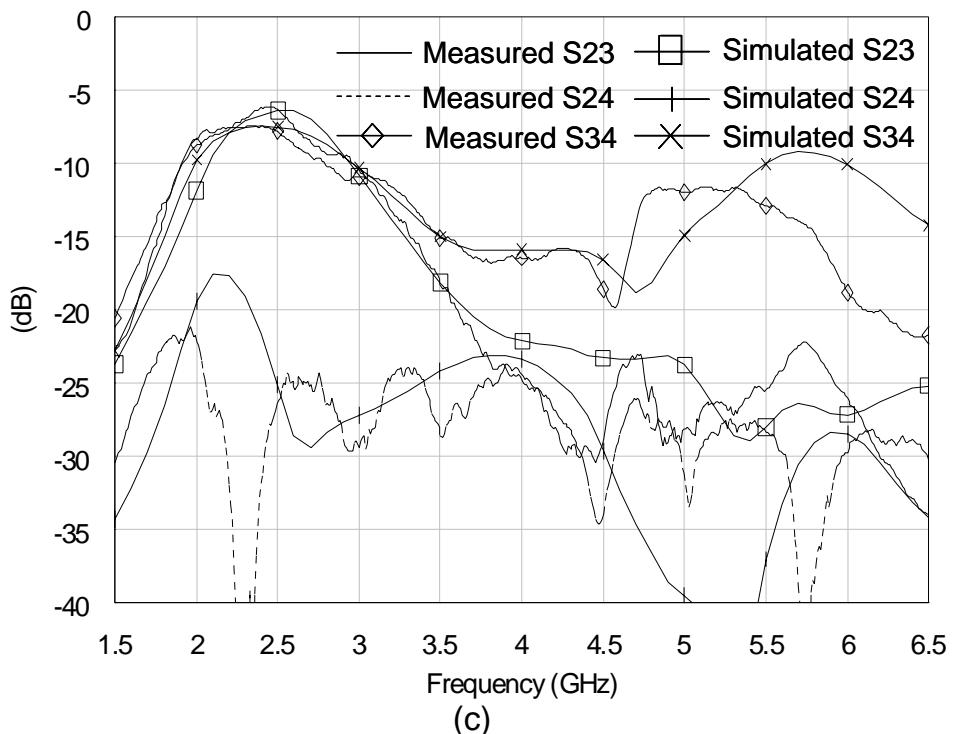
圖 3.2.1 使用架構 (a) 四單極天線系統結構圖



(a)



(b)



(c)

圖 3.2.2 模擬和量測的反射損耗和信號干擾量圖 (a)反射損耗圖, (b) 信號干擾量圖 1, (c) 信號干擾量圖 2

圖 3.2.3 到 3.2.8 為量測的輻射場形圖，可以看到天線 2 和天線 3 在 2.4GHz 皆有增益太低的問題，天線設計為 T 形是為了增加橫向電流，讓輻射場型更接近全向性，但在 5GHz 的頻段再 XY 平面和 XZ 平面輻射場型的互補效果不錯，

表 3-3 到表 3-4 為量測的場型數據。

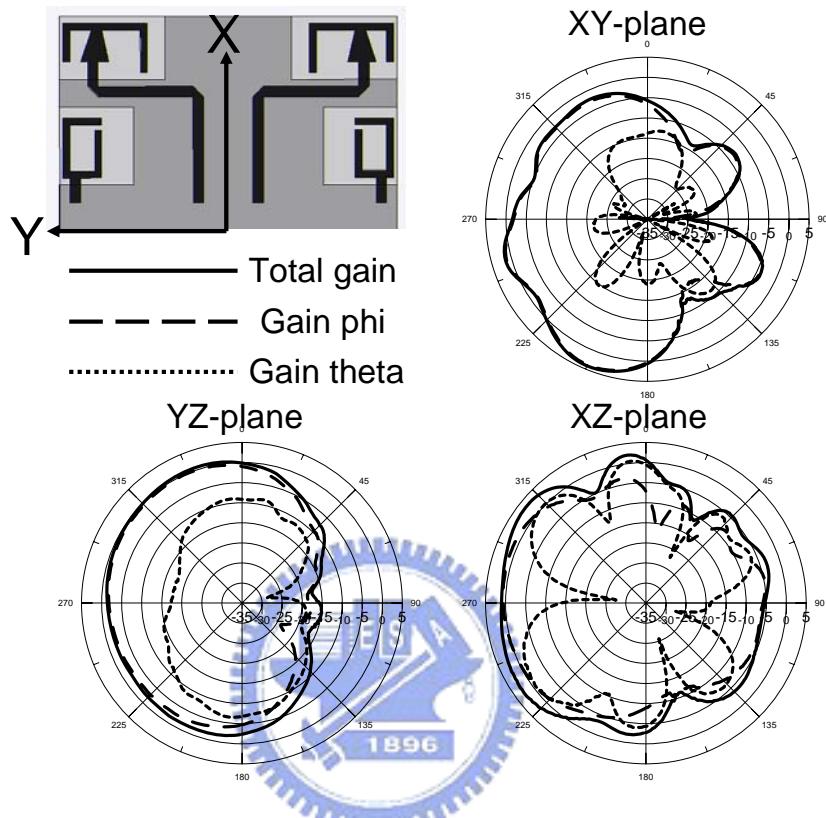


圖 3.2.3 天線 1 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

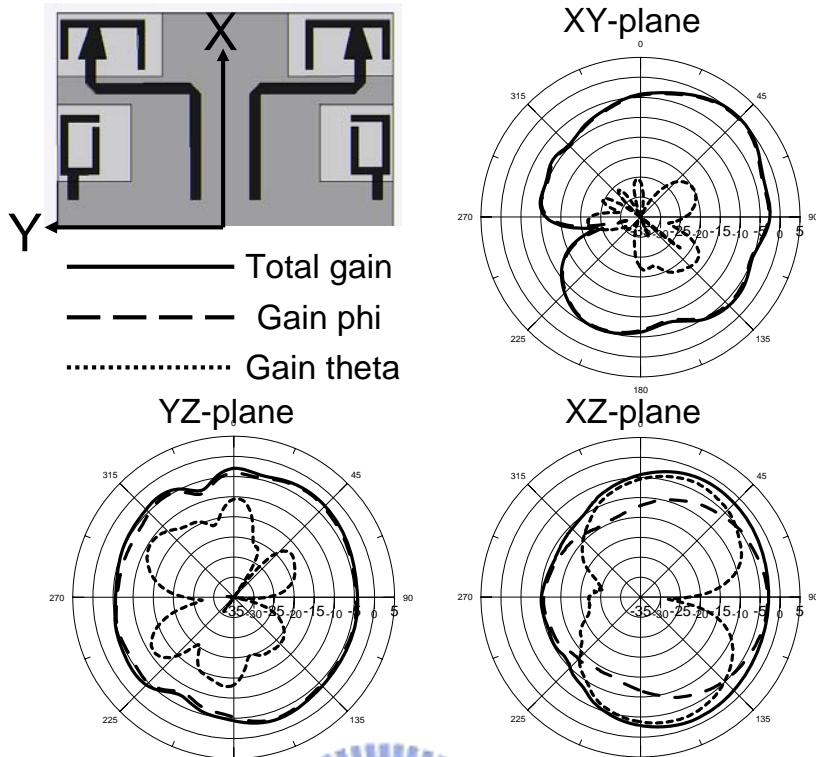


圖 3.2.4 天線 2 於 2.44GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

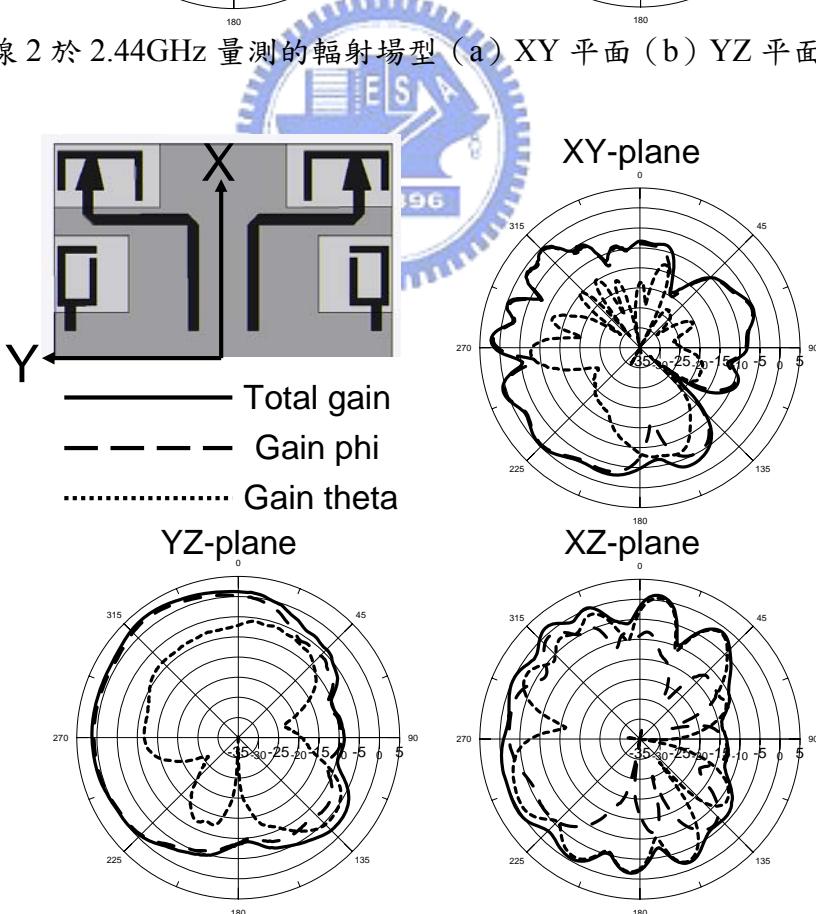


圖 3.2.5 天線 1 於 5GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

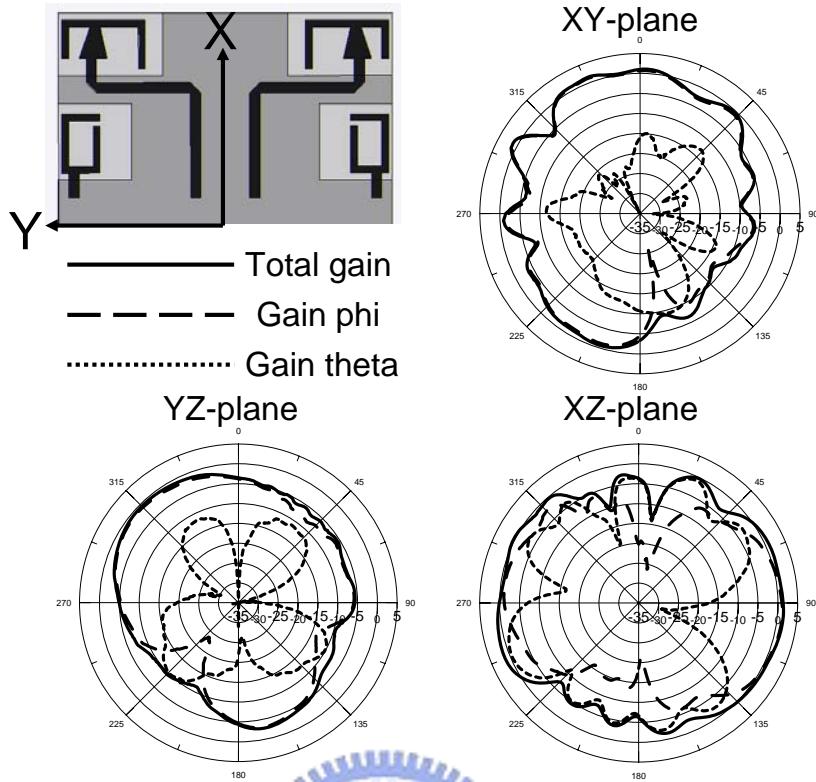


圖 3.2.6 天線 2 於 5GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

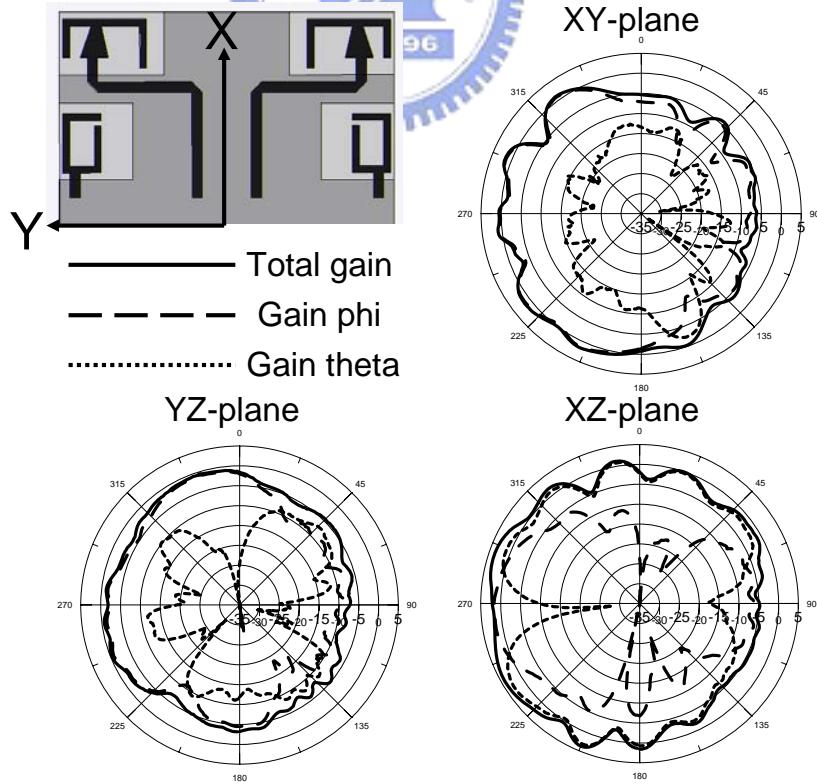


圖 3.2.7 天線 1 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

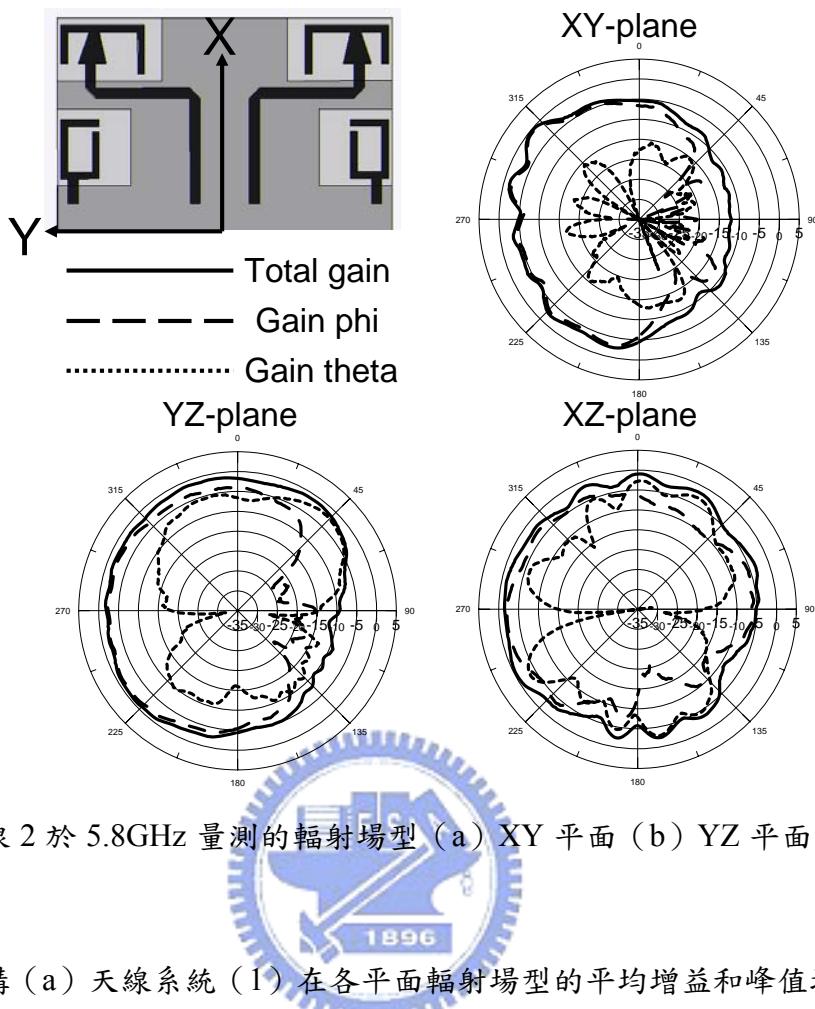


圖 3.2.8 天線 2 於 5.8GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

表 3-3 架構 (a) 天線系統 (1) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：  
天線 1

	2.44GHz	5GHz	5.8GHz
XY 平面	平均增益： -2.36dBi 峰值增益： 4.15dBi	平均增益： -4.05dBi 峰值增益： 2.24dBi	平均增益： -1.82dBi 峰值增益： 1.75dBi
YZ 平面	平均增益： -2.79dBi 峰值增益： 0.68dBi	平均增益： -1.12dBi 峰值增益： 2.84dBi	平均增益： -3.56dBi 峰值增益： -0.28dBi
XZ 平面	平均增益： -0.95dBi 峰值增益： 3.33dBi	平均增益： -2.52dBi 峰值增益： 1.49dBi	平均增益： 0.23dBi 峰值增益： 4.12dBi

表 3-4 架構 (a) 天線系統 (1) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：

天線 2

	2.44GHz	5GHz	5.8GHz
XY 平面	平均增益： -4.72dBi 峰值增益： 0.109dBi	平均增益： -2.57dBi 峰值增益： 1.46dBi	平均增益： -5.19dBi 峰值增益： -0.28dBi
YZ 平面	平均增益： -4.24dBi 峰值增益： -1.47dBi	平均增益： -4.49dBi 峰值增益： -0.54dBi	平均增益： -2.94dBi 峰值增益： -0.66dBi
XZ 平面	平均增益： -4.21dBi 峰值增益： -2.81dBi	平均增益： -1.04dBi 峰值增益： 1.54dBi	平均增益： -3.08dBi 峰值增益： -0.37dBi

接下來要介紹使用 2 支方形環狀天線和 2 支單極天線耦合方形共振環天線的系統，如圖 3.2.9，面積為 48mmx25mm，天線 2 和天線 3 為一倒 L 形單極天線耦合至一開路共振環的天線，倒 L 形單極天線主要負責 5GHz 頻段的輻射，開路共振環負責 2.4GHz 頻段的輻射，圖 3.2.10 (a) 為量測的反射損耗圖，圖 3.2.10 (b) 和 (c) 為量測的信號干擾量圖，可以看到天線 2 和天線 3 的信號干擾量高達 -5.2dB，天線 1 和天線 2、天線 3 和天線 4 分別高達 -8.7dB。由圖 3.2.9 我們觀察到天線 2 和天線 3 間挖了狹槽，感應電流路徑加長仍有信號干擾的問題，表示信號仍有從空間輻射互相耦合的問題，圖 3.2.11 到 3.2.18 為量測的輻射場形，這裡天線 2 和天線 3 仍有增益太低的問題。表 3-5 到表 3-8 為量測的場型數據。

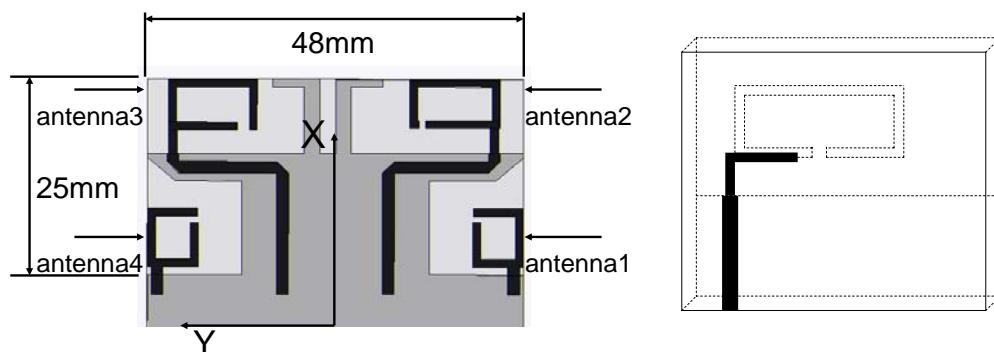
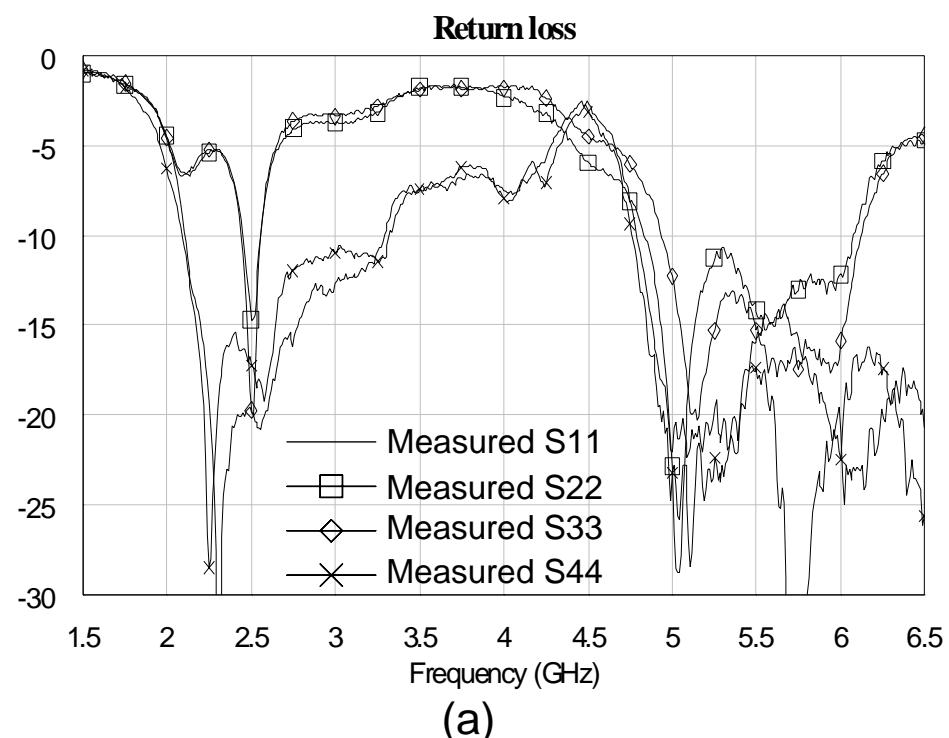
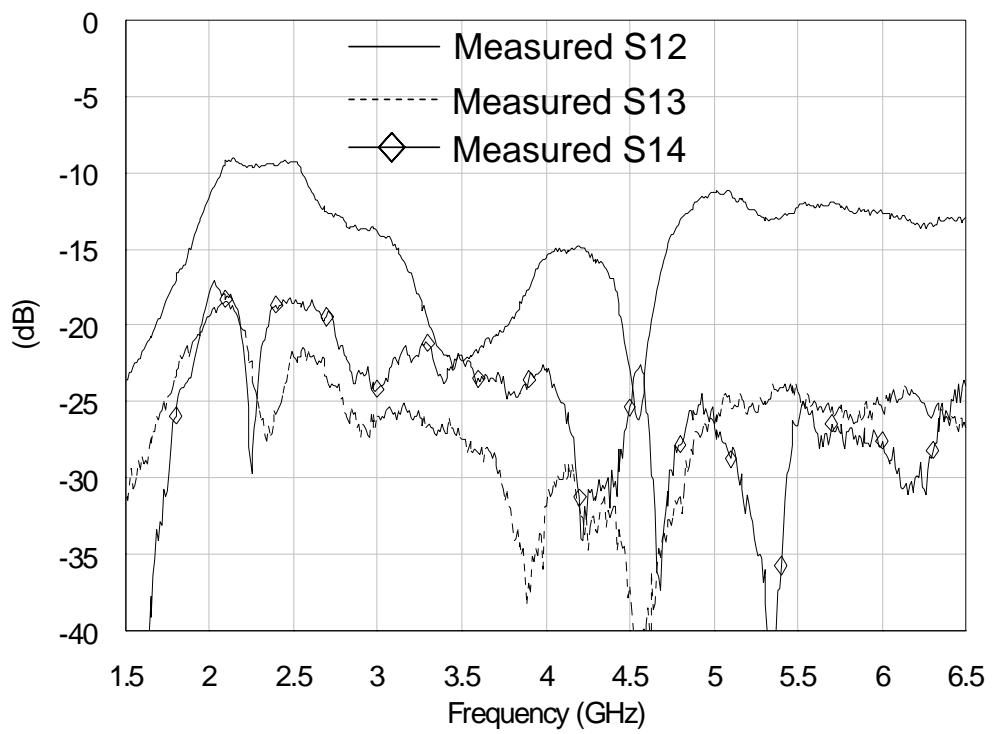
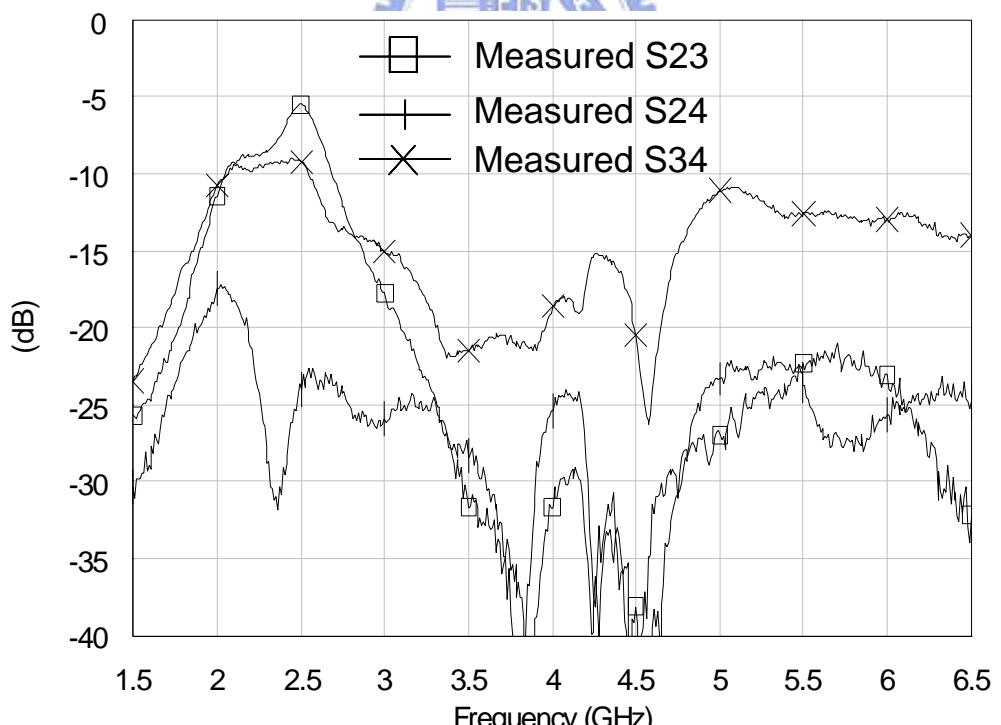


圖 3.2.9 使用架構 (a) 2 支方形環狀天線和 2 支單極天線耦合方形共振環天線結構圖





(b)



(c)

圖 3.2.10 2 支方形環狀天線和 2 支單極天線耦合方形共振環天線系統量測的(a)  
反射損耗圖 (b) 信號干擾量圖 1 (c) 信號干擾量圖 2

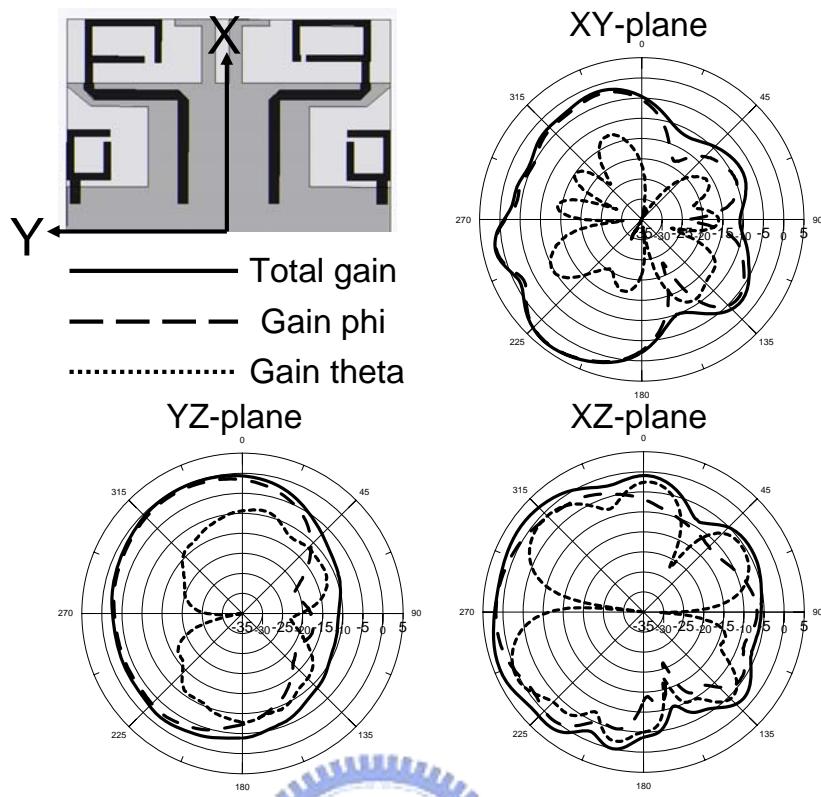


圖 3.2.11 天線 1 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

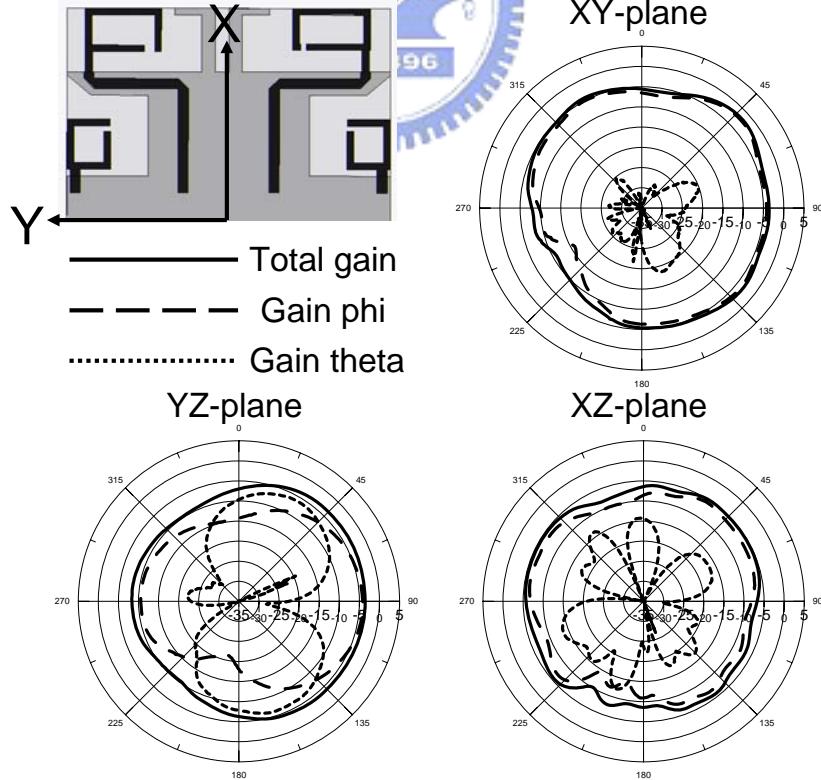


圖 3.2.12 天線 2 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

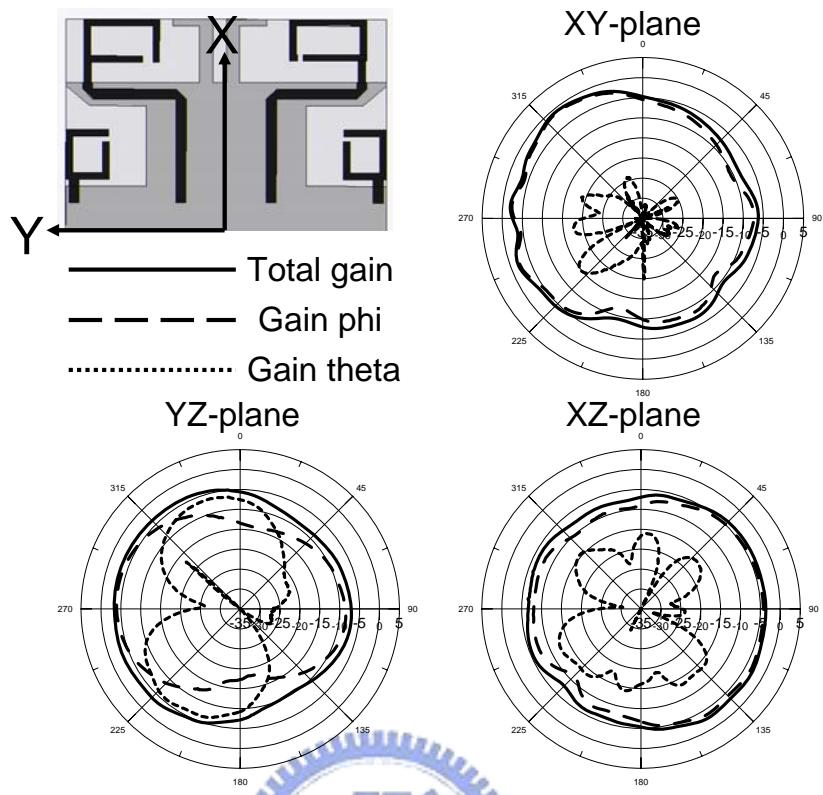


圖 3.2.13 天線 3 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

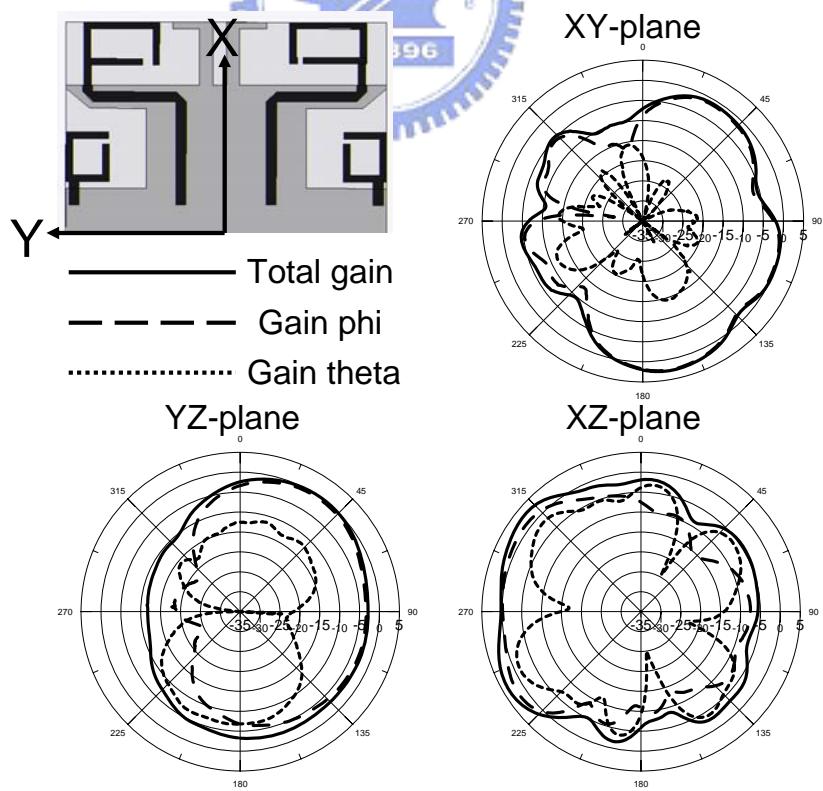


圖 3.2.14 天線 4 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

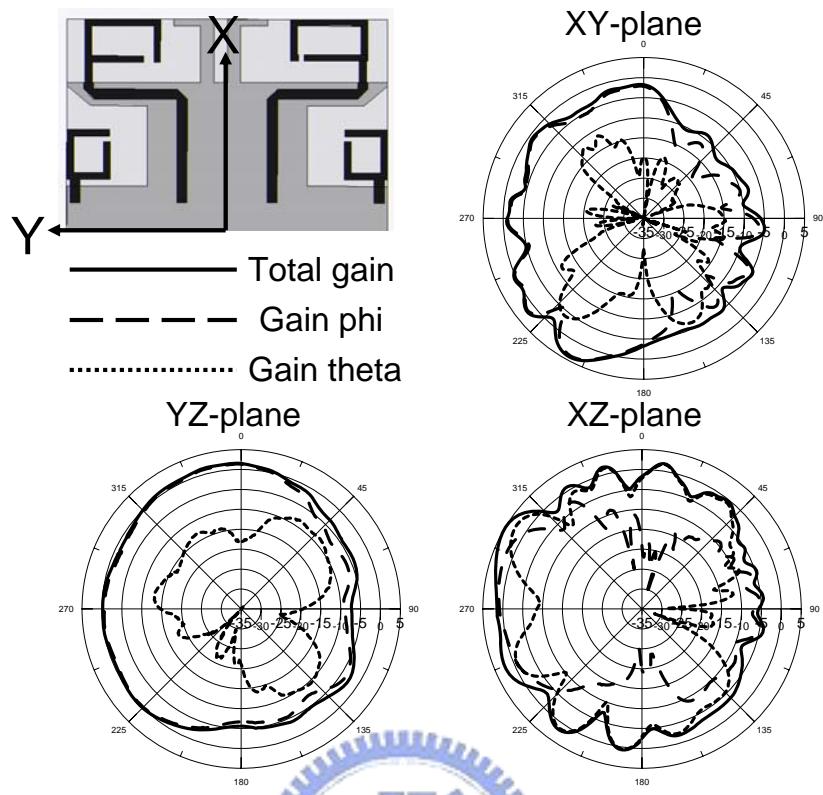


圖 3.2.15 天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

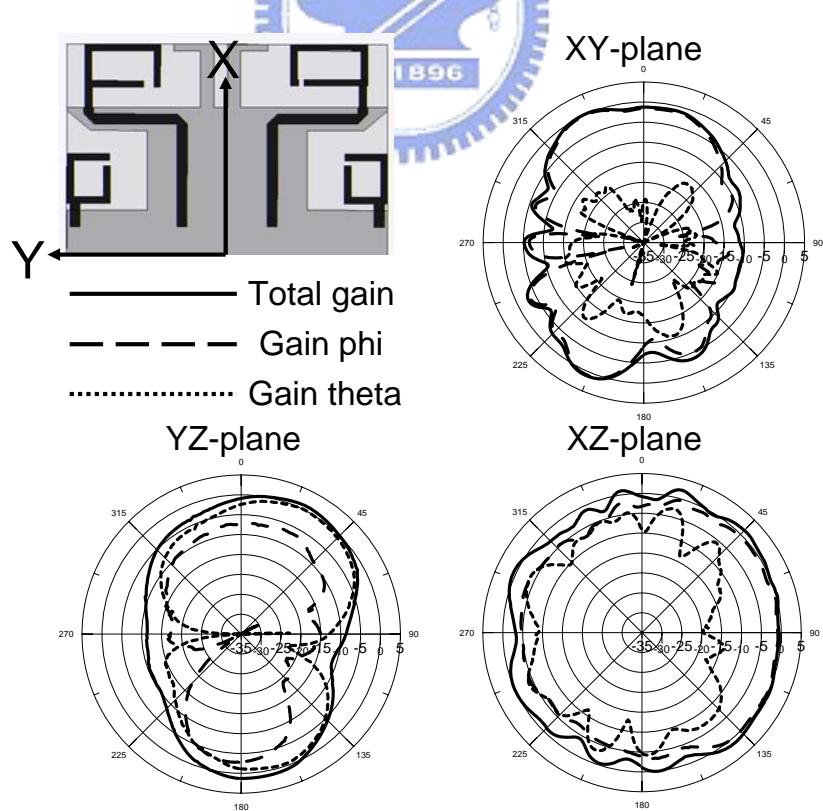


圖 3.2.16 天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

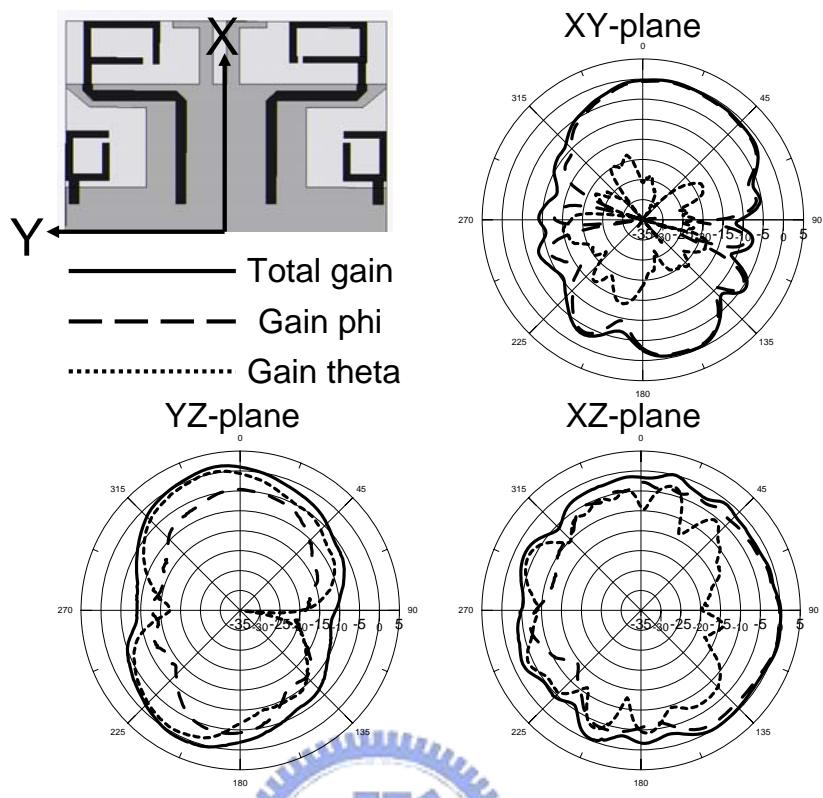


圖 3.2.17 天線 3 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

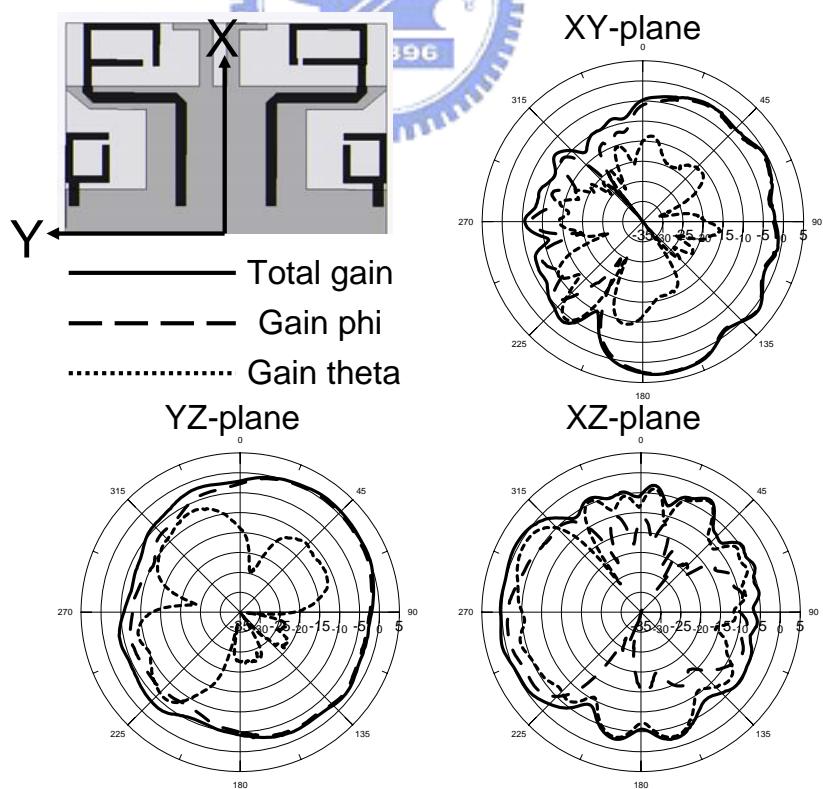


圖 3.2.18 天線 4 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

表 3-5 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：  
天線 1

	2.44GHz	5.2GHz
XY 平面	平均增益：-2.26dBi 峰值增益：3.65dBi	平均增益：-2.63dBi 峰值增益：4.12dBi
YZ 平面	平均增益：-3.38dBi 峰值增益：-0.14dBi	平均增益：-1.53dBi 峰值增益：1.63dBi
XZ 平面	平均增益：-0.75dBi 峰值增益：3.52dBi	平均增益：-0.48dBi 峰值增益：4.97dBi

表 3-6 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：  
天線 2

	2.44GHz	5.2GHz
XY 平面	平均增益：-4.91dBi 峰值增益：-1.89dBi	平均增益：-3.87dBi 峰值增益：1.11dBi
YZ 平面	平均增益：-5.8dBi 峰值增益：-3.38dBi	平均增益：-2.81dBi 峰值增益：1.31dBi
XZ 平面	平均增益：-6.36dBi 峰值增益：-4.88dBi	平均增益：-0.46dBi 峰值增益：2.18dBi

表 3-7 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天  
線 3

	2.44GHz	5.2GHz
XY 平面	平均增益：-4.7dBi 峰值增益：-0.78dBi	平均增益：-3.75dBi 峰值增益：0.12dBi
YZ 平面	平均增益：-5.53dBi 峰值增益：-3.21dBi	平均增益：-2.88dBi 峰值增益：1.62dBi
XZ 平面	平均增益：-5.08dBi 峰值增益：-2.82dBi	平均增益：-1.87dBi 峰值增益：0.47dBi

表 3-8 架構 (a) 天線系統 (2) 在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 4

	2.44GHz	5.2GHz
XY 平面	平均增益：-2.33dBi 峰值增益：2.78dBi	平均增益：-2.13dBi 峰值增益：3.21dBi
YZ 平面	平均增益：-3.74dBi 峰值增益：0.08dBi	平均增益：-2.36dBi 峰值增益：0.92dBi
XZ 平面	平均增益：-1.21dBi 峰值增益：3.59dBi	平均增益：-2.96dBi 峰值增益：0.93dBi

### 3.2.2 使用架構 (b) 和架構 (c) 的 MIMO 天線系統

接下來我們要介紹使用另外兩種架構的天線系統。圖 3.2.19 是由 4 支方形環狀單極天線構成，天線所佔面積是 48mm×28mm，在此採用環狀單極天線因為先前量測頻寬和增益皆有不錯的表現，接地金屬中間的狹槽是為了阻擋天線在接地金屬上的感應和映像電流流到天線 3 附近造成信號干擾，此狹槽亦可調整天線 2 和天線 3 在 5GHz 頻段的匹配，圖 3.2.20 為此系統架構量測的反射損耗參數和信號干擾量參數，可以看到天線 1 和天線 2、天線 3 和天線 4 間信號干擾量高達 -5dB，圖 3.2.21 到 3.2.24 為量測的輻射場形，此天線架構亦有天線 2 和天線 3 增益太低的問題。表 3-9 到表 3-10 為量測的場型數據。

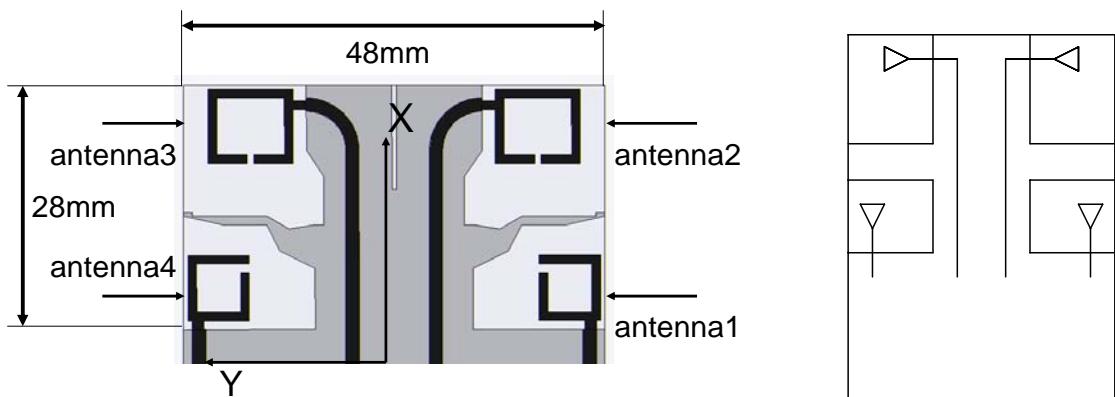


圖 3.2.19 使用架構 ( b ) 4 支方形環狀天線的天線系統

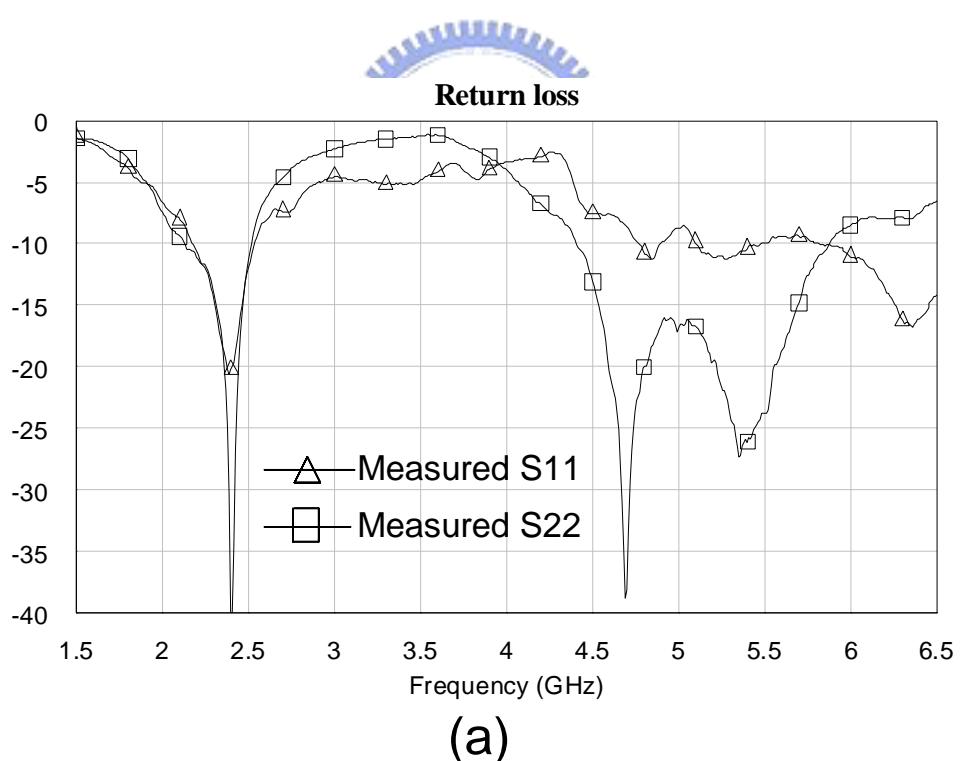


圖 3.2.20 4 支方形環狀天線系統量測的 (a) 反射損耗圖

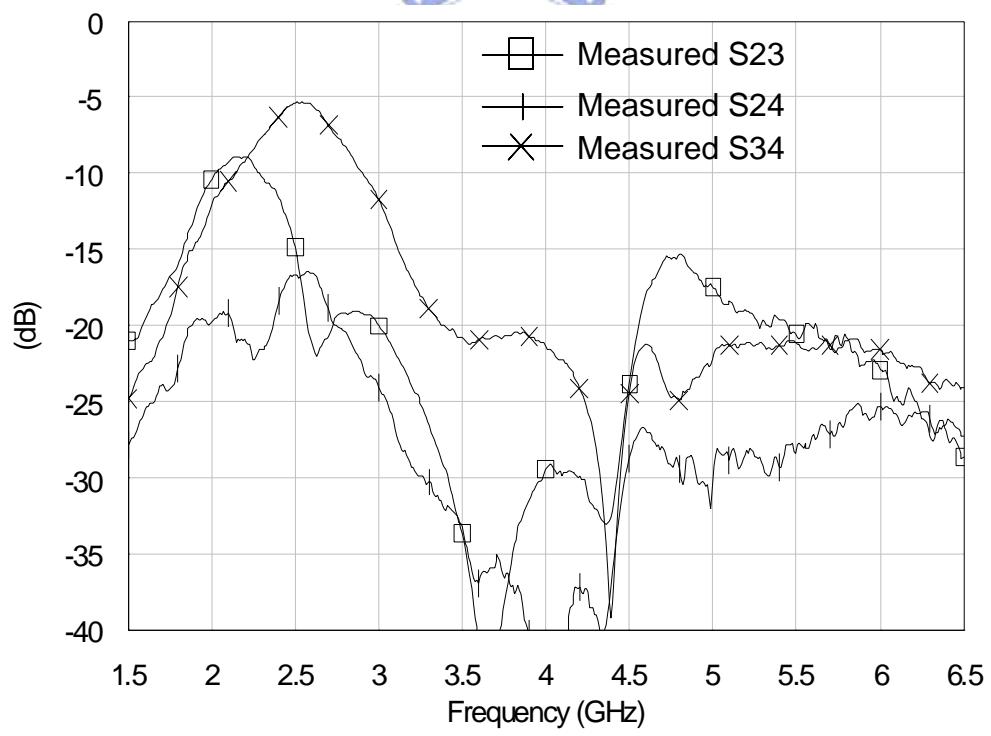
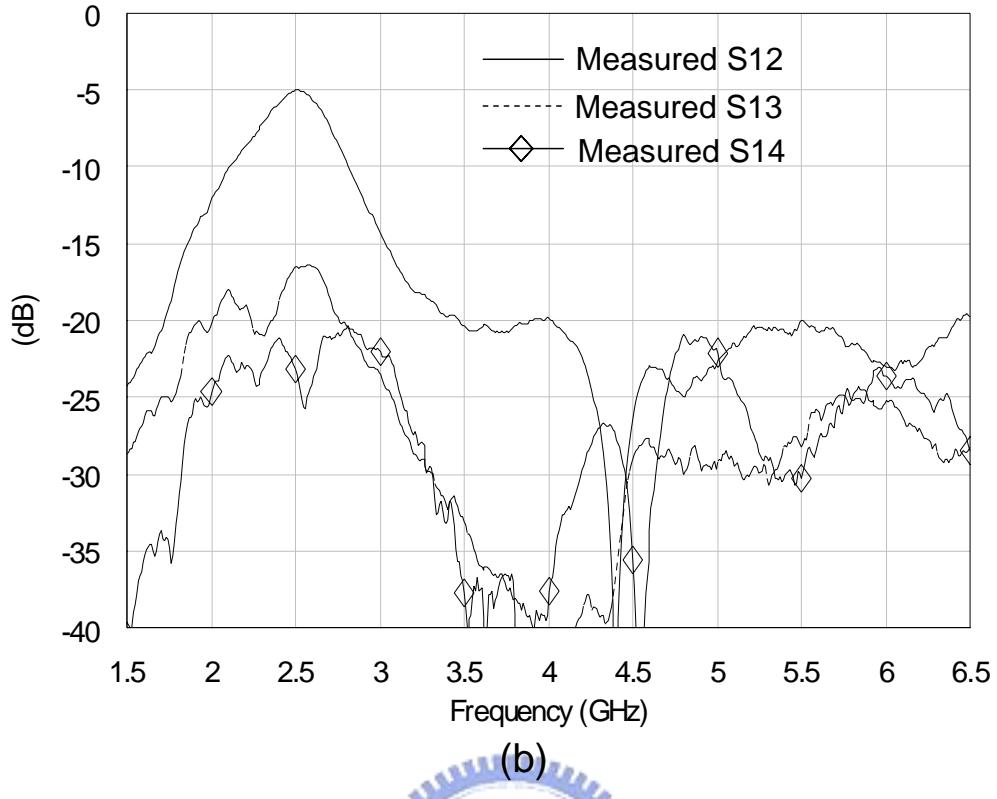


圖 3.2.20 4 支方形環狀天線系統量測的 (a) 反射損耗圖 (b) 信號干擾量圖 1  
 (c) 信號干擾量圖 2

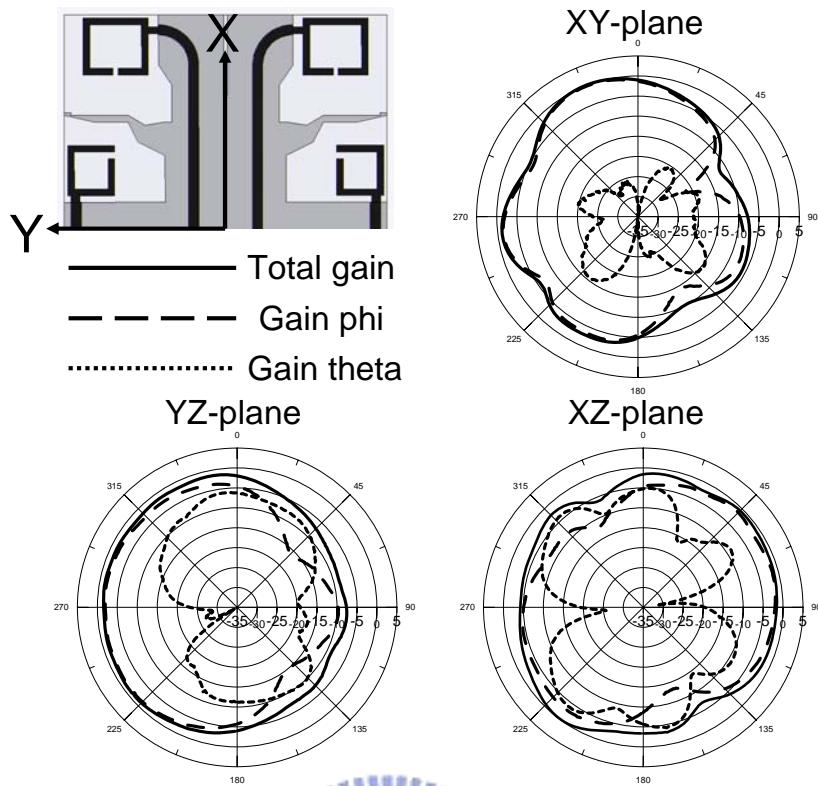


圖 3.2.21 天線 1 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

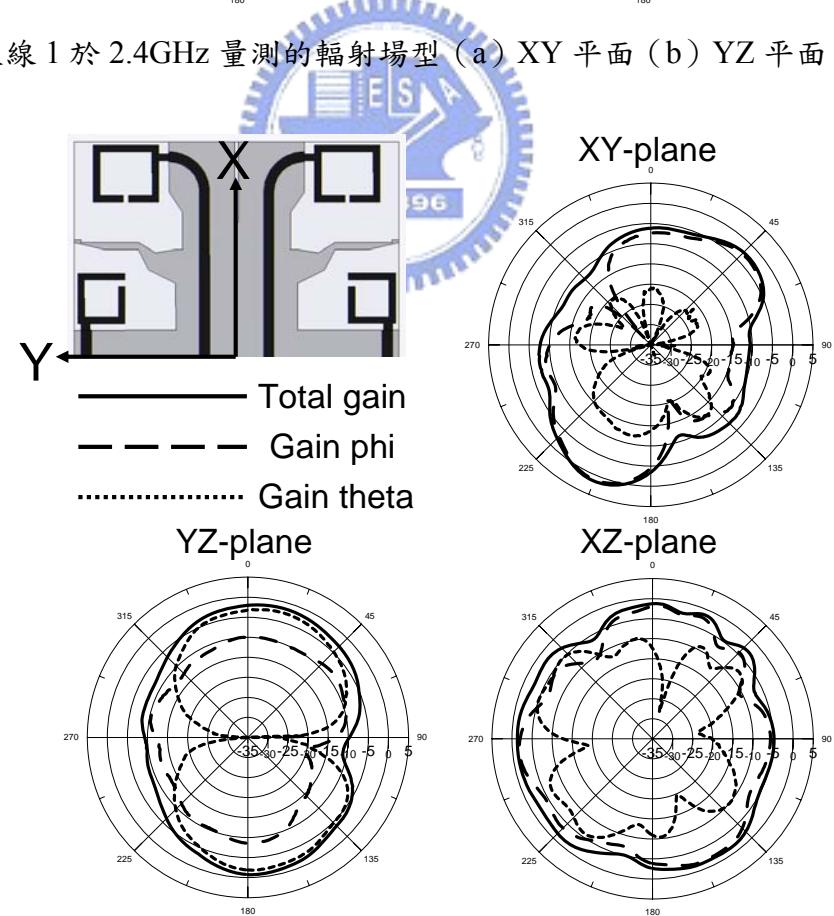


圖 3.2.22 天線 2 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

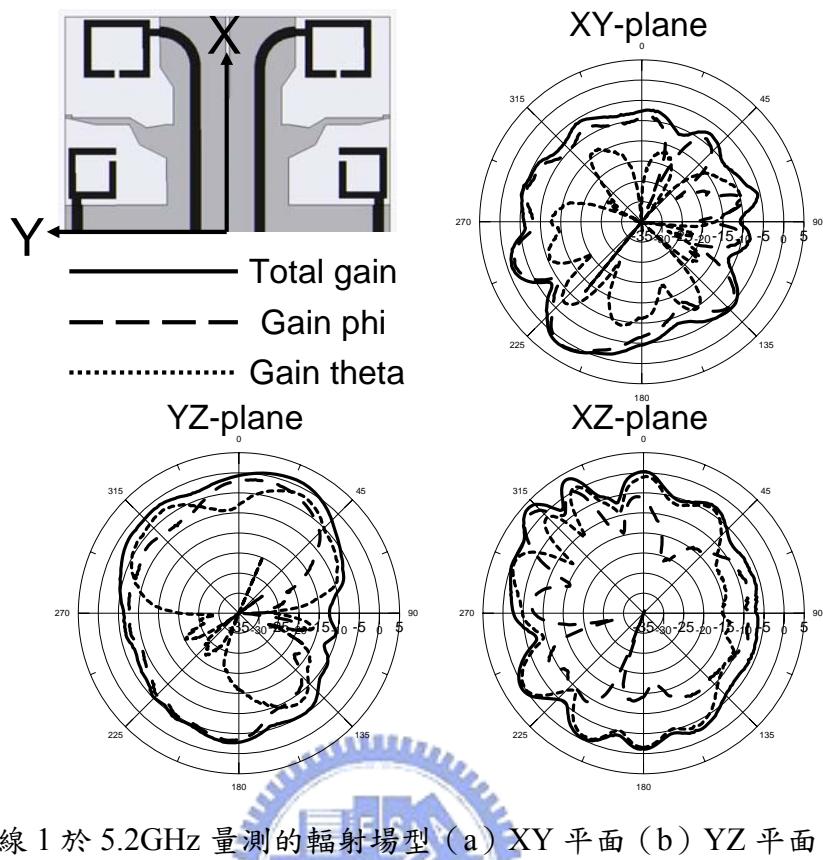


圖 3.2.23 天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

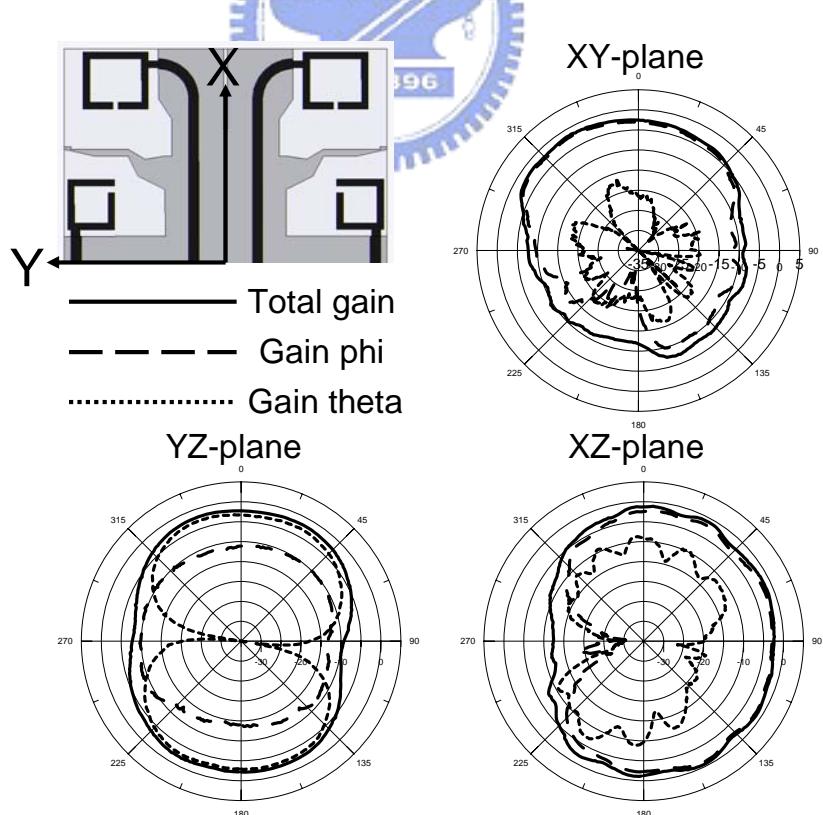


圖 3.2.24 天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

表 3-9 架構 (b) 天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 1

	2.44GHz	5GHz
XY 平面	平均增益：-3.8dBi 峰值增益：0.15dBi	平均增益：-5.02dBi 峰值增益：1.53dBi
YZ 平面	平均增益：-3.39dBi 峰值增益：-0.99dBi	平均增益：-3.66dBi 峰值增益：-1.18dBi
XZ 平面	平均增益：-2.41dBi 峰值增益：-0.08dBi	平均增益：-2.34dBi 峰值增益：3.8dBi

表 3-10 架構 (b) 天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 2

	2.44GHz	5GHz
XY 平面	平均增益：-5.14dBi 峰值增益：1.51dBi	平均增益：-5.57dBi 峰值增益：-1.56dBi
YZ 平面	平均增益：-4.13dBi 峰值增益：-0.71dBi	平均增益：-3.7dBi 峰值增益：-1.91dBi
XZ 平面	平均增益：-2.8dBi 峰值增益：-1.2dBi	平均增益：-2.96dBi 峰值增益：-0.56dBi

接下來我們介紹最後一個天線架構，圖 3.2.25 是由使用架構 (c) 的天線系統結構圖，天線 2 和天線 3 是採用單極天線耦合到雙共振路徑開路共振環的天線，圖 3.3.26 是量測的反射損耗參數和信號干擾量圖，天線 1 和天線 2 天線、3 和天線 4 間信號干擾量達到-6dB，圖 3.2.27 到 3.2.30 為量測的輻射場形。

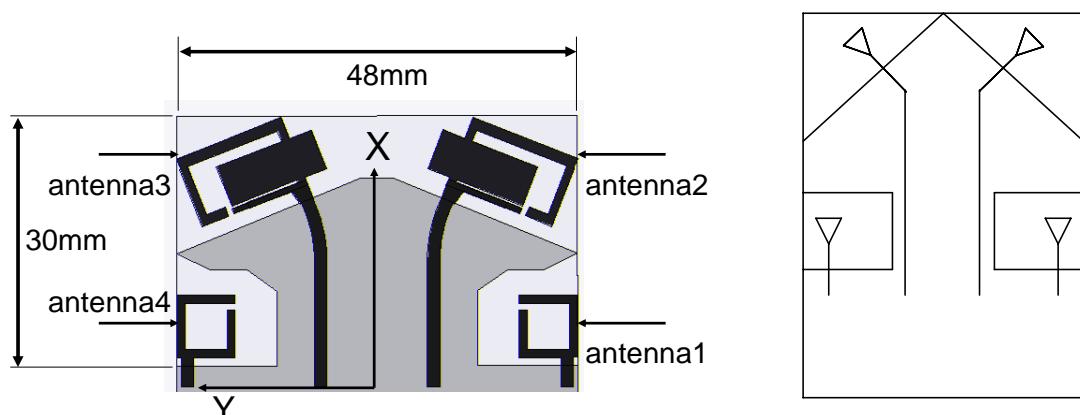
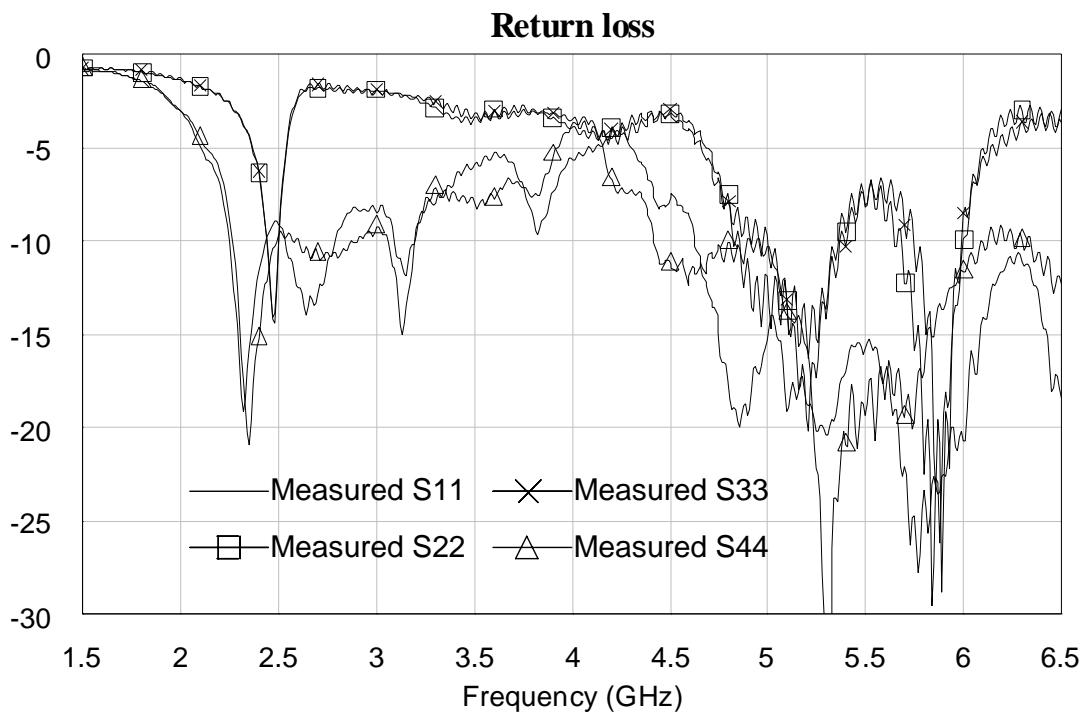
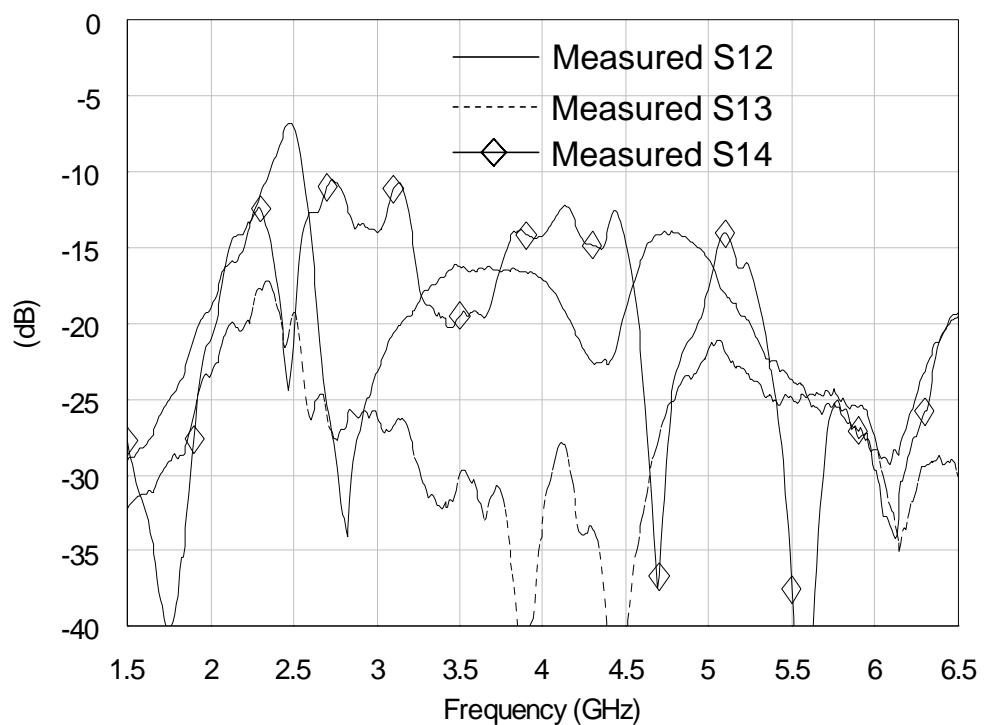


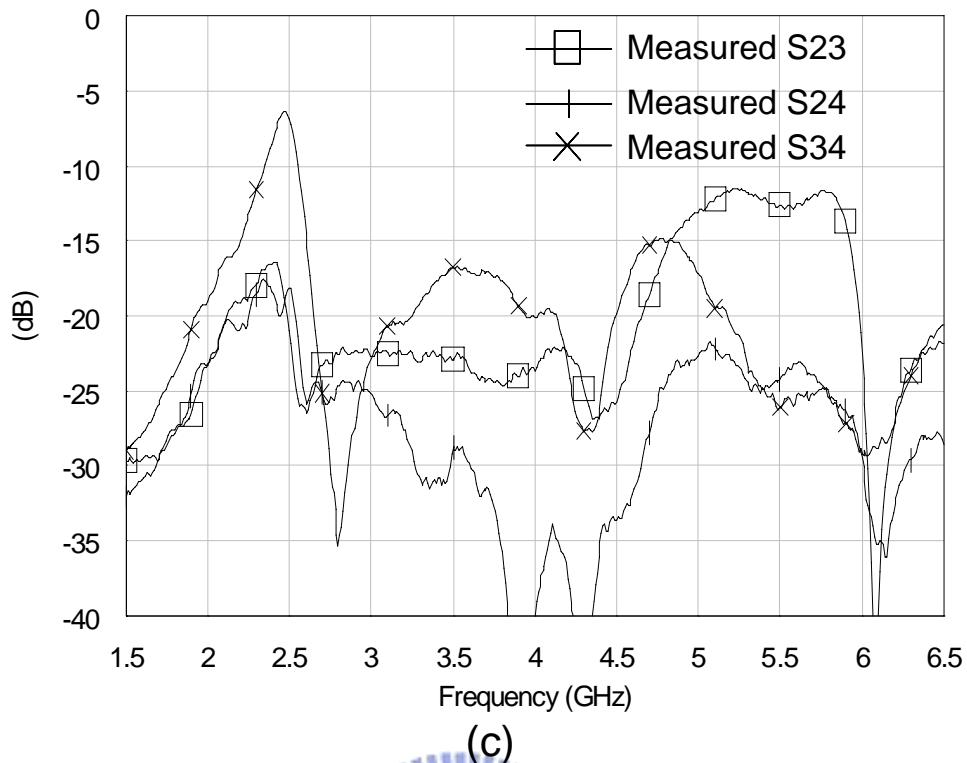
圖 3.2.25 使用架構 (c) 的天線系統



(a)



(b)



(c)

圖 3.2.26 架構 (c) 天線系統量測的 (a) 反射損耗圖 (b) 信號干擾量圖 1 (c)  
信號干擾量圖 2

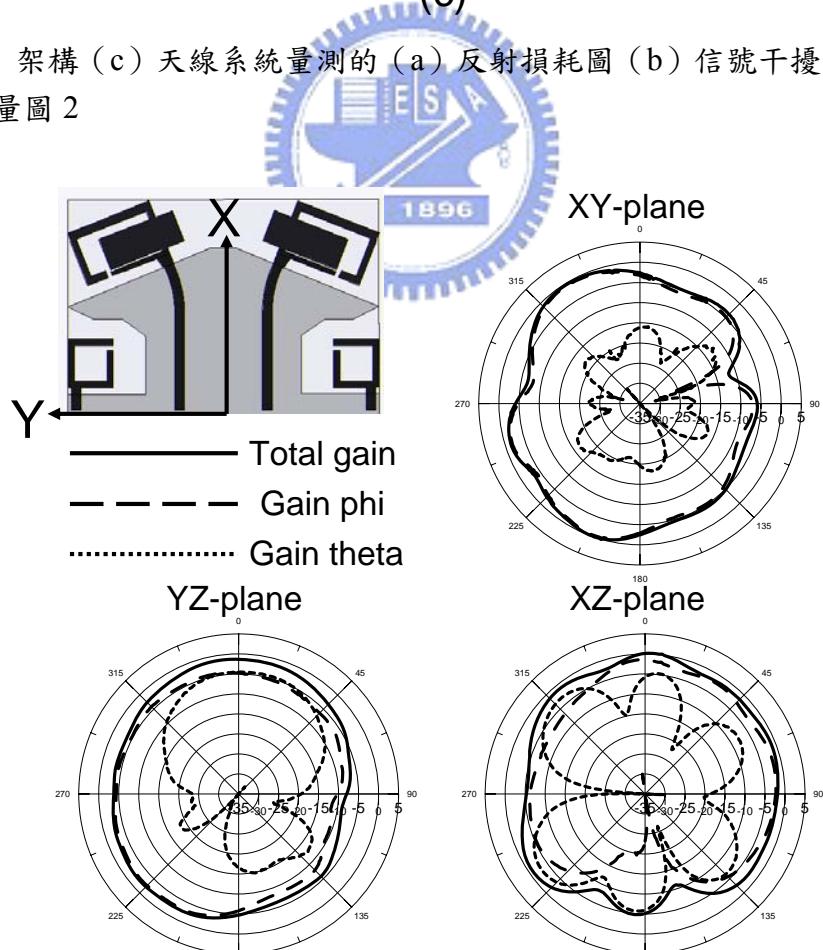


圖 3.2.27 天線 1 於 2.4GHz<sup>80</sup>量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ  
平面

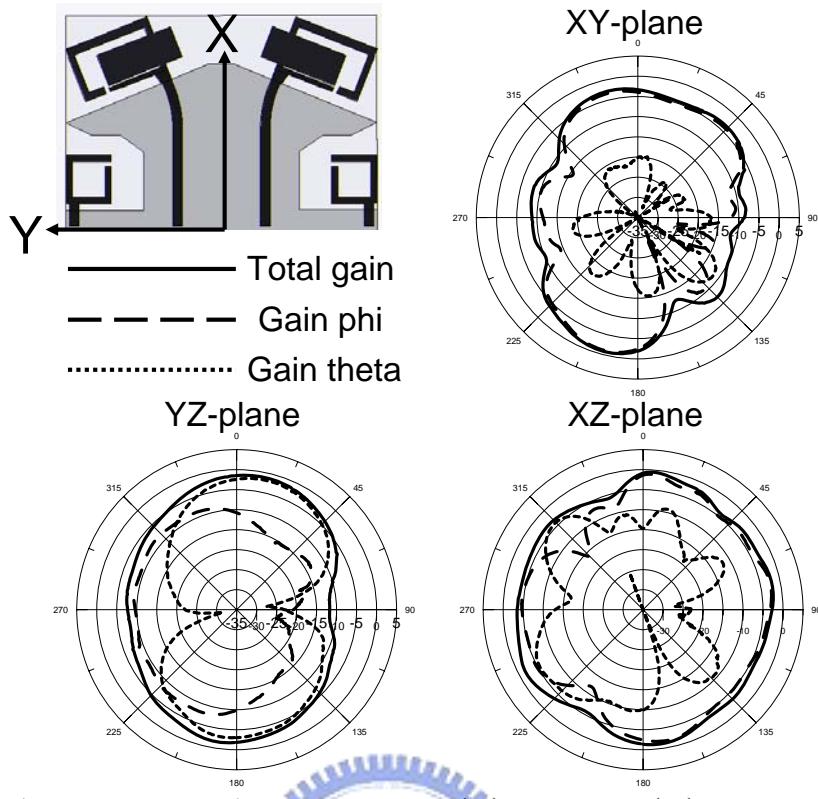


圖 3.2.28 天線 2 於 2.4GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

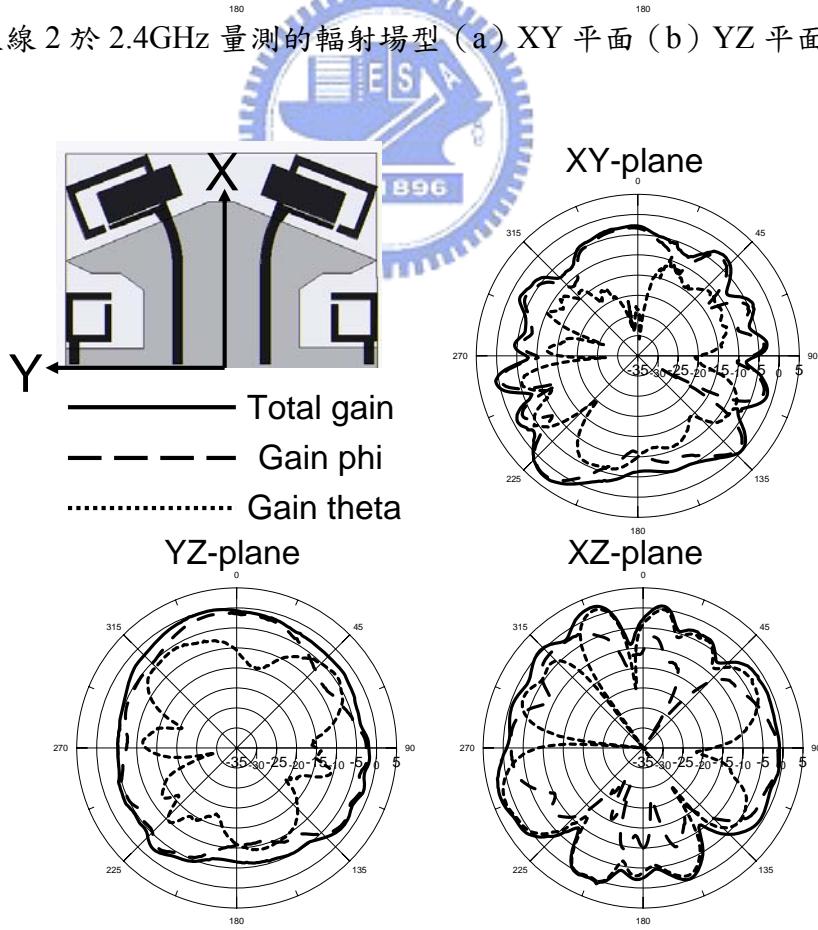


圖 3.2.29 天線 1 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

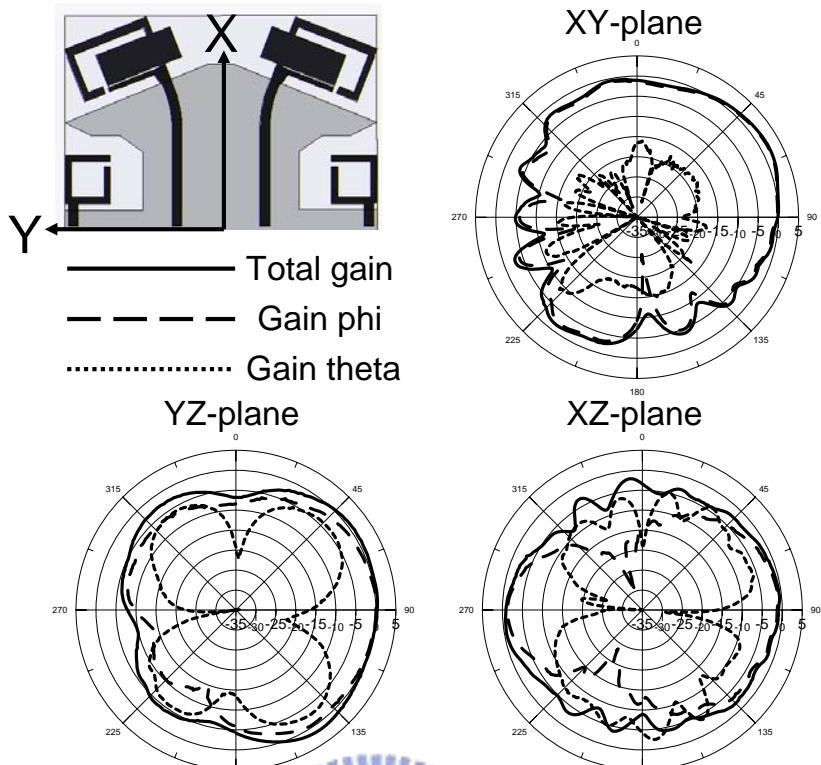


圖 3.2.30 天線 2 於 5.2GHz 量測的輻射場型 (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面



表 3-11 架構 (c) 天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 1

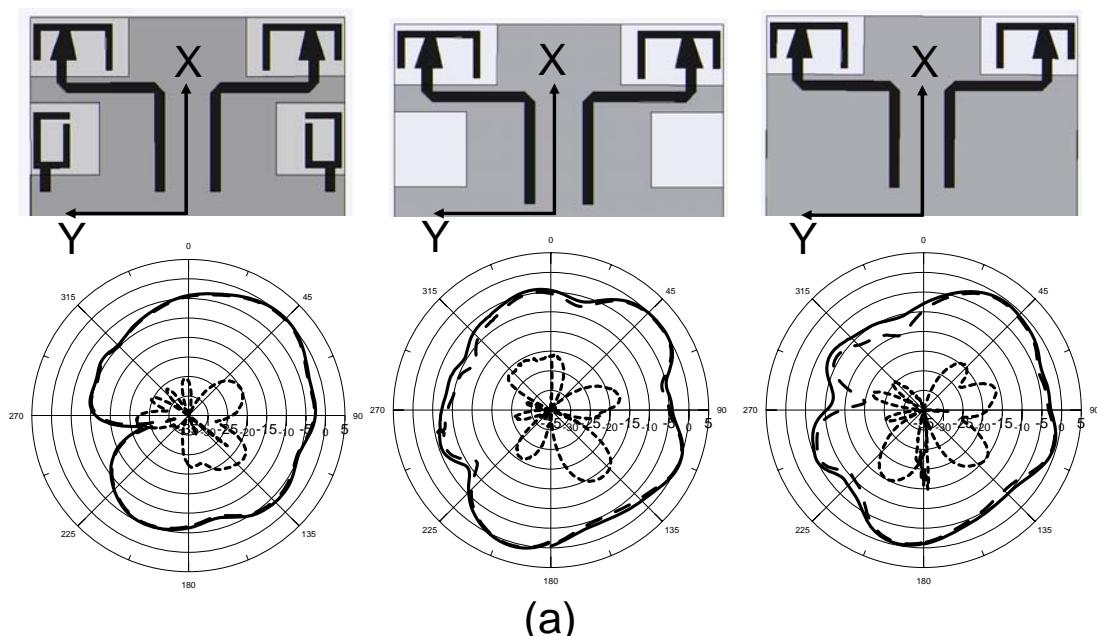
	2.44GHz	5GHz
XY 平面	平均增益：-3.22dBi 峰值增益：0.05dBi	平均增益：-3.1dBi 峰值增益：2.8dBi
YZ 平面	平均增益：-3.53dBi 峰值增益：-1.2dBi	平均增益：-2.96dBi 峰值增益：-0.03dBi
XZ 平面	平均增益：-2.6dBi 峰值增益：0.23dBi	平均增益：-1.05dBi 峰值增益：2.79dBi

表 3-12 架構 (c) 天線系統在各平面輻射場型的平均增益和峰值增益：天線 2

	2.44GHz	5GHz
XY 平面	平均增益： $-5.28\text{dBi}$ 峰值增益： $-0.77\text{dBi}$	平均增益： $-2.13\text{dBi}$ 峰值增益： $2.02\text{dBi}$
YZ 平面	平均增益： $-4.45\text{dBi}$ 峰值增益： $-1.21\text{dBi}$	平均增益： $-1.99\text{dBi}$ 峰值增益： $1.65\text{dBi}$
XZ 平面	平均增益： $-3.02\text{dBi}$ 峰值增益： $-0.52\text{dBi}$	平均增益： $-3.08\text{dBi}$ 峰值增益： $-0.5\text{dBi}$

### 3.3 天線 1 和天線 4 對天線 2 和天線 3 的影響

整合四支天線於無線網路卡前端應用時除了天線間信號干擾的問題外，另一個問題就是即使天線在餌入阻抗匹配的條件下，天線 2 和天線 3 在 2.4GHz 的增益皆不高，在此我們要討論增益不高的問題。理論上天線佔用的面積越大，輻射的效率越好，增益會越高，但由圖 3.3.2 發現加大天線 2 和天線 3 的面積，增益並沒有明顯的增加，量測條件是當信號餌入一支天線時，其它天線的傳輸線餌入埠（port）匹配至 50 歐姆（terminated），且由模擬得知天線周圍的接地金屬上的感應電流很小，所以對輻射造成的破壞性干擾不高。



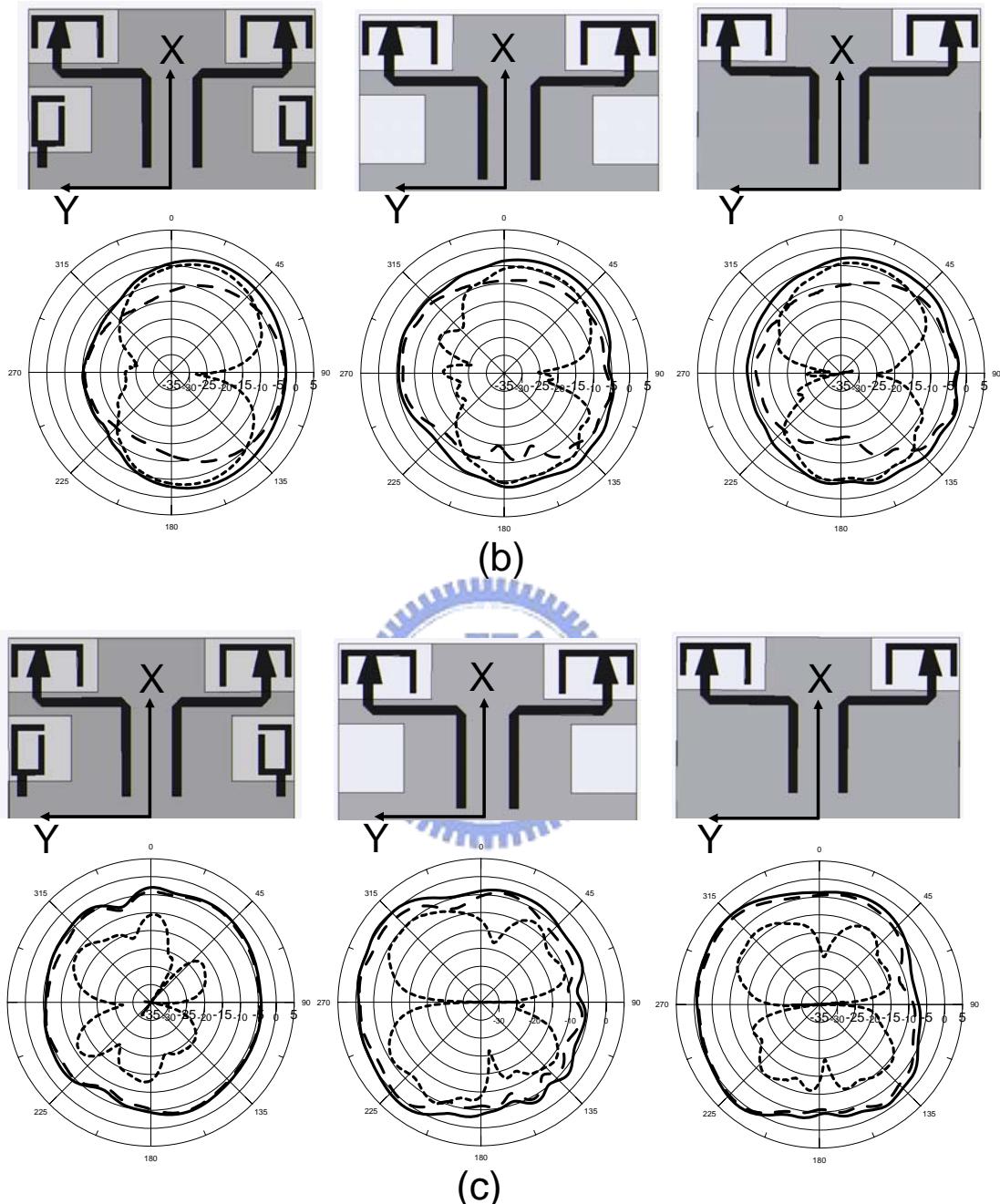
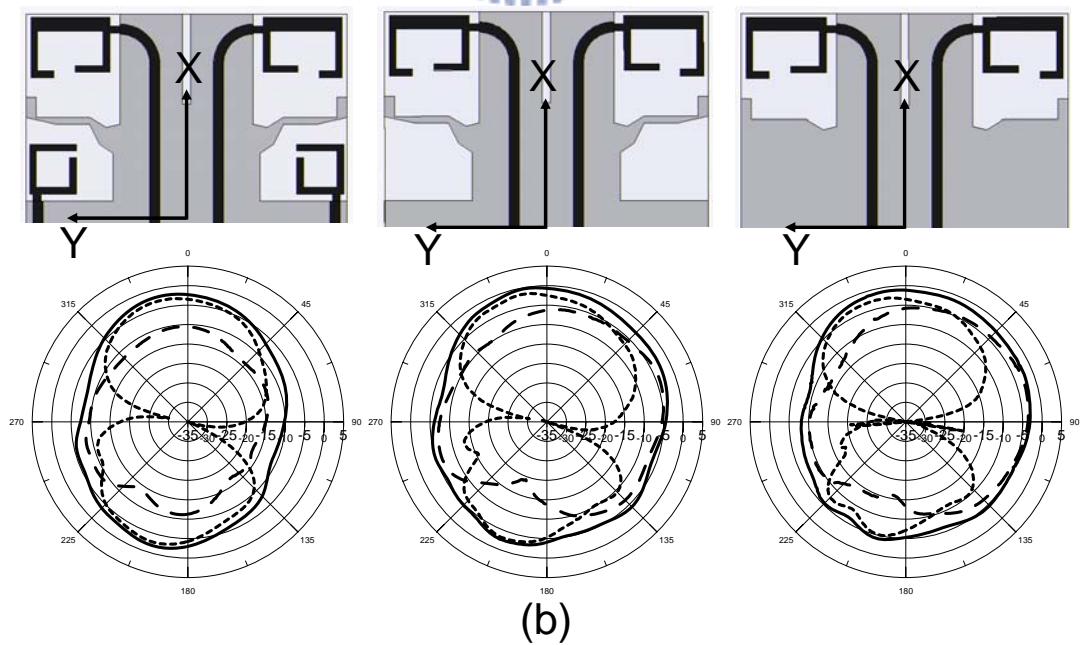
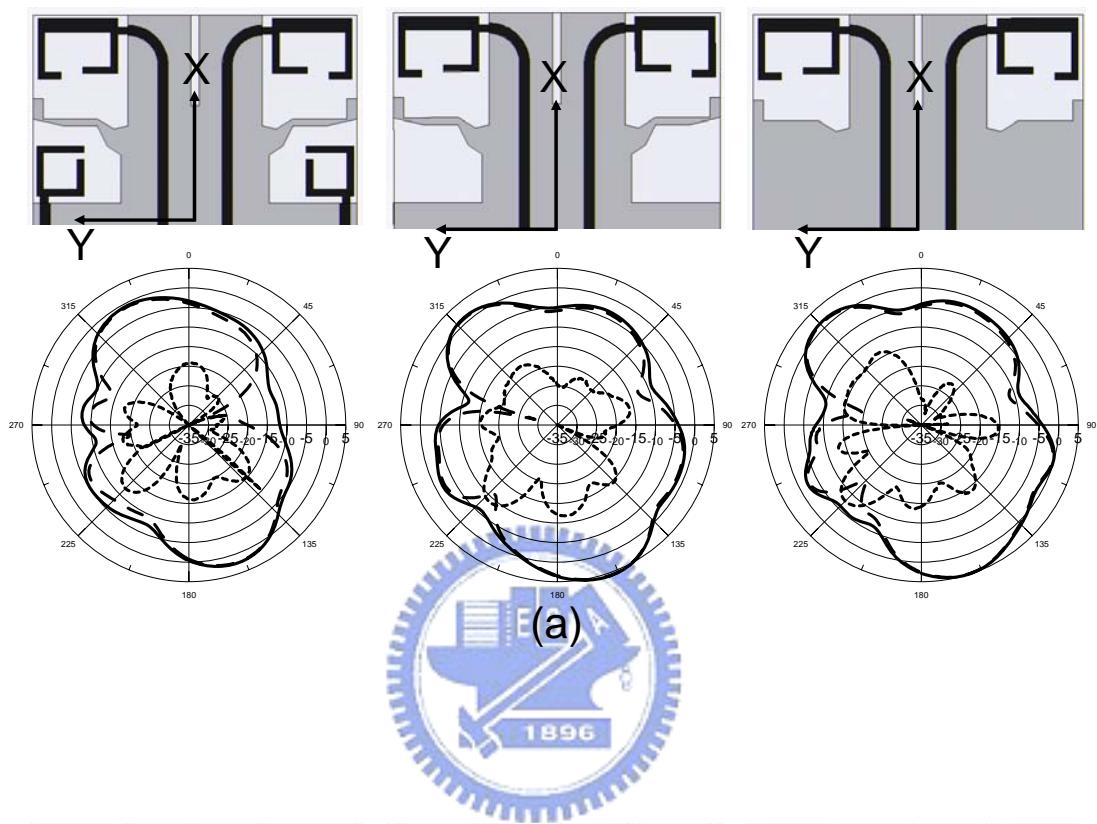


圖 3.3.1 移除天線 1 和天線 4，及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較（基本架構 a）（a）XY 平面 （b）YZ 平面 （c）XZ 平面

表 3-13 移除天線 1 和天線 4，及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較（基本架構 a）

	原始天線設計	移除天線 1 和天線 4	移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽
XY 平面	平均增益： -4.72dBi 峰值增益： 0.10dBi	平均增益： -2.98dBi 峰值增益： 0.95dBi	平均增益： -3.91dBi 峰值增益： -0.38dBi
YZ 平面	平均增益： -4.24dBi 峰值增益： -1.47dBi	平均增益： -4.3dB 峰值增益： -2.13dBi	平均增益： -4.03dBi 峰值增益： -1.21dBi
XZ 平面	平均增益： -4.21dBi 峰值增益： -2.81dBi	平均增益： -2.24dBi 峰值增益： 1.22dBi	平均增益： -2.02dBi 峰值增益： 1.29dBi

且單純考慮只有天線 2 和天線 3 的設計，我們將天線 1 和天線 4 移除，和將天線 1 和天線 4 移除且將原本放置天線 1 和天線 4 的接地金屬挖槽填滿，在輸入阻抗匹配的條件下，量測的結果如圖 3.3.1 到 圖 3.3.3 所示，發現將天線 1 和天線 4 移除後，天線 2 和天線 3 的平均增益和每個平面峰值增益皆能提升 1dBi 以上；天線 1 和天線 4 移除且將原本放置天線 1 和天線 4 的接地金屬挖槽填滿，天線 2 和天線 3 的平均增益和每個平面峰值增益皆能提升 1dBi 以上。天線 1 和天線 4 結構為一傳輸線連接到一個開路環形共振器，此共振器等效上也可視為一個濾波器，結果也顯示天線 2 和天線 3 輻射的能量被天線 1 和天線 4 吸收，造成歐姆損耗，這是很大的問題。



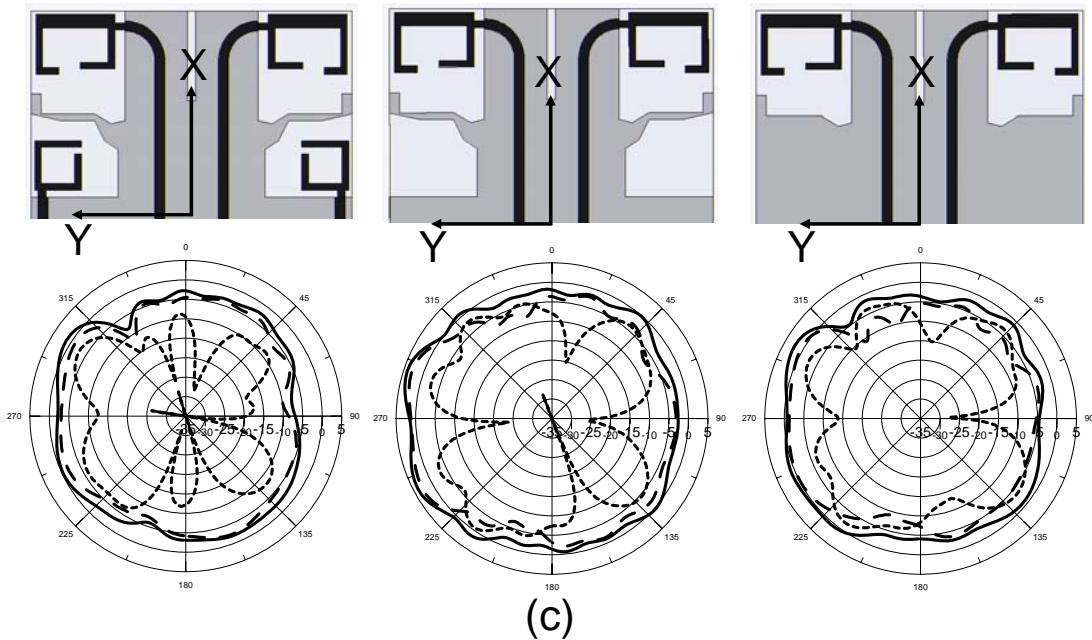
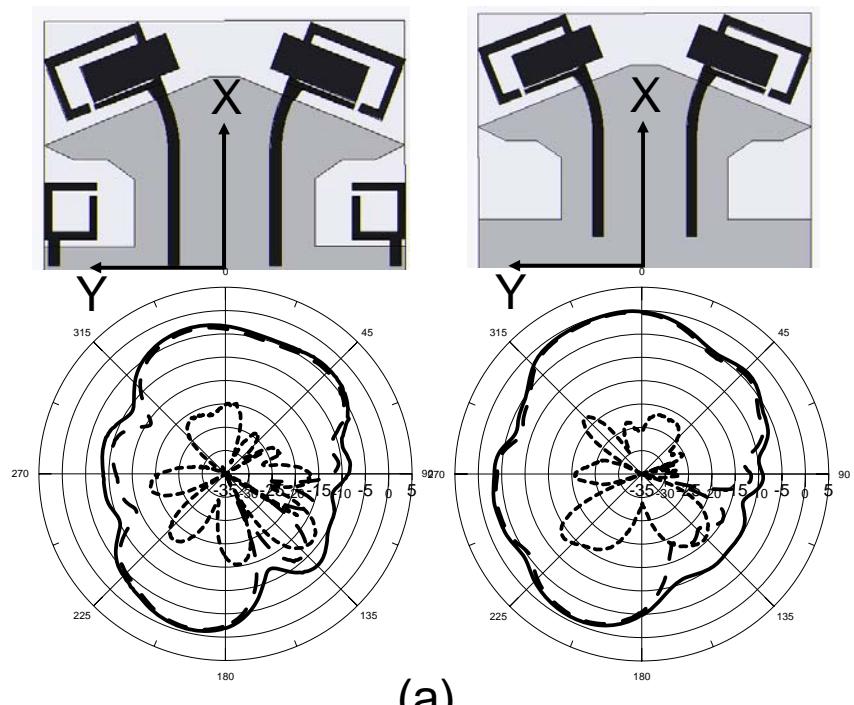


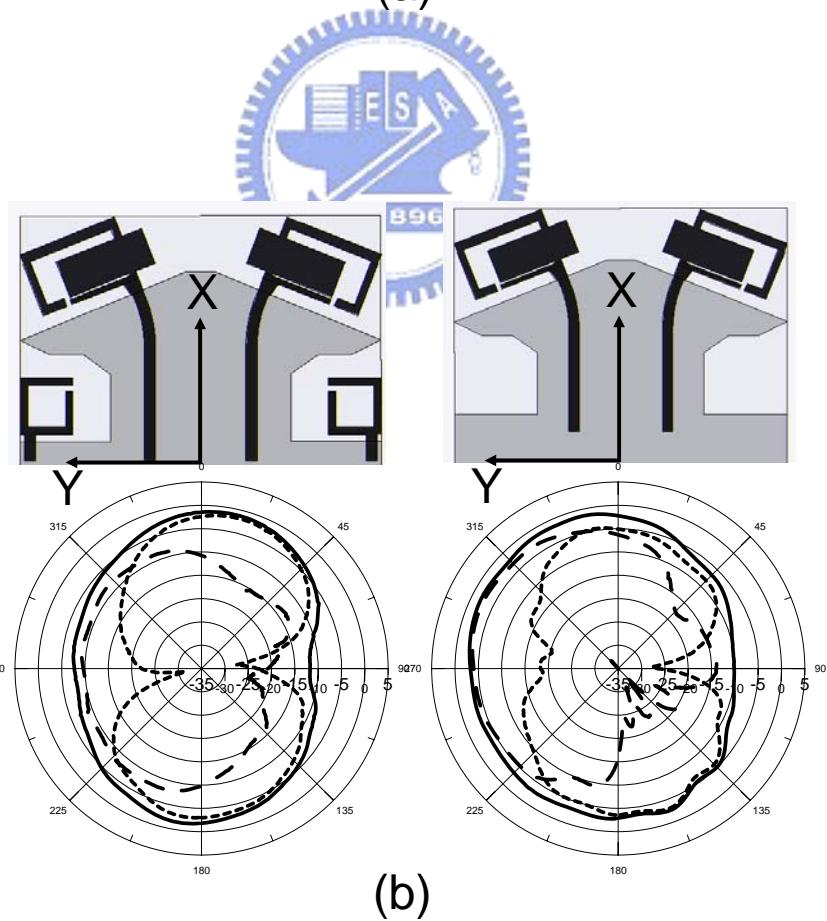
圖 3.3.2 移除天線 1 和天線 4，及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較（基本架構 b）(a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面

表 3-14 移除天線 1 和天線 4，及移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽的輻射場形與整合四支天線的比較（基本架構 b）

	原始天線設計	移除天線 1 和天線 4	移除天線 1 和天線 4 並填滿接地金屬挖槽
XY 平面	平均增益： -3.76dBi 峰值增益： 2.35dBi	平均增益： -0.72dBi 峰值增益： 5.78dBi	平均增益： -1.04dBi 峰值增益： 4.97dBi
YZ 平面	平均增益： -5.01dBi 峰值增益： -1.9dBi	平均增益： -3.48dBi 峰值增益： -0.29dBi	平均增益： -3.93dBi 峰值增益： -1.01dBi
XZ 平面	平均增益： -2.66dBi 峰值增益： 1.28dBi	平均增益： -0.05dBi 峰值增益： 4.07dBi	平均增益： -1.45dBi 峰值增益： 2.33dBi



(a)



(b)

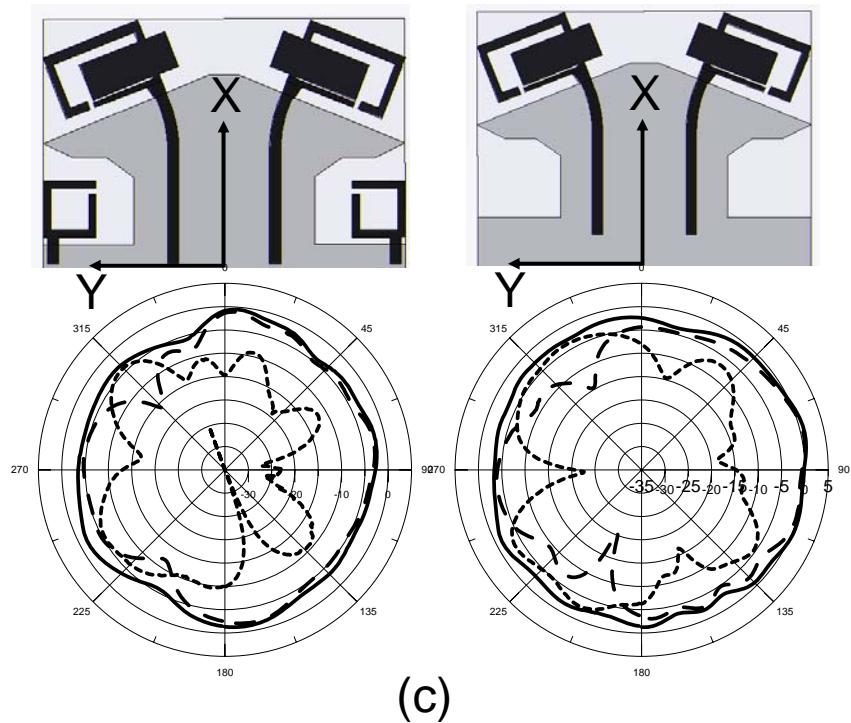


圖 3.3.3 移除天線 1 和天線 4 與整合四支天線的比較（基本架構 c） (a) XY 平面 (b) YZ 平面 (c) XZ 平面



表 3-15 移除天線 1 和天線 4 與整合四支天線輻射場形的比較（基本架構 c）

	原始天線設計	移除天線 1 和天線 4
XY 平面	平均增益：-5.28dBi 峰值增益：-0.77dBi	平均增益：-3.73dBi 峰值增益：0dBi
YZ 平面	平均增益：-4.45dBi 峰值增益：-1.21dBi	平均增益：-3.85dBi 峰值增益：-1.38dBi
XZ 平面	平均增益：-3.02dBi 峰值增益：-0.52dBi	平均增益：-1.72dBi 峰值增益：0.82dBi

除了上述的幾種架構量測外，我們還量測了許多種天線組成的架構，也更換天線 1 和天線 4 結構不採用方形共振環單極天線，發現使用其它天線架構也有天線 2 和天線 3 增益太低的問題，由以上的量測結果可知無論我們變換哪些架構，

天線 2 和天線 3 皆有增益太低的問題。



## 第四章 結論

本論文主要針對整合多天線於小面積提出了幾個設計方法，到整合三支天線還能達到要求的規格，除了其中一對天線干擾量較高之外，整合四支天線於小面積仍有設計上的困難，由於空間太小無法使用其他現有的技術，所以必須再設計新的方法來解決此問題。本論文所提出的天線是印製在印刷電路板(FR4)上，所以有製作簡單、成本低、整體的面積小易與其他電路結合、不需要額外的元件做匹配，直接  $50\Omega$  線餌入等優點。

整合多天線於小面積最大的困難就是克服天線間信號干擾的問題，還有天線操作頻率要能夠符合 IEEE802.11 的規範，頻寬的要求在 2.4GHz 頻段要 100MHz、5GHz 頻段要 1GHz，每個頻段的平均增益要達到-4dBi 以上，由於天線間干擾的問題使得增益降低，還有造成基頻 (baseband) 端不能解出對角矩陣 (diagonal matrix)，就無法解出原來的信號，造成傳輸量的降低。在本論文中所提出的幾個設計架構，皆可容易地達到全頻段操作，可以快速提供設計者該注意的地方和各種優缺點間的妥協，視其設計需求選擇想要的設計架構，由於在本論文中尚有天線干擾的問題，未來將會在干擾高的天線間增加共振結構來改善此問題。

## 參考文獻

- [1] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, "Antenna Theory and Design," 2<sup>nd</sup> ed. , John Wiley, New York, ch.2, ch3, ch.5 and ch10 , 1998.
- [2] David M. Pozar, "Microwave Engineering" 3rd, New York, ch4, and ch6, 2004
- [3] C. Wu, "Printed antenna structure for wireless data communications," U.S. Patent 6 008 774, Dec. 28, 1999.
- [4] T. Y. Wu, S. T. Fang, and K. L. Wong, "Printed diversity monopole antenna for WLAN operation," Electronics Letter, vol. 38, pp. 1625 – 1626, Dec. 5, 2002.
- [5] C. Soras, M. Karaboikis, G. Tsachtsiris, and V. Makios, "Analysis and design of an inverted-F antenna printed on a PCMCIA card for the 2.4 GHz ISM band," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 44, pp. 37 – 44, Feb. 2002
- [6] V. Stojiljkovic, and G. Wilson, "A small planar inverted-F antenna with parasitic element for WLAN applications," 10<sup>th</sup> international conference on Antennas and Propagation, vol.1, pp. 82-85, April 1997
- [7] T. Tiehong, and Z. Zheng, "Applications of planar inverted-F antenna for Bluetooth," in Proc. 2003 International Conference on Communication Technology (ICCT 2003), vol.2, pp. 1230-1233, April 2003
- [8] Y. L. Kuo, Y. T. Cheng, and K. L. Wong, "Printed inverted-F antennas for applications in wireless communication," in 2002 IEEE AP-S Int. Symp. vol. 3, pp.454 – 457, June 2002
- [9] I. Chen, and C. M. Peng, "Microstrip-fed dual-U-shaped printed monopole antenna for dual-band wireless communication applications," Electronics Letters, vol. 39, pp.955 – 956, June 2003
- [10] S. H. Yeh, and K. L. Wong, "Dual-band F-shaped monopole antenna for 2.4/5.2 GHz WLAN application," in 2002 IEEE AP-S Int. Symp. vol.4, pp.72 – 75, June 2002
- [11] Y. L. Kuo, and K. L. Wong , "Printed Double-T Monopole Antenna for 2.4/5.2GHz Dual-Band WLAN Operations," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, pp. 2187-2192, Sep 2003
- [12] G. P. Karakoussis, A.I. Kostaridis, C. G. Biniaris, and D. I. Kaklamani, "A dual-band inverted-F antenna printed on a PC card for the ISM and UNNI bands," 2003 IEEE Wireless Communications and Networking (WCNC 2003), vol. 1, pp.88 – 92, March 2003
- [13] ShoheiFujio, TakeshiAsano and Masahiro Tsumita, "Small Dual Band Modified Meander Antenna with Multiple Elements", Proc. IEEE AP-S Int. Symp.vol.2A, pp.351-354, July 3-8, 2005.

- [14] Atsuya Ando, Wataru Yamada, and Naoki Kita, “Novel Wide-Band Antennas for 2.4/5 GHz Dual-Band MIMO-OFDM WLAN Systems”, Proc. IEEE AP-S Int. Symp.vol.3A pp.553-556, July 3-8, 2005.
- [15] J.D Fredrick, Yuanxun Wang, and T. Itoh, “Smart Antennas Based on Spatial Multiplexing of Local Elements (SMILE) for Mutual Coupling Reduction”, Proc. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, volume 52, pp.106-114, January 2004.
- [16] Li Yang, Mingyan Fan, Fanglu Chen, Jingzhao She, and Zhenghe Feng, “A Novel Compact Electromagnetic-Bandgap (EBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits”, Proc. IEEE Microwave Theory and Techniques, volume 53, pp.183-190, January 2005.
- [17] Jinwoo Choi, V. Govind, and M. Swaminathan, “A Novel Electromagnetic Bandgap (EBG) Structure for Mixed-Signal System Applications”, Proc. IEEE Radio and Wireless Conference, pp.243-246, 19-22 Sept., 2004.
- [18] Li Yang, Mingyan Fan, and Zhenghe Feng, “A Spiral Electromagnetic Bandgap (EBG) Structure and its Application in Microstrip Antenna Arrays”, Proc. IEEE APMC, volume 3, 4-7 Dec. 2005.
- [19] M. Karaboikis, C. Soras, G. Tsachtsiris, and V. Makios, “Compact Dual-Printed Inverted-F Antenna Diversity Systems for Portable Wireless Devices”, Proc. IEEE Antenna and wireless propagation letters, Volume 3, pp.9-14, 2004.
- [20] A. Diallo, C. Luxey, P. Le Thuc, R. Staraj, and G. Kossiavas, “Optimization of the Total Efficiencies of Two PIFAs on the Same PCB Operating in Close Frequency Bands”, Proc. IEEE Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials, pp.41 – 44, March 6-8, 2006