

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高增益軸模螺旋天線之設計

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2622-E-002-025-CC3

執行期間：93年11月01日至94年10月31日

執行單位：國立臺灣大學電信工程學研究所

計畫主持人：林怡成

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 95 年 2 月 12 日

行政院國家科學委員會補助產學合作計畫  成果報告  
 期 中

## 高增益軸模螺旋天線之設計

計畫類別： 個別型(小產學)

計畫編號： NSC 93-2622-E-002 -025 -CC3

執行期間： 93年11月1日至 94年10月31日

計畫主持人： 林怡成

共同主持人： 無

計畫參與人員： 吳永智、李建樺、何秉勳、楊忠智

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件： 無

處理方式： 不供公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開  
查詢

執行單位： 台灣大學電信研究所

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

# 產學合作計畫總結報

## 研究計畫主題

高增益軸模螺旋天線設計

## 合作廠商

慧友電子股份有限公司

## 執行期限

民國93年11月1日起至民國94年10月31日

## 研究計劃簡介：

本計劃是由慧友電子股份有限公司與台灣大學電信所所合作的一個產學計畫，基本上此研究計畫的主要目的在於整合台大電信所與產業界的資源，共同研發出新產品與新技術並協助參與師生，藉由產學合作驗證理論，提昇應用研究水準，累積實務經驗，以達成培訓人才之目的，同時也能幫助產業界升級，以達到雙贏的結果。在這個前提之下，參與公司既可從研究成果中獲益，研究生又可在真實商業環境中得到實際研究經驗，在加上指導教授的催化及潤滑，一方面提供業界與學生研究的互動，同時以與產業界建立更密切的聯繫，從而更了解業界所面對的問題。

## 設計起源動機：

由於慧友電子股份有限公司的主力產品是關於監視器的研發，因此全力研發新一代的多功能監視器變成為公司的目標，故公司內有個想法想將監視器給無線化，一來增加產品的吸引力，二來配合無線區域網路的盛行，與未來城市區域網路化做連結。當然，無線網路的重要高頻元件之一就是天線，這一部分也是我們台大電信所電波組所致力研發的技術，所以互蒙其利，便誕生了此研究計畫。

# 研究方法與實作量測：

## 一、介電陶瓷材料的介紹

近來衛星和無線行動通訊得以蓬勃發展大部分因素，在於關鍵性元件小型輕量化，今天隨處可見的行動電話、GPS 系統，皆朝著小型化的概念來設計。在電子零件小型化、輕量化的趨勢下，介電陶瓷成了最被廣泛利用的材料之一。介電陶瓷材料具有高介電常數、低損耗、溫度穩定性高的優點。

一般來說，微波在介質中的波長為

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

$\lambda_g$ : 介質中的波長

$\lambda_0$ : 自由空間中的波長

所以介電常數的提高，可使介電共振器尺寸縮減，達到縮小化的要求，而藉由介電常數的不同，可調整元件縮小化的程度。

介電材料低損耗的特性，代表有較高的品質因子 Q 值，而 Q 值和共振器的頻寬有如下的關係

$$Q = \frac{f_0}{BW}$$

$f_0$ : 共振頻率

BW: 頻寬

代表在一定的共振頻率下，較高的 Q 值會使頻寬變窄，這也是介電材料的缺點，因此使用時要根據實際的需求來取捨。

## 二、介電圓柱天線(dielectric rod antenna)

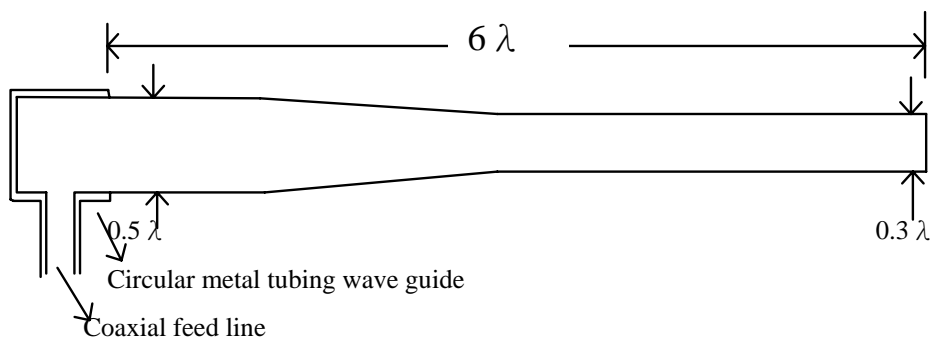
介電陶瓷材料亦可應用在天線的製作。由於介電質具有傳導電磁波的特性，但在傳導過程中，電磁波會從圓柱邊緣漏掉，並產生輻射，Mueller 和 Tyrrell 便利用這個輻射特性製作了介電圓柱天線 (dielectric rod antenna)，如圖一，該天線可由圓柱狀波導管饋入，而波導管由同軸線激發，其輻射場形如端點輻射(end-fire)天線，其切面可以做成圓形或方形。

波在介電圓柱內外傳導比率和相速與圓柱的直徑和介電常數有關，當直徑小於 $\lambda/4$ 時，介電圓柱的導波效果較差，並且僅有一小部分的波在圓柱內部，而相速約等於在自由空間中的速度；當直徑為 $1\lambda$ 時，則大多數的波都會被限制在圓柱內，而相速約等於完全在介電質時的速度。

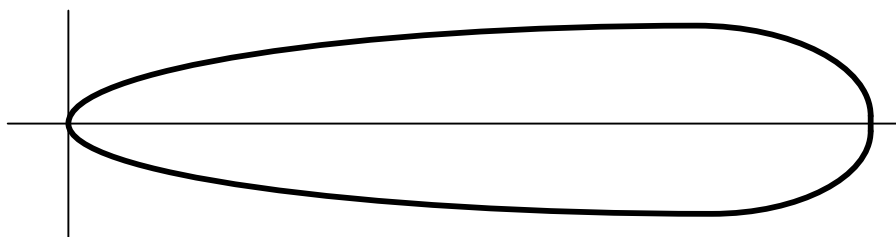
若要大略計算延著介電圓柱上均勻輻射出來的場形時，可當作許多連續的點波源排成的陣列，且每個點波源的相位差約  $360(1+1/2L_\lambda)$  deg/wavelength，其中 $L_\lambda$ 表示圓柱的總長。欲求更精確的計算，可利用Schelkunoff' s equivalence principle，先將附著圓柱表面上的場轉換成等效的電流和磁流，再計算其輻射場形。Mueller和Tyrrell推導出其大略的最大增益和HPBW如[1]式和[2]式，可知增加圓柱的長度可提高增益和縮小HPBW。以圖一(a)的模型量測出來的最大增益約可達16dBi，其指向性並且高增益的特性，皆符合本論文製作天線的目標。

$$directivity \cong 8L_\lambda \quad [1]$$

$$HPBW \cong \frac{60^\circ}{\sqrt{L_\lambda}} \quad [2]$$



(a) 介電圓柱天線的模型



(a) 介電圓柱天線的場形圖

圖一 Mueller 和 Tyrrell 所製作的介電圓柱天線

### 三、 負載高介電質的螺旋天線

#### 1. 介電常數對螺旋天線的影響

螺旋天線除了有高增益、指向性、寬頻的特性外，若在螺旋的中心加入介電常數 2.6 的壓克力，會使操作頻率往低頻偏移，藉此可縮小天線的尺寸，在實際應用上，這是一個很值得發展的優點。電磁波在介質中的波長會隨著介電常數值的增加而變小，因而降低操作頻率，因此若將介電常數 2.6 的壓克力換為更高介電常數的材料，如之前提及的介電陶瓷材料，可預想天線尺寸會縮得更小，而且螺旋天線本身即具有寬頻的特性，所以比較適用頻寬會縮小的缺點，很適合使用介電陶瓷材料。

我們建構出如圖二的右圓螺旋天線模型，螺線圈數固定為三圈，圖中附著於介質上的為金屬帶，寬度為 1mm。為找出改變介電質對天線的影響，因此固定中心圓柱的直徑  $D$  為 12mm、高度  $L$  為 5cm，然後利用 HFSS 模擬軟體模擬三種不同的介電值下，觀察天線的 return loss 的變化。如圖三，當介電常數 2.6 時，其 -10dB 頻帶能函蓋 5~6GHz；把介電常數增到 15 後，中心頻率偏到約 4.5GHz 處；若再增加到 20，則中心頻率偏到更低頻約 4GHz。由模擬結果可歸納出一個趨勢，介電常數提高造成操作頻率往低頻偏移，為了調整回我們所需求的頻段，再一次依照頻率偏移的比率，嘗試縮小天線的尺寸。

依照比例縮小尺寸，使用介電常數 15 的天線約將尺寸縮為原來的 0.8 倍，再經過微調後，圓柱直徑  $D$  縮為 9mm，其 return loss 如圖四的虛線，頻寬與使用 2.6 的壓克力比起來較差，顯示使用該高介質低損耗的材料會減少頻寬，但 -10dB 以下仍有涵蓋我們需要的 5~6GHz；同樣的方法，將介電常數 20 的天線尺寸縮為原來的約 0.7 倍，再微調後直徑  $D$  可縮到 8mm，其 return loss 如圖四的虛線，顯示出使用介電常數更高的材料頻寬會更窄，由圖中來看，僅能剛好達到 5~6GHz 的要求。



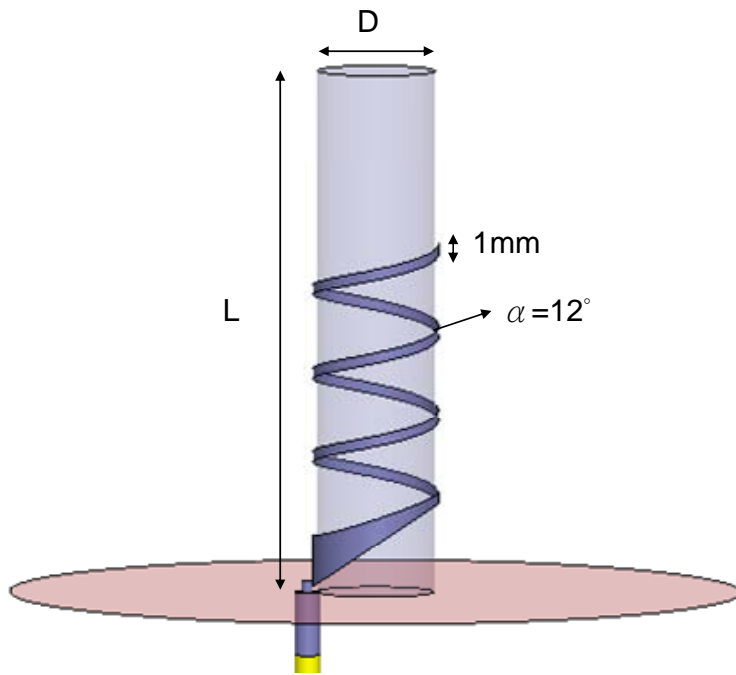
圖五是右圓極化的最大增益對頻率圖，其 3dB 頻寬如同 return loss，會隨著介電常數提高而縮小；在 5~6GHz 這個頻段內，介電常數 2.6 的天線最高增益只有約 10.3dBi，介電常數增加到 15 時，增益提高到約 10.7dBi，若再增加到 20，增益可達到約 11.3dBi。會有提高增益效果的原因，應該是使用高介電質時，其作用會如同圓柱介電天線，因而對增益有所幫助，接下來的章節將有更詳細的分析。

軸向最高增益處的 axial ratio 如圖六所示，因為螺旋圈數皆固定在只有三圈，在圈數少的情況下，axial ratio 表現會較差。當提高介電常數時，可發現大致上有些改善，但頻段幾個頻率點仍未達小於 3dB 的標準。

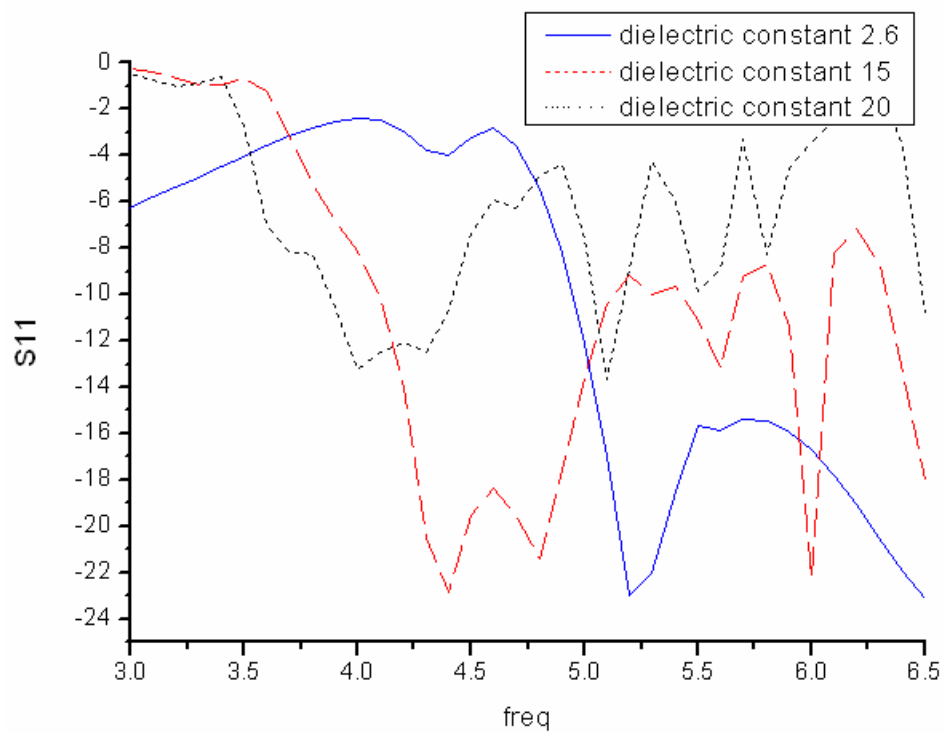
最後比較三種介電質在中心頻率 5.5GHz 時的輻射場形，如圖七所示，我們可以觀察出使用介電常數 2.6 時，isolation 約 12dB，圓極化效果不是很好，front to back ratio 約 26dB；換成另外兩種高介電常數材料後的 isolation 就比較好，約有 16dB，而且也可以發現介電常數越高，front to back ratio 值越大、main beam 也越集中，這些結果皆對增益的提高有所幫助。

綜觀以上模擬結果，我們製作了如下頁表格來做比較，若將天線中心圓柱介電質常數從 2.6 提高到 20 的過程中，圓柱的直徑可從 12mm 大幅縮到 8mm，使得天線尺寸有如筆一般的細小，方便攜帶與收納，且最大增益提高了約 1dBi 左右，唯 return loss 頻寬縮小到約 1GHz，但恰好能符合我們的需求，因此高介電質的應用值得我們做更深入的研究。

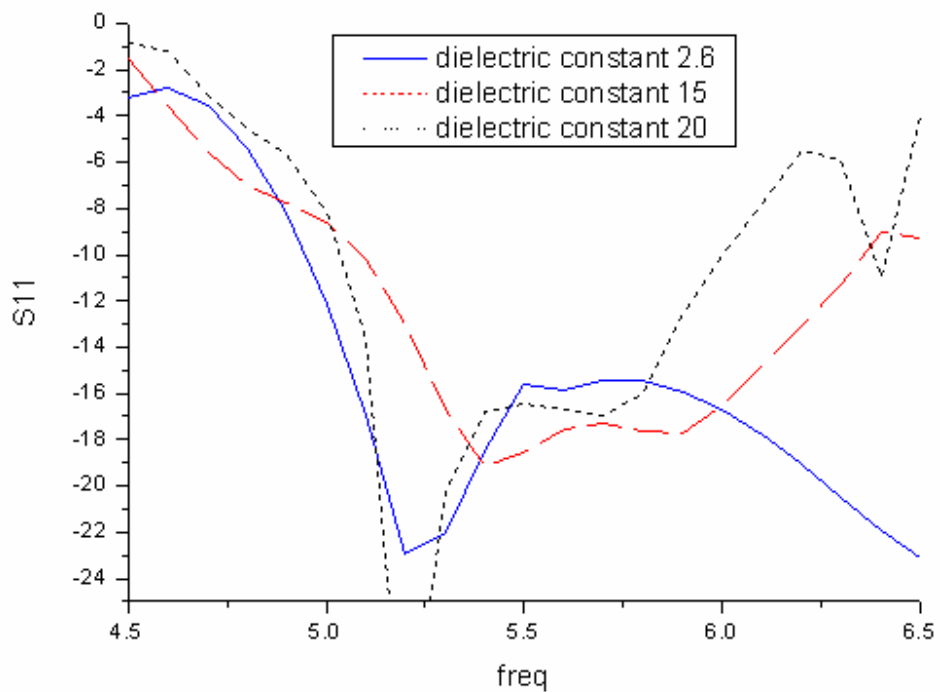
介電常數	圓柱直徑 D	圓柱高度 L	頻寬	最大增益
2.6	12mm	5cm	>1.5GHz	10.3dBi
15	9mm	4cm	1.25GHz	10.7dBi
20	8mm	4cm	1GHz	11.3dBi



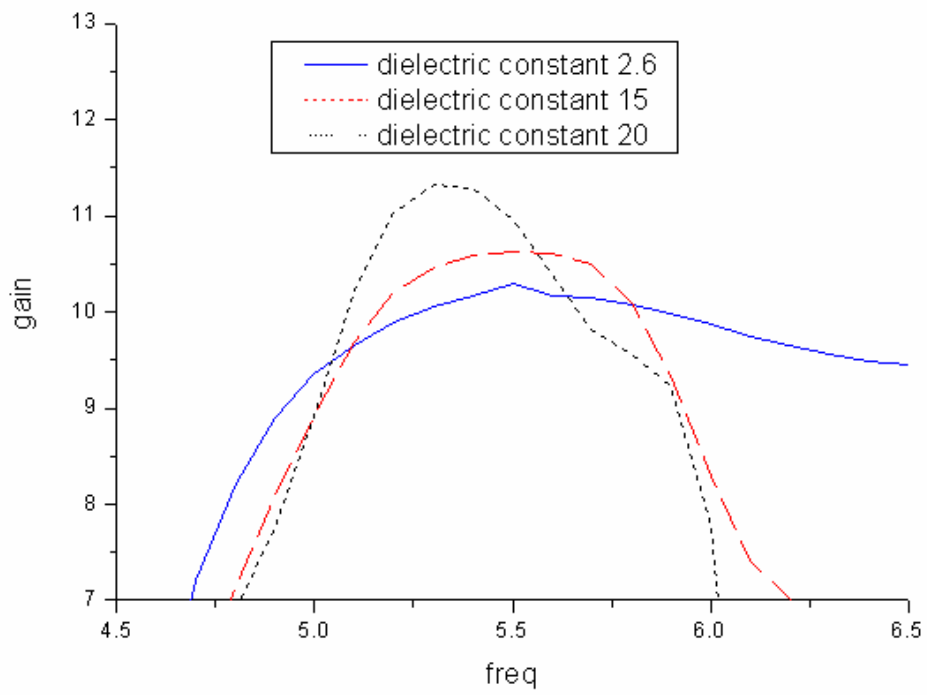
圖二 負載介電質的螺旋天線幾何圖



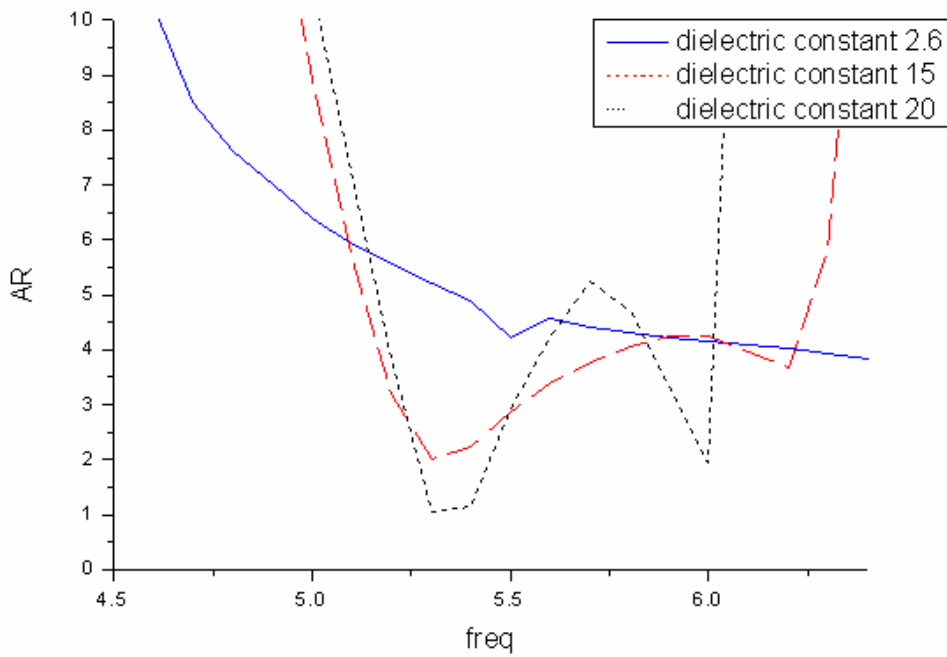
圖三 介電常數對 return loss 的影響



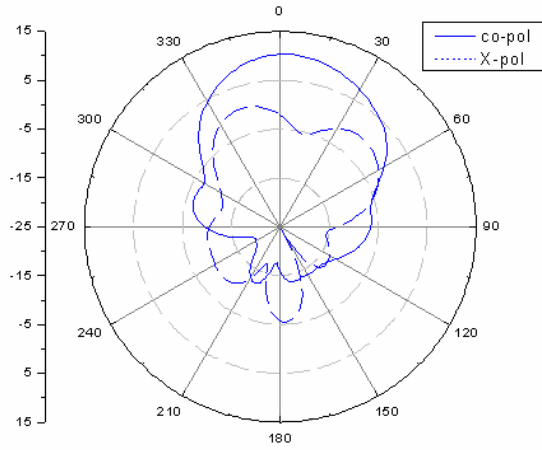
圖四 天線尺寸調整過後的 return loss 圖



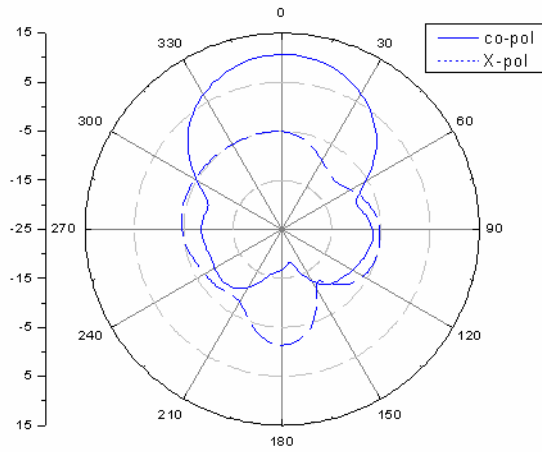
圖五天線尺寸調整過後的增益圖



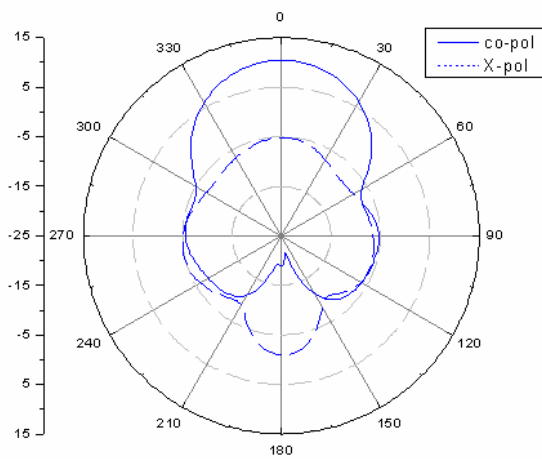
圖六 天線尺寸調整過後的 axial ratio 圖



(a) 介電常數 2.6



(b) 介電常數 15



(c) 介電常數 20

圖七 中心頻率 5.5GHz 的輻射場形圖

## 2. 介電圓柱高度的影響

介電圓柱天線中，圓柱的長度會與最大增益會正比關係。而我們在螺旋天線中心所使用的也是高介電質材料，因此推測應該會有與介電圓柱天線相同的特性，於是我們針對負載介電常數 20 的螺旋天線，嘗試做了增加圓柱高度  $L$  的模擬，將原來的  $L=4\text{cm}$  增加為  $8\text{cm}$ ，圈數仍為 3 圈，其他參數也皆維持不變。

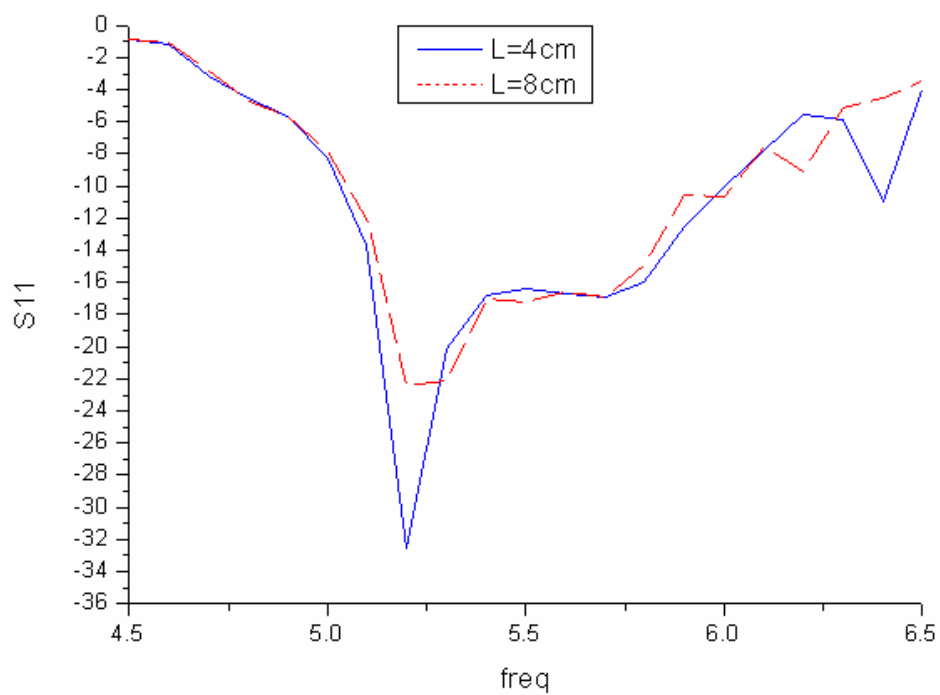
圖八是模擬出來的 return loss 圖，增加高度後，頻寬有稍微變小，但仍在需要範圍內，所以影響不大，而這也表示圓柱上端材料的形狀不會改變輸入阻抗，阻抗匹配的決定因素仍在金屬螺線的饋入端。

接著觀察高度對增益的影響，如圖九所示： $L=4\text{cm}$  時，中心頻率的增益約  $11.3\text{dBi}$ ，這是上一節的結果；而  $L$  增加到  $8\text{cm}$  時，中心頻率增益可達到  $13.2\text{dBi}$ ，比原來多了大約  $2\text{dBi}$ ，的確有達到提高增益的效果。雖然頻段內整體增益皆有所提高，但在較高頻約  $6\text{GHz}$  處，發現增益突然下降，縮小了該天線能使用的頻段，因此往後將再針對這個部分做改善。

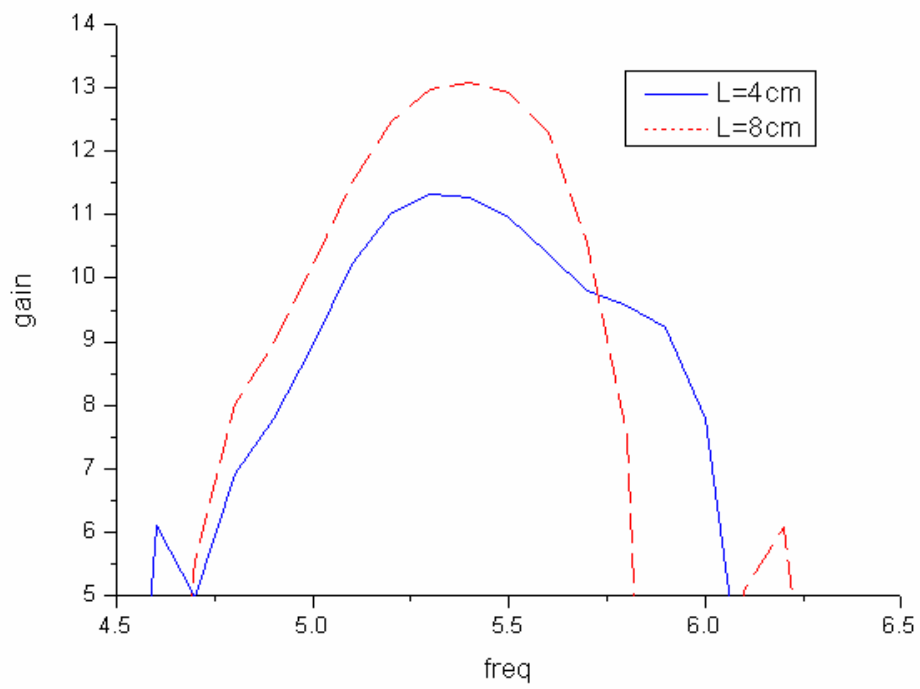
圖十是比較改變圓柱高度對 axial ratio 的影響，發現當  $L=8\text{cm}$  時，僅在中心頻率附近圓極化效果較好，因此若要提高圓柱高度使螺旋天線達到更高增益，所適用的頻寬將會更小。

最後觀察  $L=8\text{cm}$  時中心頻率和較高頻  $5.9\text{GHz}$  處的輻射場形。如圖十一(a)，中心頻率處的增益和 axial ratio 都是最理想的，isolation 約有  $28\text{dB}$ ，是很好的圓極化；front to back ratio 達  $30\text{dB}$ ，代表其指向性也不錯，與使用  $L=4\text{cm}$  的介電圓柱不同的是多了 side lobe，可能是兩者的輻射模態不同，但不會構成影響。由圖九，再較高頻時增益會突

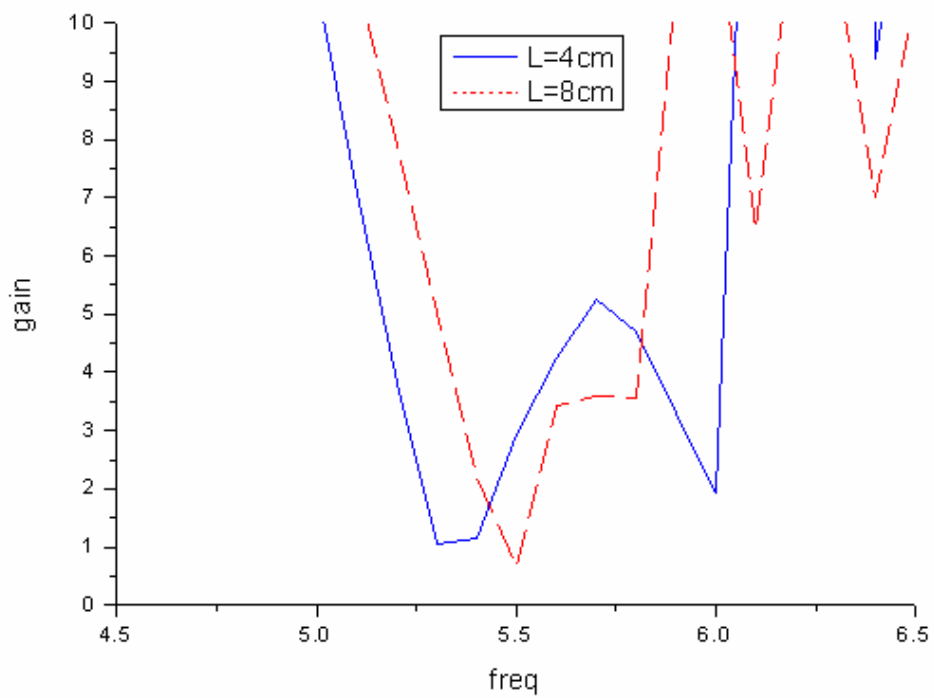
然下降，因此我們觀察 5.9GHz 處的場形如圖十一(b)可知，軸向的增益變小，而分配到 side lobe 上使得 side lobe 大於 main beam，原因可能是頻率改變時，在介電圓柱上的傳導的波長也會改變，造成有不同的輻射模態，這個缺點也是該天線需要再做改進的地方。



圖八 介電圓柱高度對 return loss 的影響

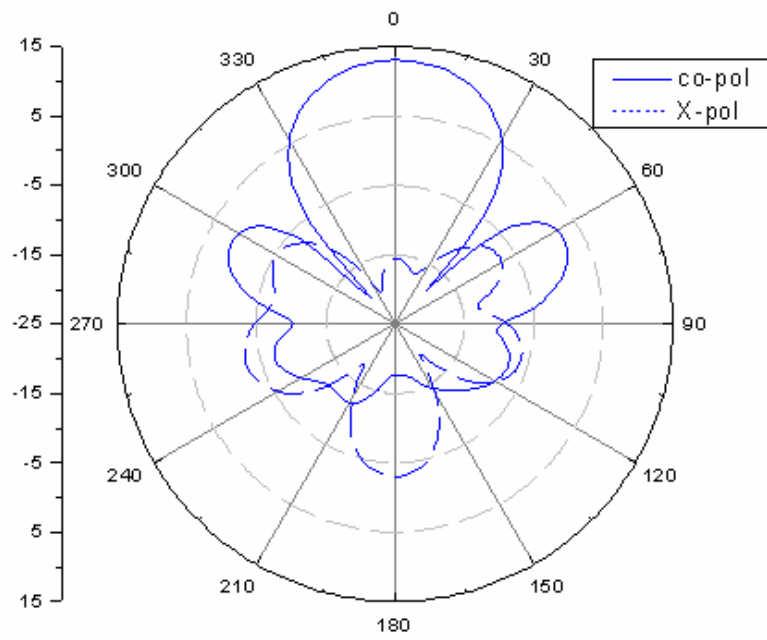


圖九 介電圓柱高度對增益的影響

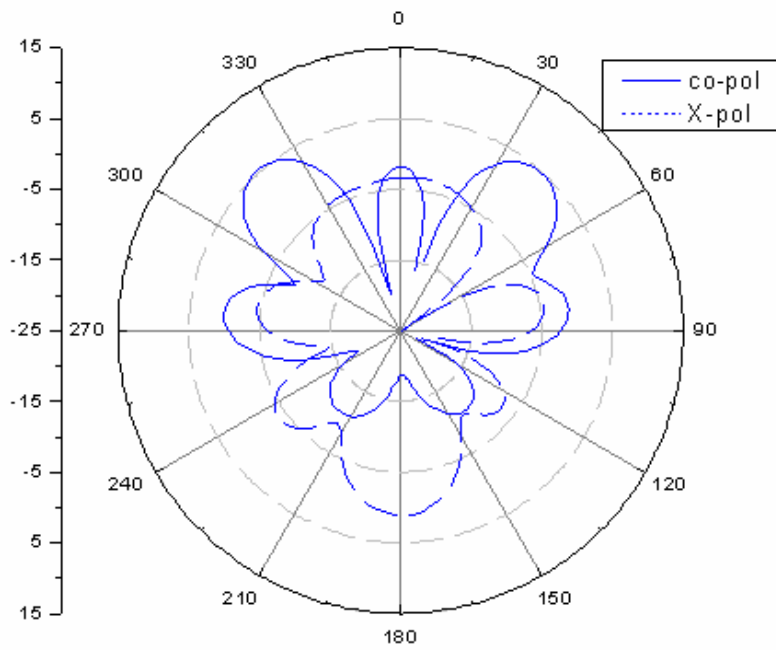


圖十 介電圓柱高度對 axial ratio 的影響





(a) 5.5GHz



(b) 5.9GHz

圖十一  $L=8\text{cm}$  時的輻射場形

### 3. 螺旋圈數對天線的影響

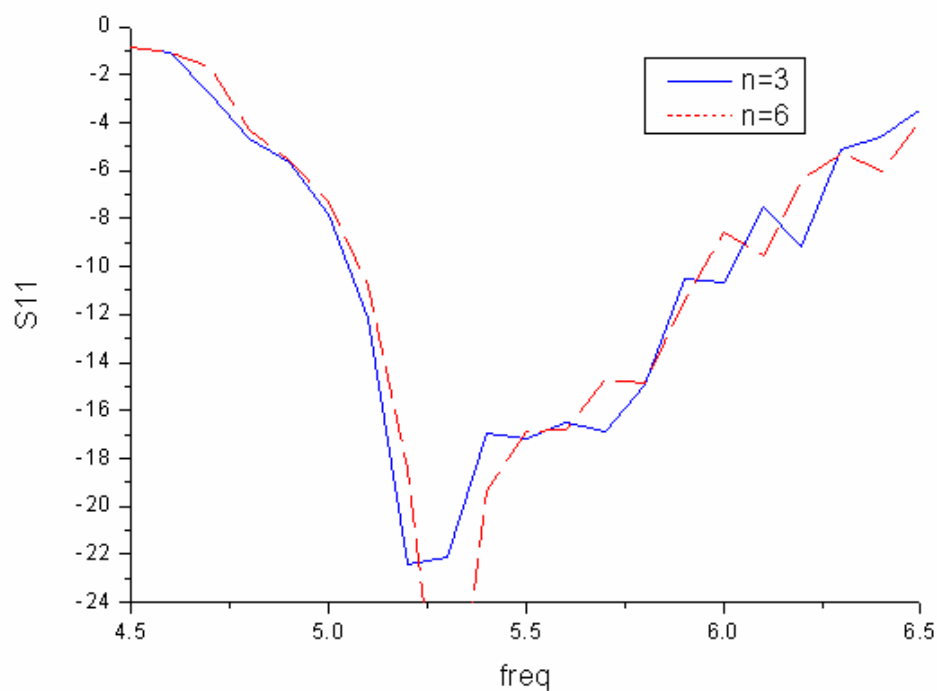
一般來說，增加螺旋天線的圈數可提高增益，並且對 axial ratio 也有所改善，因此我們也嘗試增加負載高介電質螺旋天線的圈數，以期達到提高增益的目的。設計上圓柱高度維持為 8cm，其他相關參數皆固定，僅將圈數由 3 圈增為 6 圈來做比較。

圖十二是模擬螺旋圈數對 return loss 的影響，顯示兩者近乎重疊，即增加圈數對輸入阻抗影響不大。比較值得注意的是對增益的影響，如圖十三所示，增加圈數後，除了較低頻處不有些改變，整體的趨勢可說是很類似。我們先來看圖十四的 axial ratio 比較圖，兩者只有些許變化，大致上還是一致的。

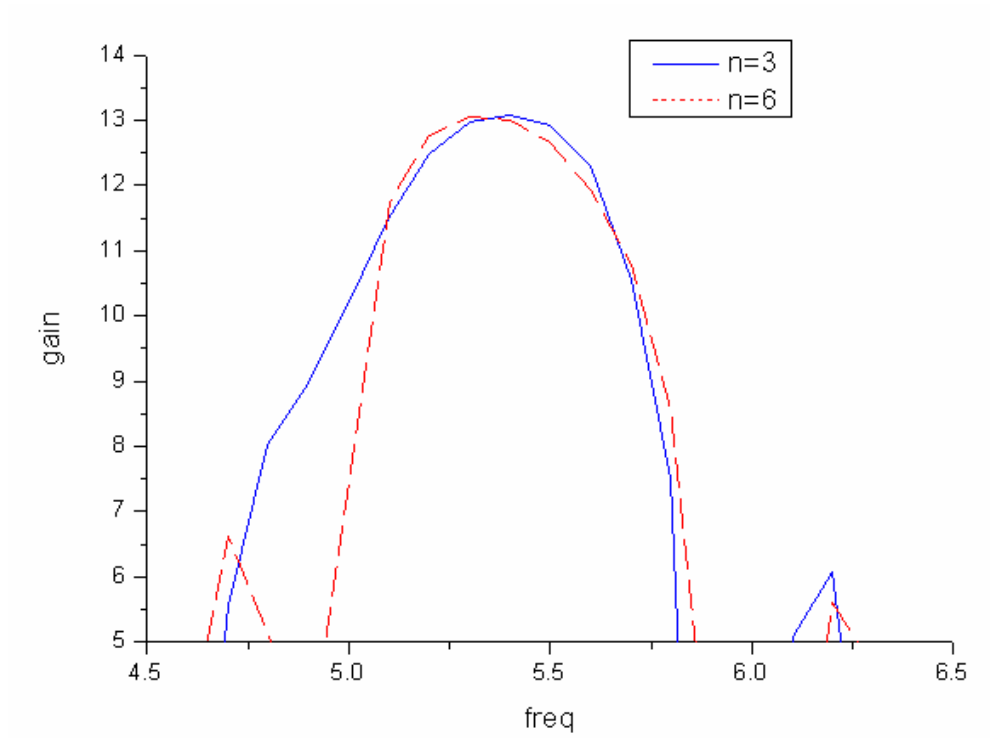
觀察過以上的模擬結果後，增加螺旋圈數對天線各項表現幾乎無影響，與一般所認同圈數與增益的關係並不符合，為了找出其原因，我們觀察整個天線上的電場分佈圖。圖十五是 3 圈時的連續的電場分佈圖，發現接近饋入端的電場是繞著金屬螺線環繞著，脫離金屬螺線後，則是形成在介電圓柱上傳導的行進波。圖十六是 6 圈時的連續電場圈，其分佈情況與 3 圈時幾乎完全相同，除了接近饋入處以外，上端的電場並不循著螺線環繞，而是附著介電圓柱上的行進波。以電場分佈來看，該天線的行進波主要皆附著在介電質表面，因此與金屬圈數多寡無關，而天線的輻射即是來自介電圓柱表面的行進波，這個輻射機制與介電圓柱天線相同，所以我們認為這個天線實際上應為「以金屬螺線饋入的介電圓柱天線」，而這也證明其增益具有介電圓柱天線的特性，會隨著圓柱高度而增加。

一般都知道，介電圓柱天線有高增益的特性，而螺旋天線具有圓極化的電場，若要使介電圓柱天線輻射出圓極化的場，可利用一小部分金

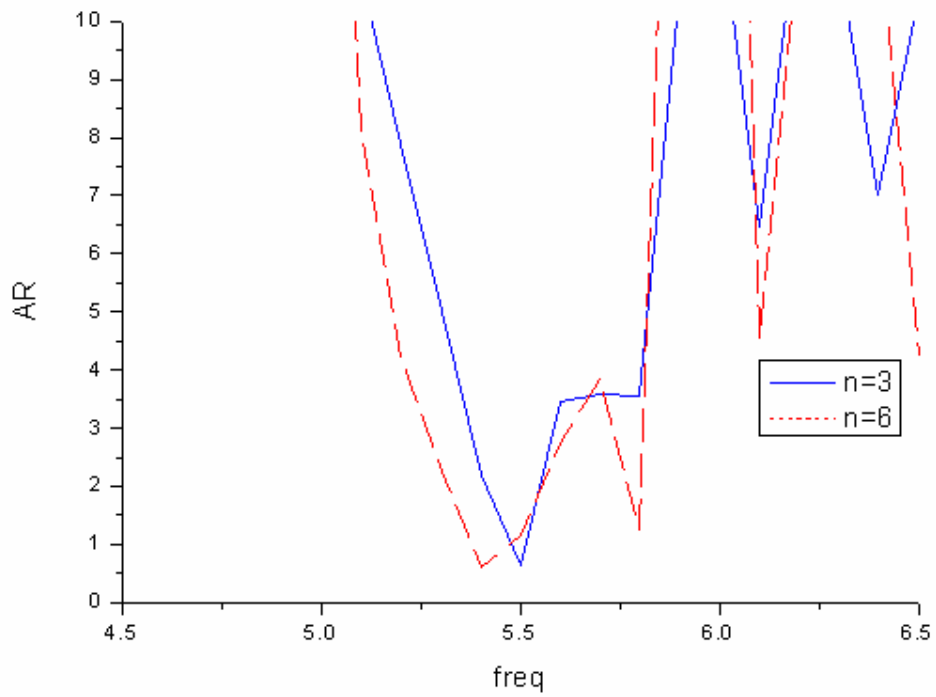
屬螺旋線來提供圓極化的波，而這種饋入方法也比其他使用波導管的方法簡單許多。結合了兩種特性，使得高增益的介電圓柱天線也有圓極化的效果。因此，本來欲使用高介電質來縮小螺旋天線體積，並且提高增益的設計，另一層義意是結合了介電圓柱和螺旋兩種天線的優點。



圖十二 高介電質下螺旋圈數對 return loss 的影響

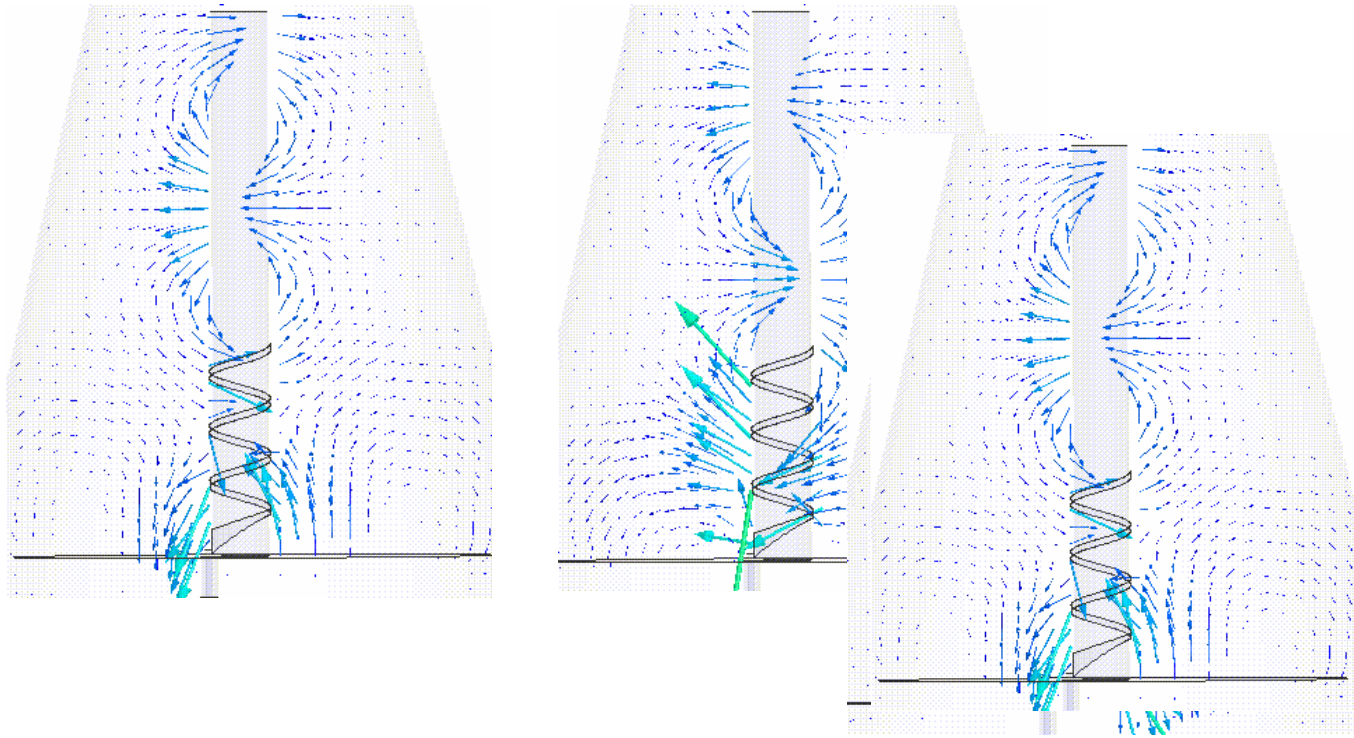


圖十三 高介電質下螺旋圈數對增益的影響

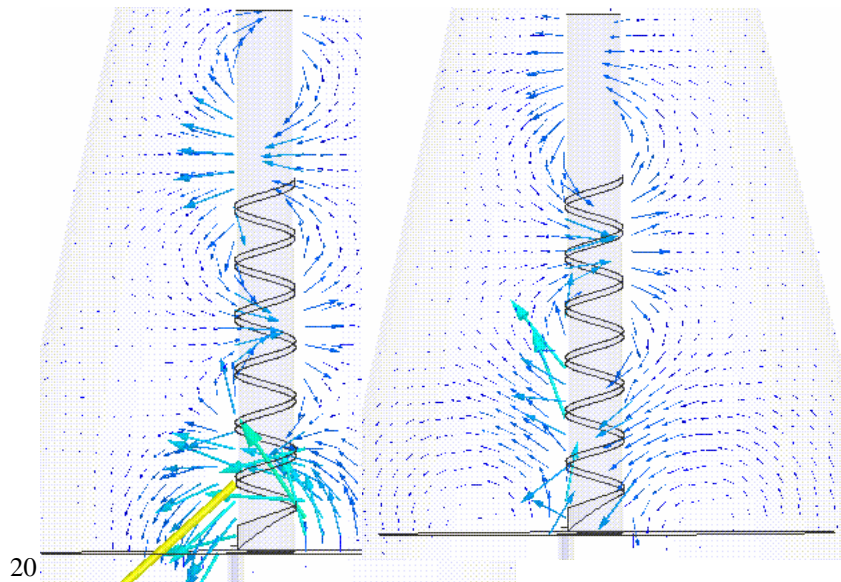


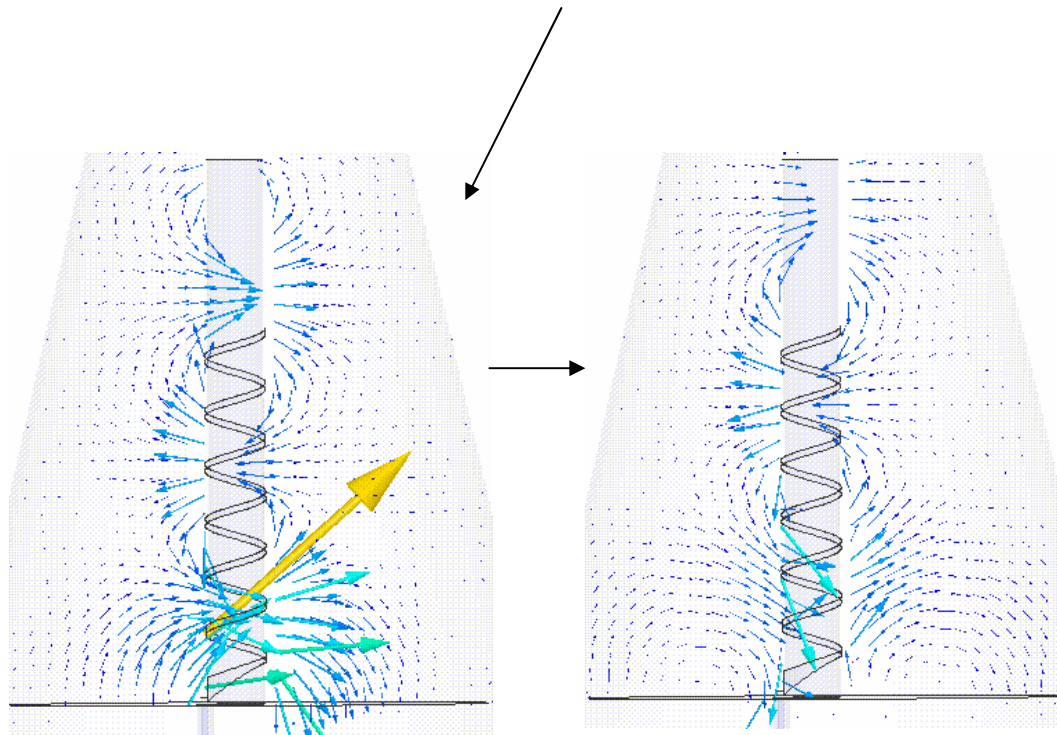
圖十

四 高介電質下螺旋圈數對 axial ratio 的影響



圖十五 螺線 3 圈時的連續電場圖





圖十六 螺線 6 圈時的連續電場圖

#### 4. 環型圓柱介電質

由圖九的模擬結果，我們可以知道拉長圓柱介電質可以使中心頻率增益提高，這是介電圓柱天線的特性，但較高頻處增益會突然下降，使得頻寬縮小，針對這個缺點，我們嘗試改變天線的幾何形狀，使增益更穩定。其方法是將圓柱介電質的中心挖空，其幾何形狀如圖十七所示，我們將其他參數皆固定，然後改變中心孔徑的大小  $a$ ，來觀察對天線的影響。

依序將  $a$  的大小由 2mm 到 4mm，圖十八是模擬的 return loss 圖，當孔徑只有 2mm 時，與挖空前 return loss 改變不大；若  $a$  值增加到 4mm，則頻率會稍微往高頻偏移了約 2%，這是因為圓柱介電質中心被挖空而充

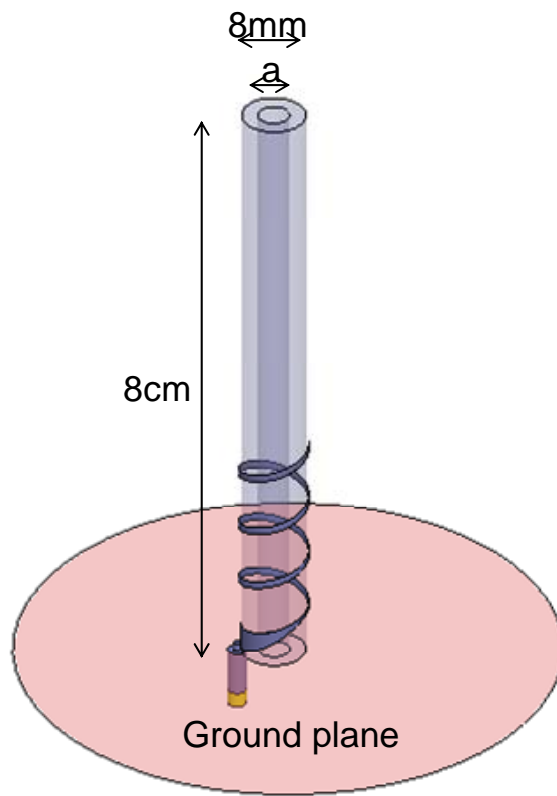
滿空氣，使得有效介電常數降低，即有效波長會變大，因此在同樣的天線尺寸下，會發生操作頻率往高頻偏的現象。

圖十九是最增益對頻率圖，當孔徑大小  $a$  逐漸增加時，較高頻處的增益值明顯提高很多，改善了高頻增益不足的缺點。然而，我們也可以發現，孔徑越大時，除了如之前所述的原因，會使頻率往高頻偏移外，其最高增益值也會逐漸下降，從原來未挖空的最大增益值 13.2dBi，降到  $a=4\text{mm}$  時的 12dBi，這也是因為有效介電常數變小，降低介電質導波的能力，使得輻射效果沒那麼好。

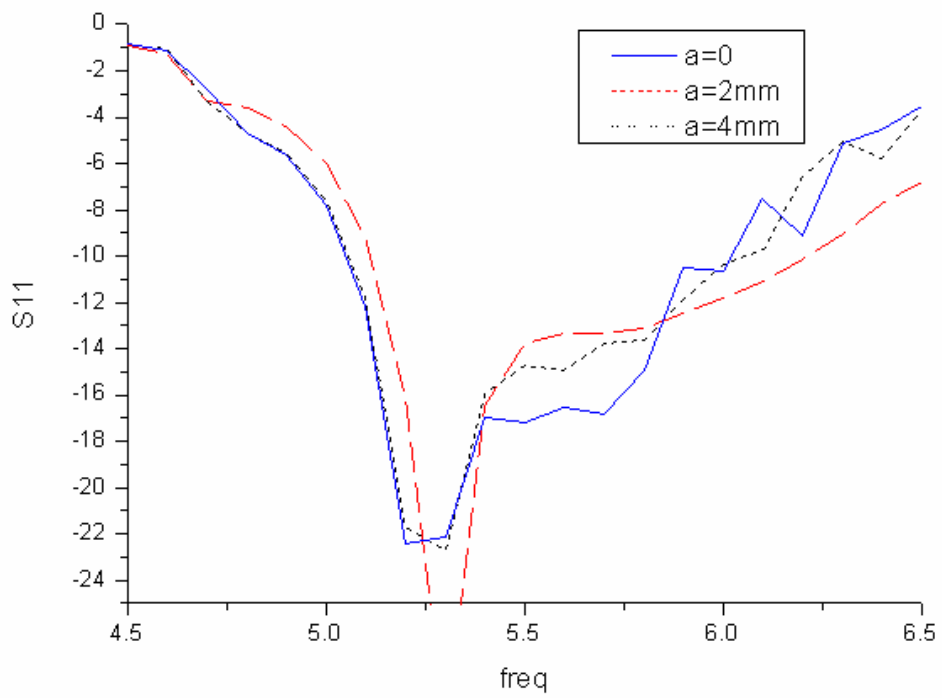
圖二十是 axial ratio 比較圖，隨著  $a$  值的增加，我們可以看到 axial ratio 在較高頻的部分也逐漸有所改善，3dB 以下涵蓋的範圍約有 1GHz 但在對於較低頻處的 axial ratio 並無改善，兼之原本就有往高頻偏移的特性，因此看起來整個操作頻段是在 5.5GHz~6.5GHz，因此可能需要再藉由改變天線尺寸來調整頻段。

圖十一(b)為圓柱介電質在較高頻 5.9GHz 的場形，而圖二十一是環型介電質 5.9GHz 的場形，相較之下使用環型介電質改善了軸向的增益，isolation 可達到約 16dB。

從以上模擬結果可知，使用環型介電質後，不但使高頻的增益提高，且 axial ratio 也有所改善，提高了天線的頻寬；而缺點是最大增益降低了約 1.3dBi，操作頻率也因為往高頻偏，以致未能完全涵蓋所要求的頻段。



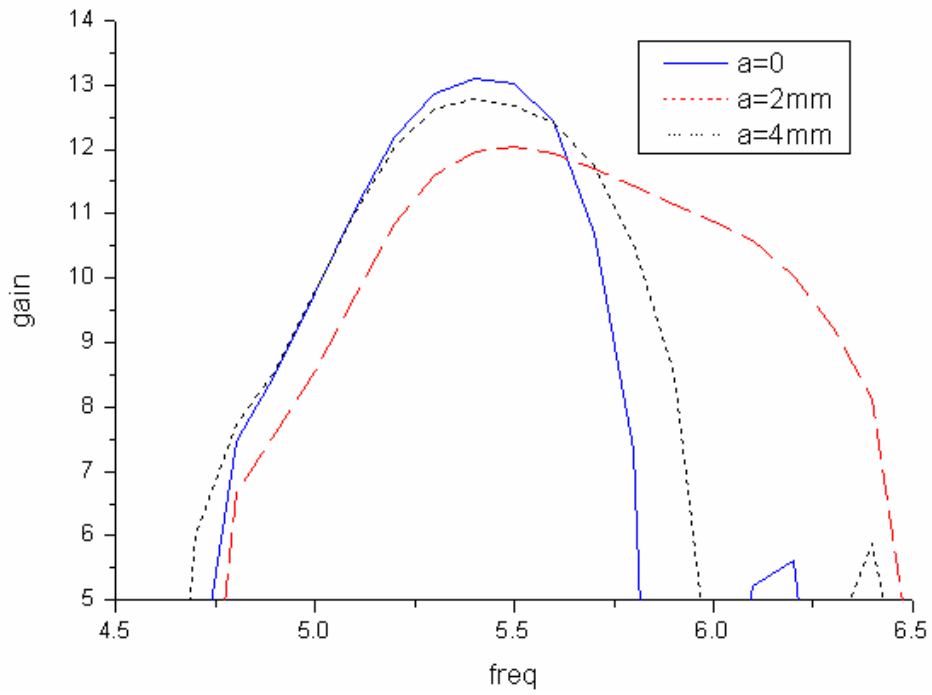
圖十七 負載環型介電質的螺旋天線幾何圖



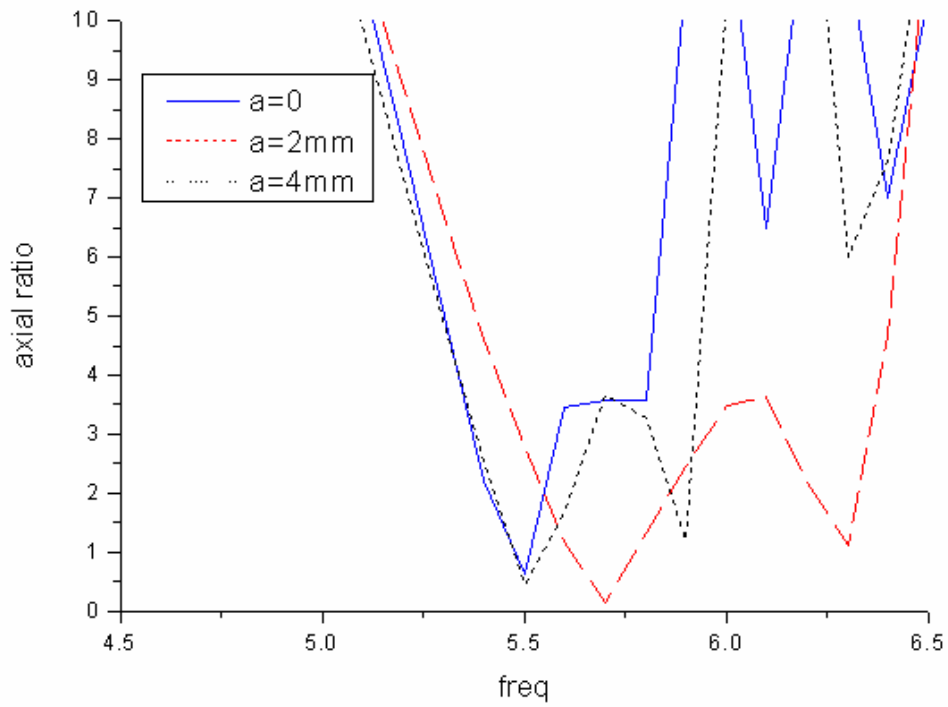
圖十  
八



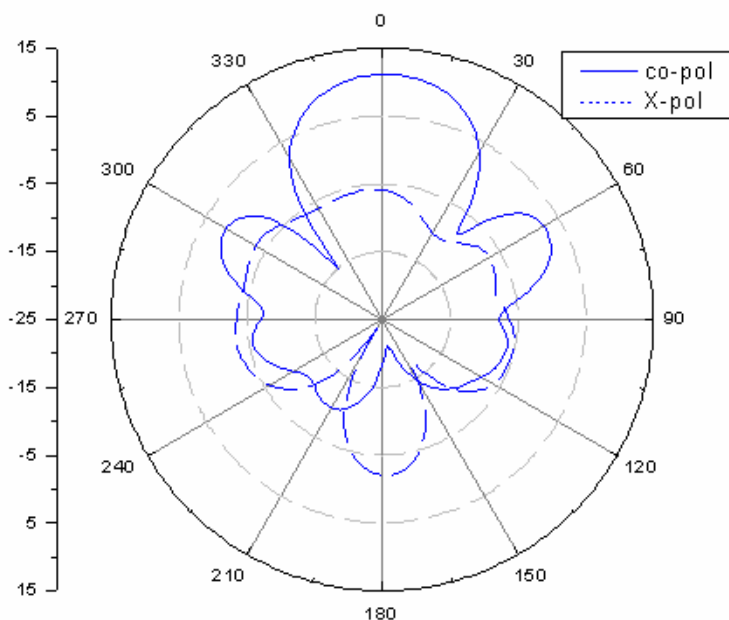
### 中心孔徑大小對 return loss 的影響



圖十九 中心孔徑大小對增益的影響



圖二十 中心孔徑大小對 axial ratio 的影響



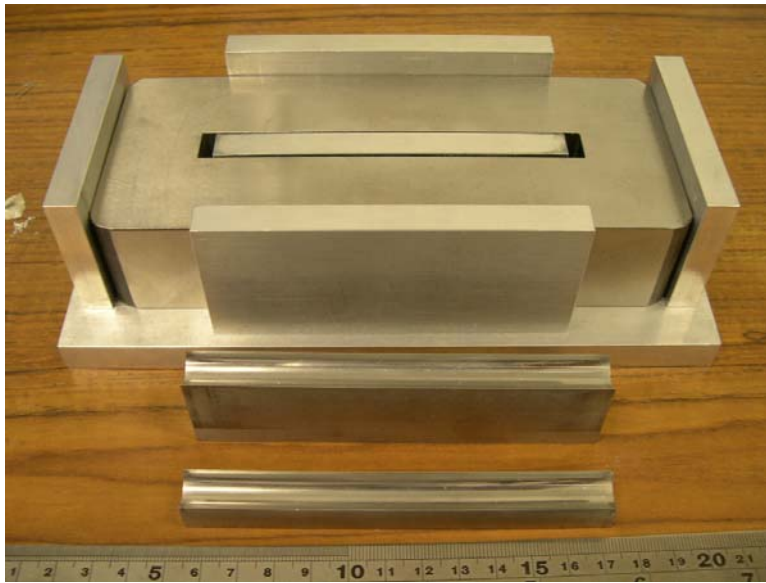
圖二十一 負載環型介電質螺旋天線 5.9GHz 的輻射場形圖

#### 四、 模擬與量測結果的比較

因為該天線的製作需要一個介電常數 20 的圓柱狀介電質，因此我們先訂作一個如圖二十二的鋼模，然後請工研院材料所幫忙，教導陶瓷材料的製作。利用該模具可壓出一個直徑 10mm 橫放的長圓柱，再經過燒結和研磨的過程，可作出我們所需求直徑 8mm 的介電圓柱。而由於燒製時壓力的問題，因此目前我們還無法自己製作環狀的圓柱介電質。接著則要將螺旋狀的金屬線附著在介電圓柱上，最好的方法是利用電鍍的方法將金屬鍍上去，可保證附著得最密合，且尺寸也較吻合模擬的結果，但因為時間和成本的問題，因此先剪裁銅片貼紙來替代。再加上反射板後，整個天線的模型如圖二十三及圖二十四，兩個圖分別是長度 4cm 和 8cm 的圓柱，靠近底部階繞上三圈的金屬。

圖二十五為天線長度 4cm 的 return loss 圖，實驗與模擬的趨勢雖然類似，但頻寬縮小了 400MHz 左右；圖二十六是增益的頻率響應圖，可看出頻段內的增益比模擬小了 5dB，只有約 6dBi 左右，且頻寬小很多；圖二十七是 axial ratio 圖，發現實驗的圓極化效果很差，因此長度 4cm 的實驗結果完全沒有達我們所預期。接著觀察天線長度 8cm 的實驗結果，圖二十八是 return loss 圖，頻寬也是一樣縮小，且稍微往高頻偏移；圖二十九是增益頻率響應，同樣也是頻寬縮小並往高頻偏，但最大增益只比模擬小 2dB 左右，達到接近 11dBi；圖三十是 axial ratio 圖，也是頻寬縮小且往高頻偏移的狀態，因此長度 8cm 的部分整體來說誤差比較小，但也不符合我們所預期的結果。

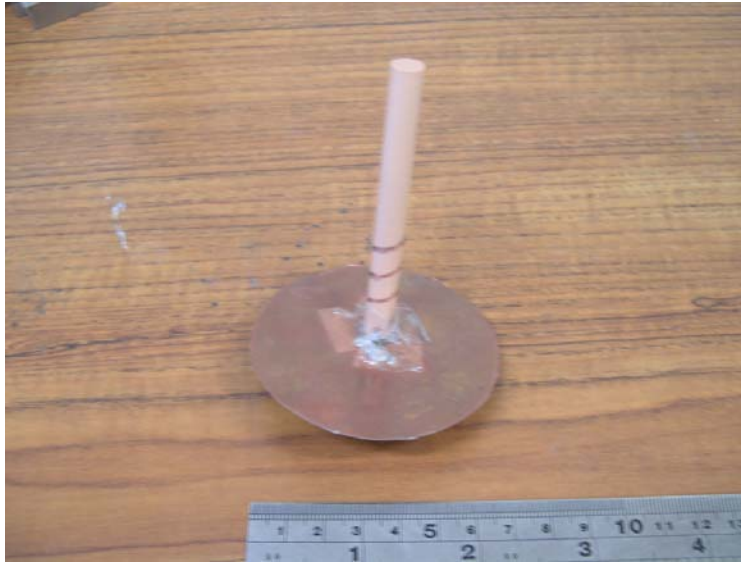
為了解實驗失敗的原因，我們先觀察模擬的模型圖，經過仔細對照後，發現天線的介電質與金屬間有 0.36mm 的小縫隙，如圖三十一所示，而實作時由於是使用金屬貼紙來附著的，因此與介電圓柱的間隙可能有所不同，進而影響了阻抗匹配，使得實驗結果誤差很大。其他的原因，如實作的介電質不保證整個長度都維持在介電常數 20；另一方面，由於天線體積小，對外來的因素也較敏感，因此螺旋狀金屬的剪裁和饋入點的焊接等手工實作上的誤差，對天線的影響都很大。



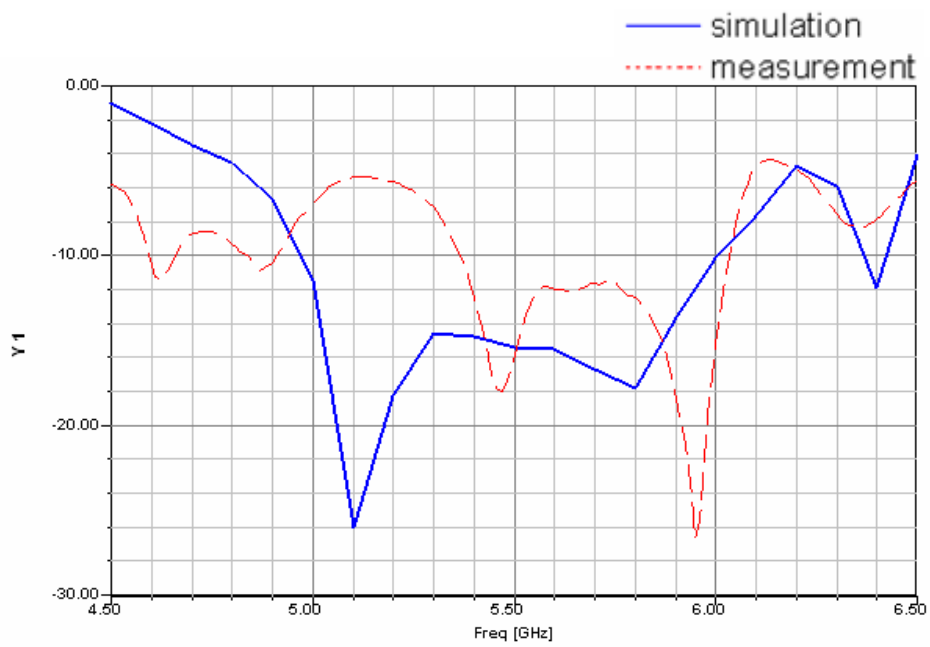
圖二十二 壓製圓柱陶瓷材料用的模具



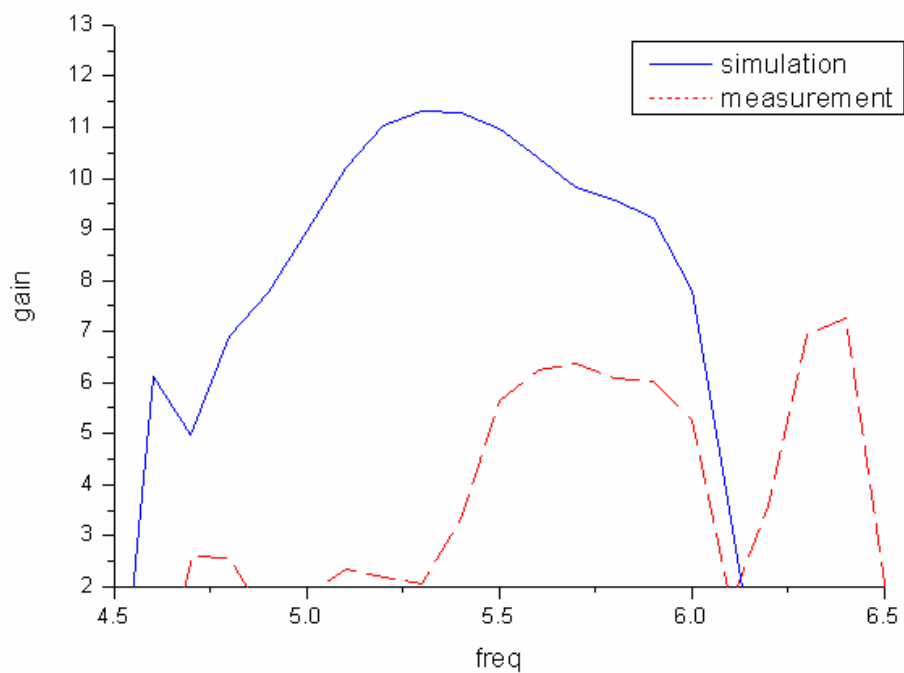
圖二十三 負載介電質之螺旋天線實圖(長度 4cm)



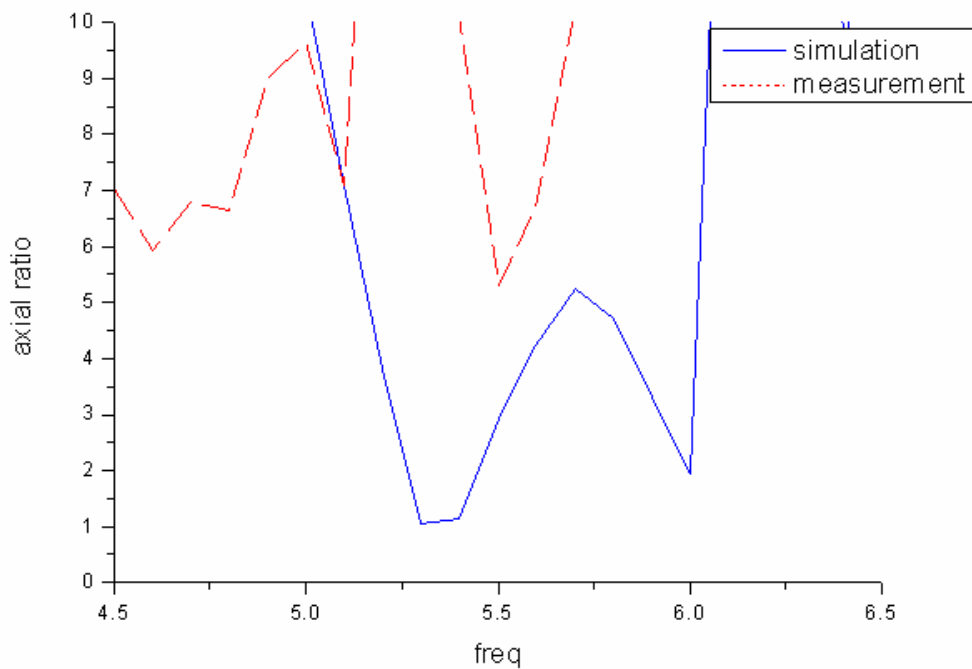
圖二十四 負載介電質之螺旋天線實圖(長度 6cm)



圖二十五 天線長度 4cm 的 return loss 圖

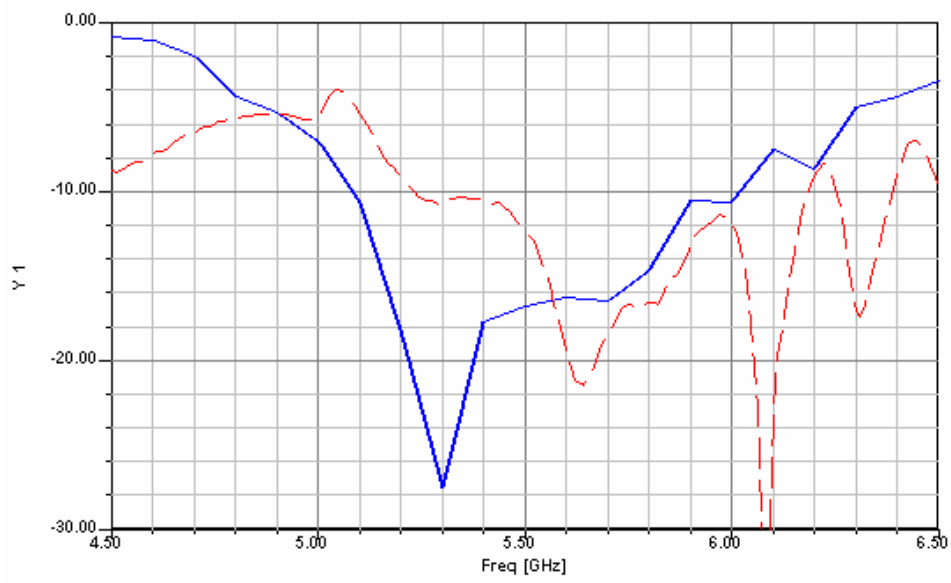


圖二十六 天線長度 4cm 的增益對頻率圖

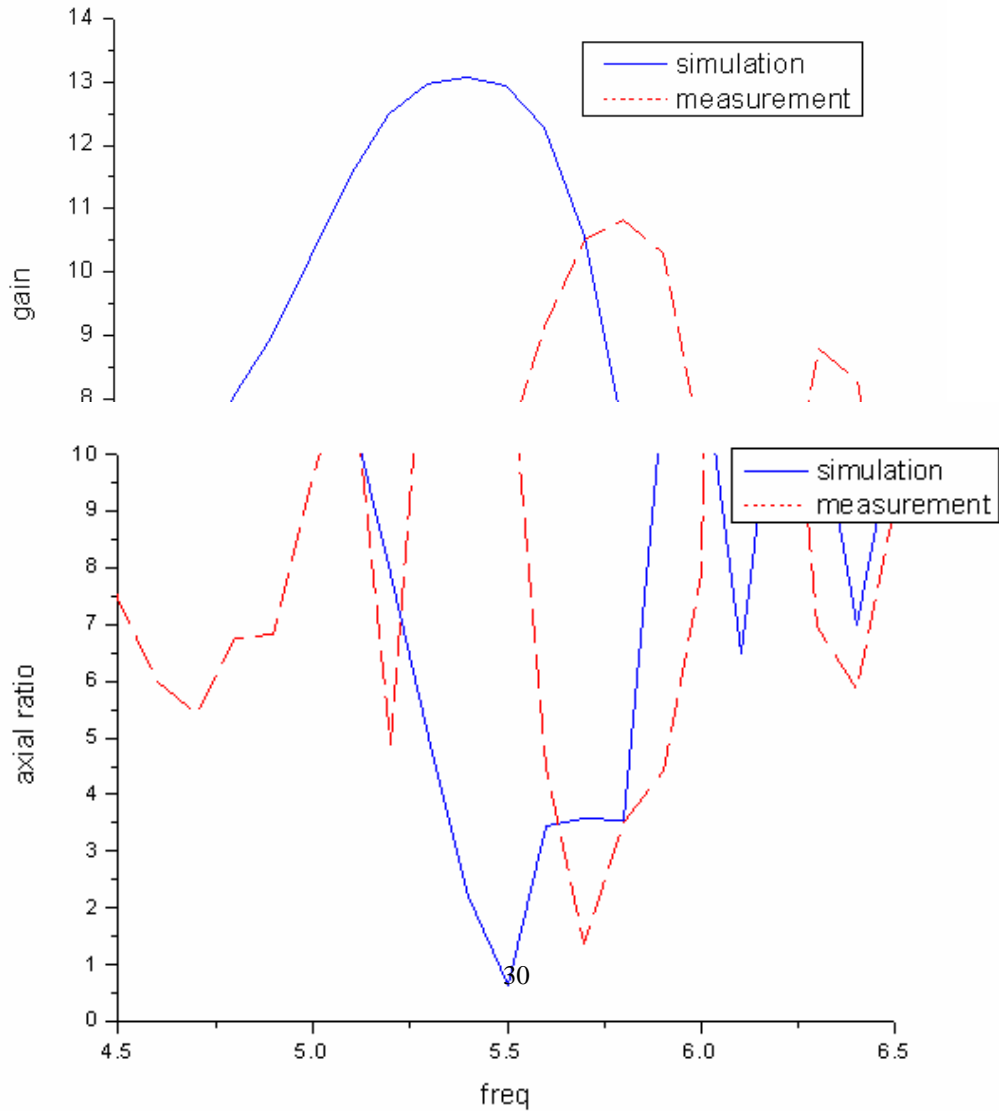


圖二十七 天線長度 4cm 的 axial ratio 圖

— simulation  
 - - - measurement

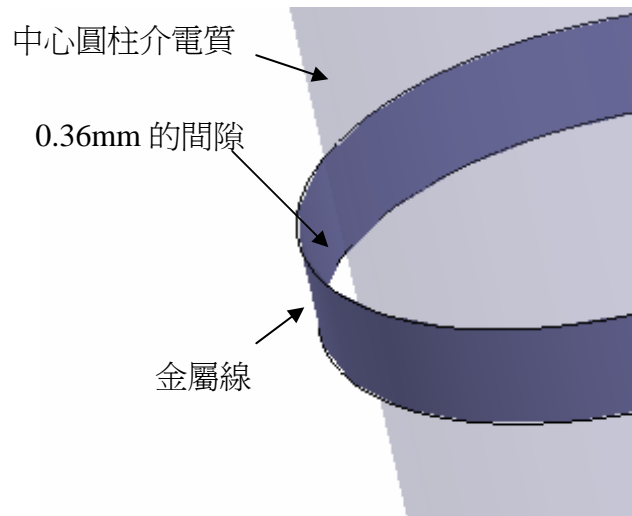


圖二十八 天線長度 8cm 的 return loss 圖



## 十九 天線長度 8cm 的增益對頻率圖

圖三十 天線長度 8cm 的 axial ratio 圖



圖三十一 模擬時金屬與介電質間的空隙

## 五、結論

1. 本研究提出一縮小化圓極化高增益之軸模螺旋介質天線。
2. 本研究完成定量分析, 研究下列參數對天線效能之影響評估:
  - 1). 介電常數
  - 2). 圓柱高度
  - 3). 螺旋圈數
  - 4). 環形結構之內徑



3. 本研究所設計的天線可應用在點對點寬頻高速傳輸之無線通訊。