

109年青少年科學人才培育計畫

研究計畫封面

科 別：物理與天文學科

計畫名稱：自製2.4GHz 微帶天線建構訊號收發系統

關鍵詞3個：微帶天線、Wi-fi 頻段、訊號量測

編 號：(由本館填寫)

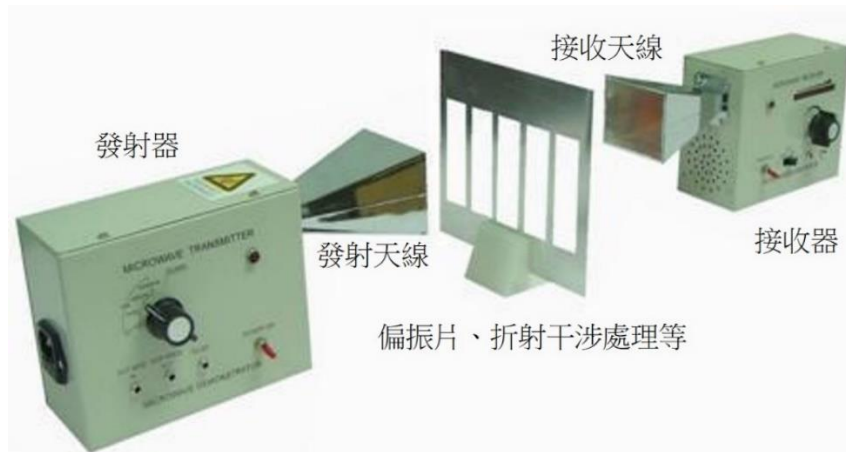
摘要

本實驗展望是完成一組電磁波接收發射系統，以供普通高中學生進行電磁波實驗使用。為了達成這個目的，首先選用了適當頻段的天線，為了使實驗裝置大小不會過大或過小，因此設定頻段與 Wi-fi 頻段同為 2.4GHz，讓波長是公分等級；接著選用微帶天線（Microstrip Patch Antenna），優點是材料便宜以及方便利用蝕刻完成後續電路處理。確定所需的天線參數之後開始透過電磁模擬軟體模擬、調整，再針對模擬進行實作與量測，以及作成陣列結構提高指向性，方便在未來實驗時，數據變化更為明顯。目前研究進度已將所需天線設計完畢，未來即可著手於接收發射裝置，完成基本收發系統，進而即可模擬光學實驗的干涉、折射等處理，完成電磁波實驗裝置。

壹、研究動機

通訊產業在資訊科技爆炸的這個世代已經趨於成熟，要在這個領域的技術上發展出更新的突破有一定難度。但是在應用的部分尚可以更深入的探索，使通訊系統、天線訊號充滿人們的日常，為生活帶來便利，亦可內化到高中課業當中，讓更多中學生不會對電波、通訊領域感到陌生與害怕。

然而看到高中課綱使用的電磁波實驗器材費用一組約為七萬（裝置圖如下圖所示），價格相當昂貴，讓多數學校無法負荷此經費，於是希望能夠自己能夠完全自製一組能夠達到同樣效果的實驗器材，並且選用較低廉價格的材料，期望能夠應用在高中實驗當中，節省經費的使用。



圖：高中電磁波實驗器材

貳、研究目的及研究問題

- 一、利用 HFSS 電磁模擬軟體模擬所需的微帶天線，並以水平自走式蝕刻機實際製作模擬的天線
- 二、量測實際製成天線的輻射場型、功率轉移比等數據，與模擬比較並修正。
- 三、將天線製成陣列，提高指向性，以利日後量測。
- 四、將天線接上自製的發射器與接收器，並在中間做偏振、折射干涉等處理。
- 五、完成自製電磁波收發系統實驗組。

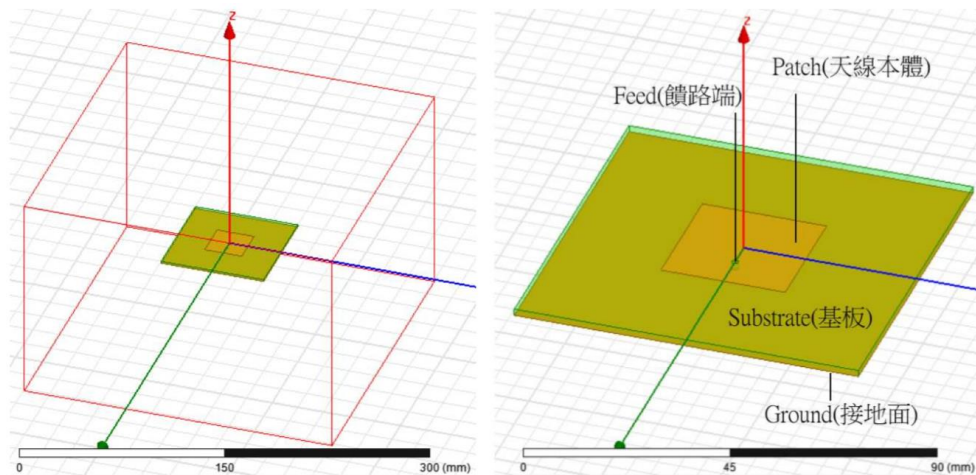
參、研究設備及器材

電腦、電磁模擬軟體 HFSS v15.0、影印機、描圖紙、真空雙面曝光機、鍍銅 FR4 epoxy 板（感光電路板）、酒精、清水、感光顯像劑、水平自走式蝕刻機、蝕刻用氯化銅（ CuCl_2 ）、焊接設備、熱風槍、SMA 接頭（母）、PNA Series Network Analyzer（網路分析儀）、無反射實驗室、LNA2-3G-40DB 低雜訊放大器、NSR201MX 二極體/RF 檢測器。

肆、研究過程或方法及進行步驟

一、模擬天線

模擬天線所使用的電磁模擬軟體為 HFSS v15.0，根據頻率以及邊際效應等理論，設定所需要的參數（材質、大小等），生成符合需求的微帶天線（Microstrip Patch Antenna，左圖包含輻射空間，右圖是天線本體）



圖：模擬的微帶天線外觀

其中設定的數據如下表所示，內容包含 Patch（天線本體）、Ground（接地面）、Substrate（基板）、Feed（饋路端）：

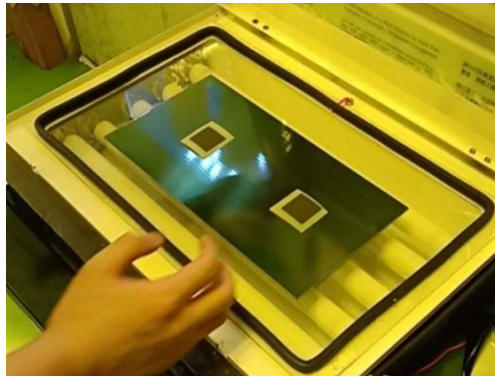
	Substrate (基板)	Feed (饋路端)	Patch (天線本體)	Ground (底板)
長 (mm)	80	0	28.9	80
寬 (mm)	80	1.6	28.9	80
高 (mm)	1.6	1.6	0	0
Material	FR4 epoxy	Lumped Port	Copper	Copper

表：模擬設定數據資料

接著模擬分析 (Analyze)，數據附於測量結果，並在下文結論說明。

二、實作天線

將模擬好的天線匯出成 AutoCAD 檔，並且列印在描圖紙上，並將描圖紙固定在製作天線材料的 FR4 epoxy 金屬板上。



圖：曝光機使用

因為油墨不平均，可能會導致需保留的金屬被洗去，所以利用麥可筆加深，確保曝光機光罩完整保留需要保留的金屬。

在曝光一分鐘之後，撕去描圖紙，並利用感光劑洗去受過曝光機曝光而脫落的金屬，再用清水將感光劑清除，第一次風乾。

接著以水平自走式蝕刻機蝕刻金屬板，再第二次風乾。

最後裁切 FR4 epoxy 板至符合模擬的基板大小，洗去背面金屬，第三次風乾。

在預留標記的 Feed 位置焊接 SMA 接頭，天線實作完成，如下圖所示。



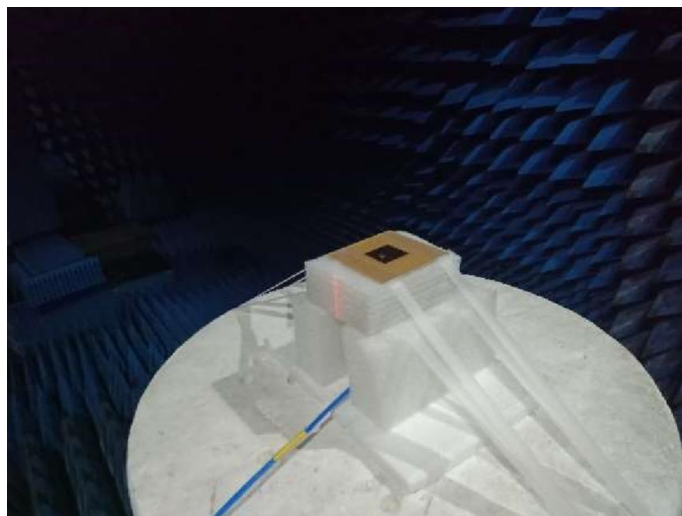
圖：自製微帶天線外觀

三、無反射實驗室量測

無反射實驗室周圍空間都是沾附化學藥劑的海綿，吸收反射訊號，減少因為反射而導致的數據誤差。

但由於每日量測溫度與濕度等環境因素有所不同，因此需要一個參考用天線作為對照組，實驗室選用的參考用天線是 Horn Antenna。

接著便將自己的天線 SMA 接頭接上，再將天線以保利龍塊堆疊至適當高度，進行全方位量測（如下圖），量測數據附在在實驗結果，並在下文結論做分析。



圖：無反射實驗室量測

四、以網路分析儀（PNA Series Network Analyzer）量測兩天線功率轉移比

網路分析儀可以同時作為天線的發射器與接收器，可以測量兩天線的 $S(2, 1)$ 值，即功率轉移比。當兩天線因頻率相同而互相耦合、傳遞訊號時，測量結果便會顯示於儀器屏幕。

這個研究利用網路分析儀探討兩天線距離對於功率轉移比的影響，即操縱變因為距離，應變變因為功率轉移比。我分別測量了 5、10、15、20 公分的數據，附在實驗結果，並在結論中與理論數據比較與討論。

首先先將儀器歸零，確保數據誤差縮小，並且接上單支微帶天線於發射端，測量單支天線的反射係數 $S(1, 1)$ 係數（左圖），並儲存、匯出螢幕上的數據（右圖）。

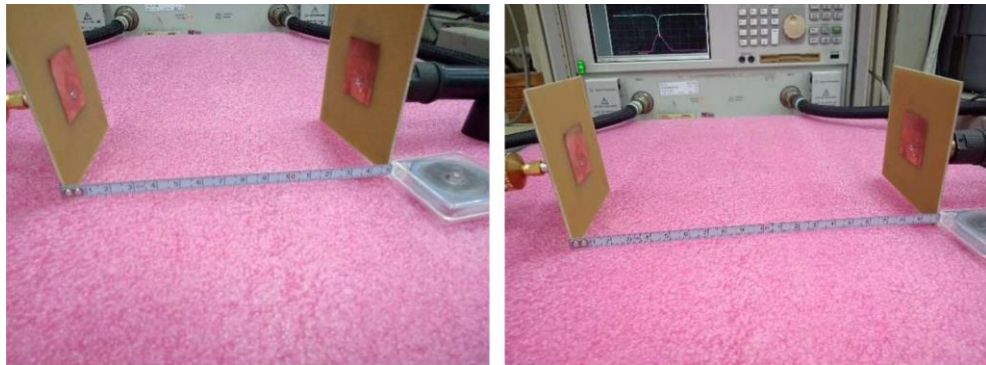


圖：量測單一天線資料照片

接著接上第二支天線於接收端，以捲尺測測量並調控間距於 5、10、15、20 公分（如下圖），並儲存、匯出數據。



左：5cm；右：10cm



左：15cm；右：20cm

圖：量測兩天線訊號收發資料照片

五、陣列結構製程

由於前述天線有指向性差的問題，因此功率轉移比隨距離的變化明顯度不足。為了提升指向性，根據理論製成陣列結構。

首先是模擬上的調整，因為陣列的關係根據理論需要相同饋路長度，礙於微帶天線的平面結構需要將 SMA 接頭字天線背面調整至邊界。

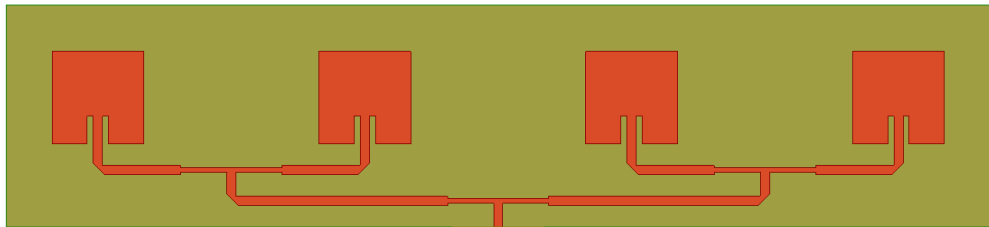
在饋路過程中可能會有訊號傳遞不良的問題，可透過截角改善，示意圖如下（左圖為調整前，中圖為調整後）。

根據理論，為了使天線阻抗匹配，能夠在需要的頻率吸收最多能量、訊號並且輻射，因此在天線本體上挖去兩個凹槽（右圖）。

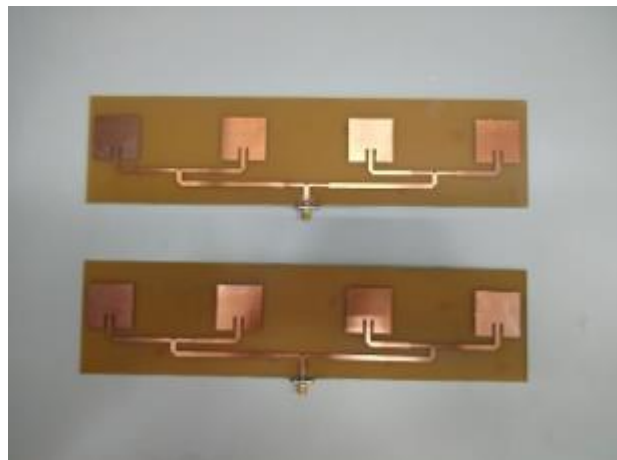


圖：陣列天線設計過程示意圖

陣列天線的實作蝕刻與量測過程與上述過程重複，模擬外觀與實作成品如下圖，SMA 接頭會焊接在下端，量測結果在結論中分析。



圖：陣列天線模擬外觀



圖：自製陣列微帶天線外觀

伍、預期結果、已有初步之結果

一、模擬數據

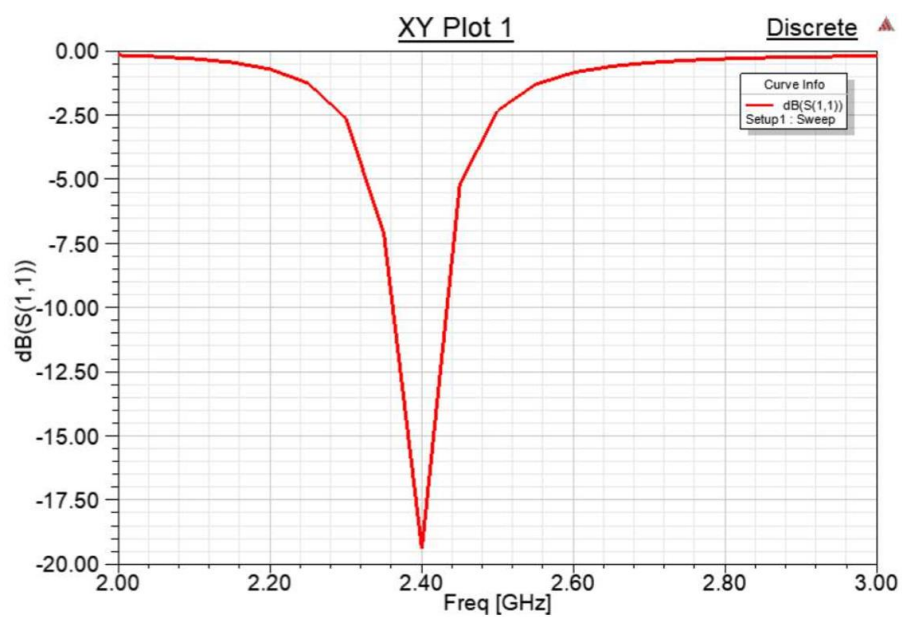
(一) S(1, 1)－頻率關係圖表

S(1, 1)數據指的是從發射器饋路到天線的訊號反射，數據越低表示訊號大多被吸收並輻射，數據越高表示訊號大多被反射至發射器中。

因此理想情況是在所需頻段有足夠低（約為－15dB 以下）的 S(1, 1)數據；在其他頻段則維持高 S(1, 1)值，避免訊號能量的干涉。本天線已調整至在頻率為 2.4GHz 時有最小值－19.4dB，表示天線饋路有成功阻抗匹配。

頻率 (Freq, GHz)	S(1, 1) (dB)	頻率 (Freq, GHz)	S(1, 1) (dB)
2.00	－0.1752	2.50	－2.3205
2.05	－0.2287	2.55	－1.3038
2.10	－0.3128	2.60	－0.8459
2.15	－0.4544	2.65	－0.6045
2.20	－0.7149	2.70	－0.4628
2.25	－1.2589	2.75	－0.3732
2.30	－2.6228	2.80	－0.3134
2.35	－7.1212	2.85	－0.2719
2.40	－19.3761	2.90	－0.2424
2.45	－5.1892	2.95	－0.2211

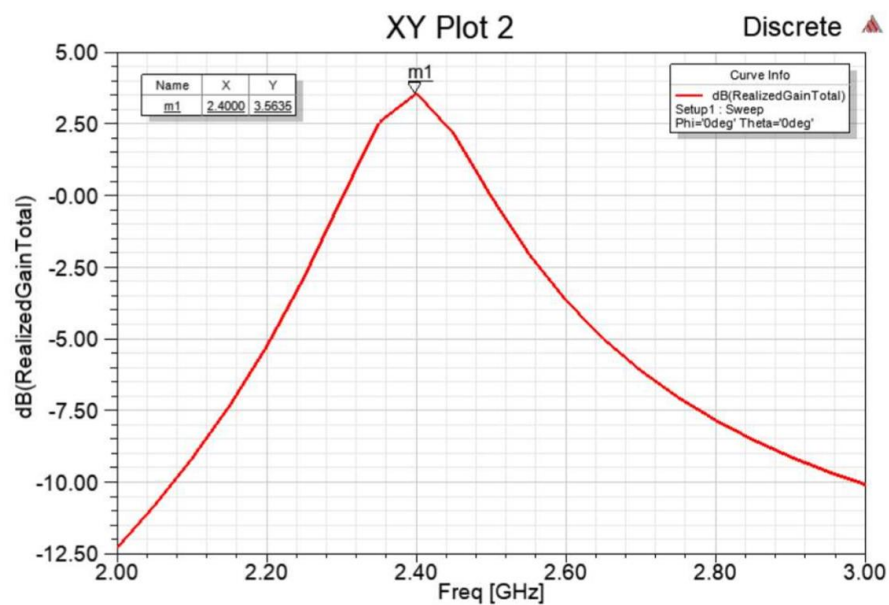
表：S(1, 1)－頻率關係表



圖：S(1,1)－頻率關係圖

(二) 增益－頻率關係圖

增益指的是天線最強輻射方向強度與參考天線的比值，增益越大表示在最強輻射方向的輻射強度越強。

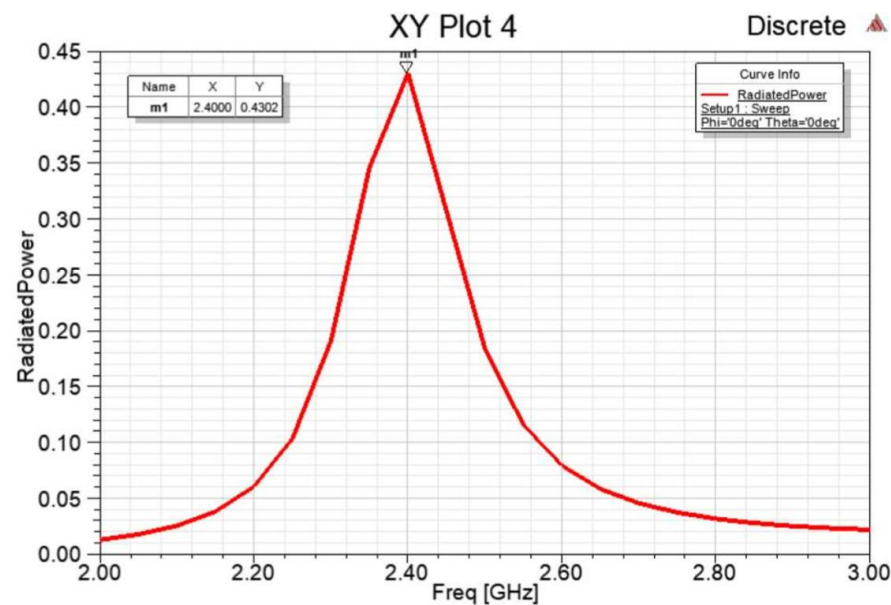


圖：增益－頻率關係圖

(三) 效率－頻率關係圖

天線效率是指天線輻射出去的功率和輸入到天線的功率之比，比值

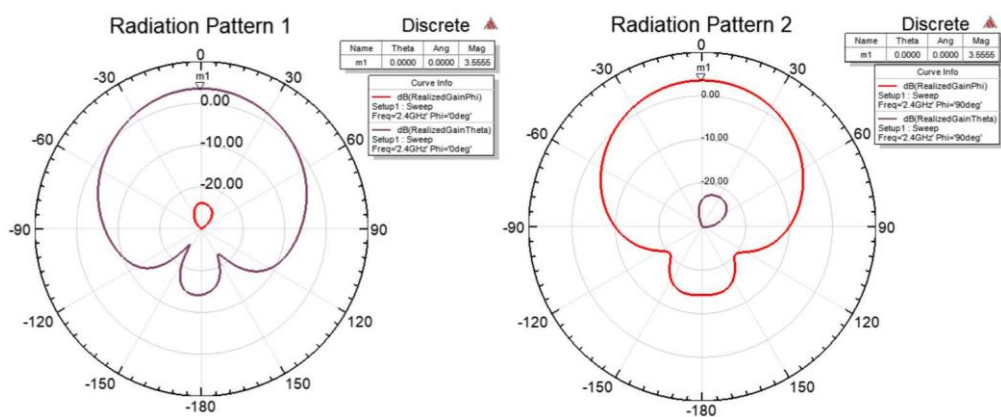
越大越好。



圖：效率－頻率關係圖

(四) 輻射場型圖

輻射場型圖可以看出天線的增益以及輻射能量在各方向的強度。若各方向強度差不多，圖形近似圓形，表示指向性差。左圖為 0 度方向，右圖為 90 度方向。

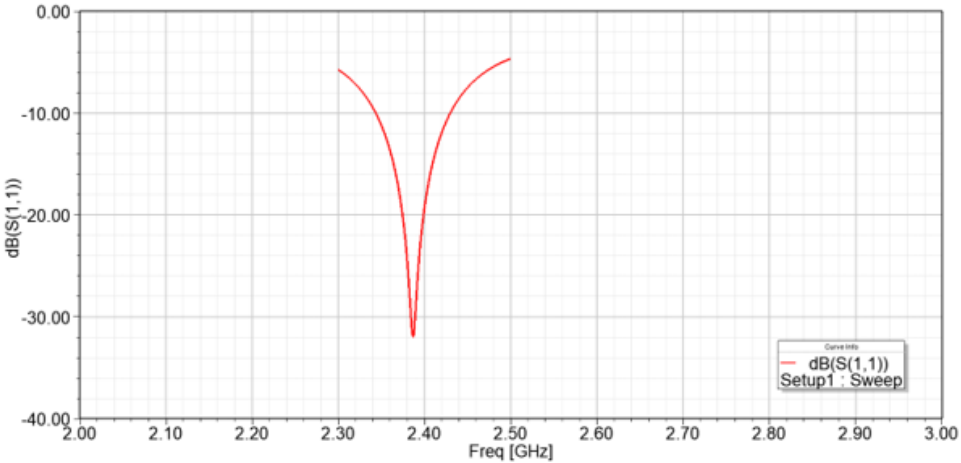


圖：輻射場型圖。左圖為 0 度方向，右圖為 90 度方向。

(五) 陣列結構的模擬數據圖

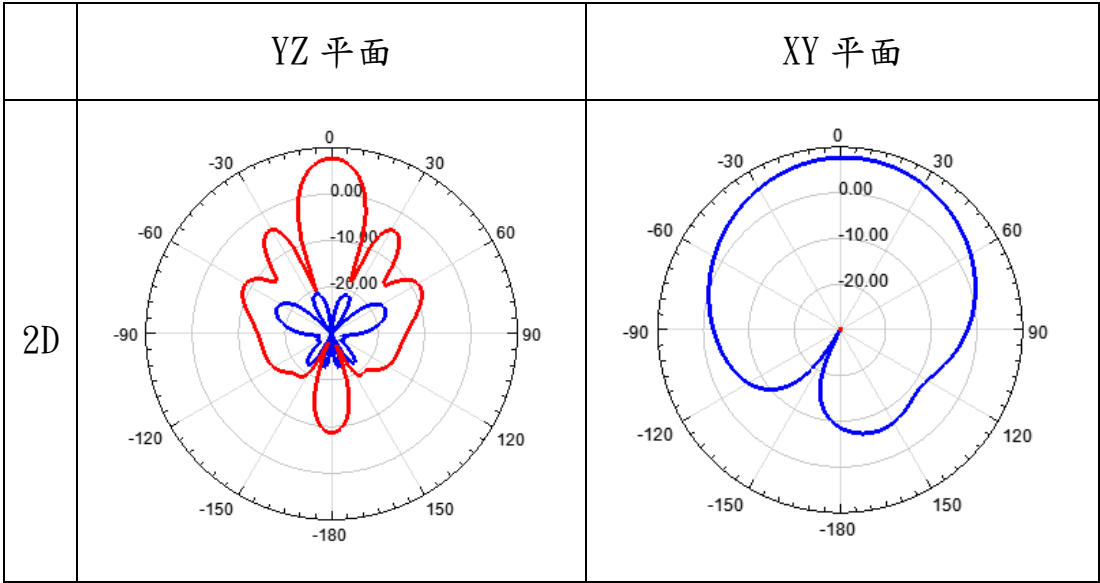
1. S(1,1)－頻率關係圖表

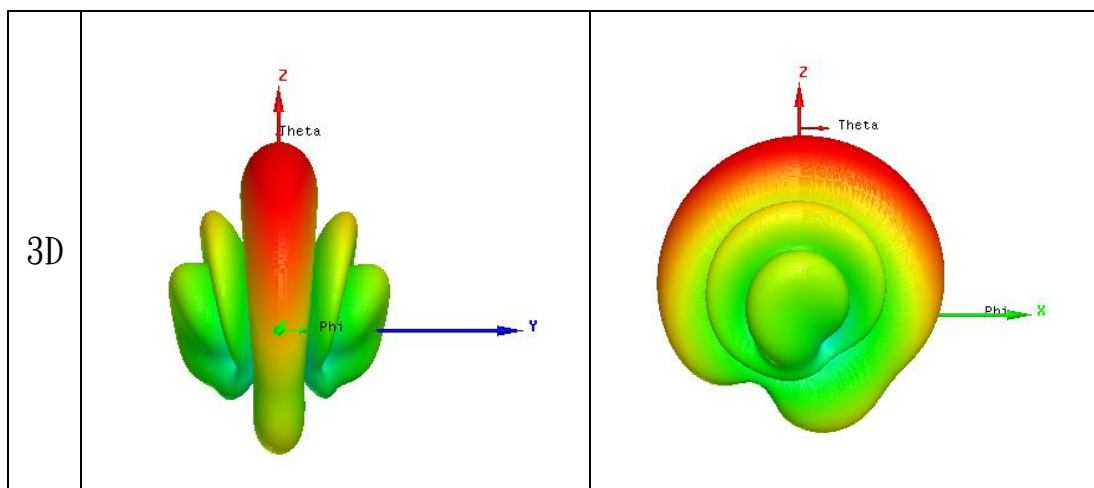
頻率 (Freq, GHz)	S(1, 1) (dB)	頻率 (Freq, GHz)	S(1, 1) (dB)
2.31	-6.38485	2.41	-14.6759
2.32	-7.17343	2.42	-11.8851
2.33	-8.17629	2.43	-9.95629
2.34	-9.47986	2.44	-8.54554
2.35	-11.2281	2.45	-7.47675
2.36	-13.6908	2.46	-6.64594
2.37	-17.4866	2.47	-5.98654
2.38	-24.6549	2.48	-5.4539
2.39	-28.5967	2.49	-5.01728
2.4	-19.1894	2.5	-4.65518



圖：陣列天線 S(1,1)－頻率關係圖

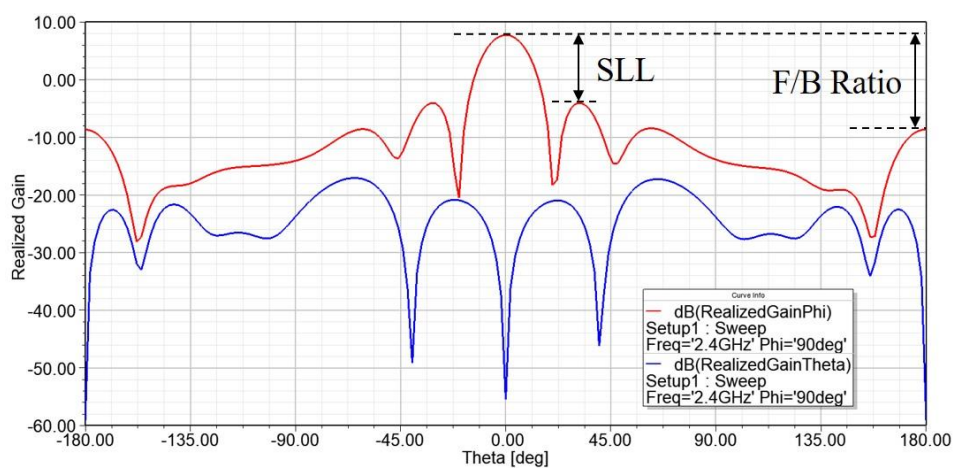
2. 2D、3D 輻射場型圖



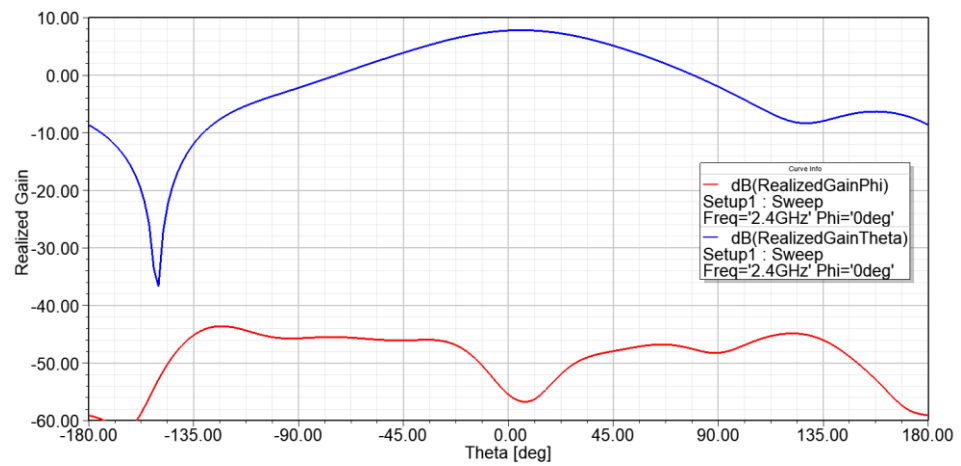


3. 輻射場型圖分析圖

由 YZ 平面輻射場型圖分析圖可知，垂直方向（藍線）大多在 -20dB 以下，這是微帶天線本身的特性，模擬無誤。而 SLL（Side Lobe Level）為 11.8dB，F/B ratio 為 15.7dB，根據參考資料可知模擬結果合理。



圖：YZ 平面輻射場型圖分析圖

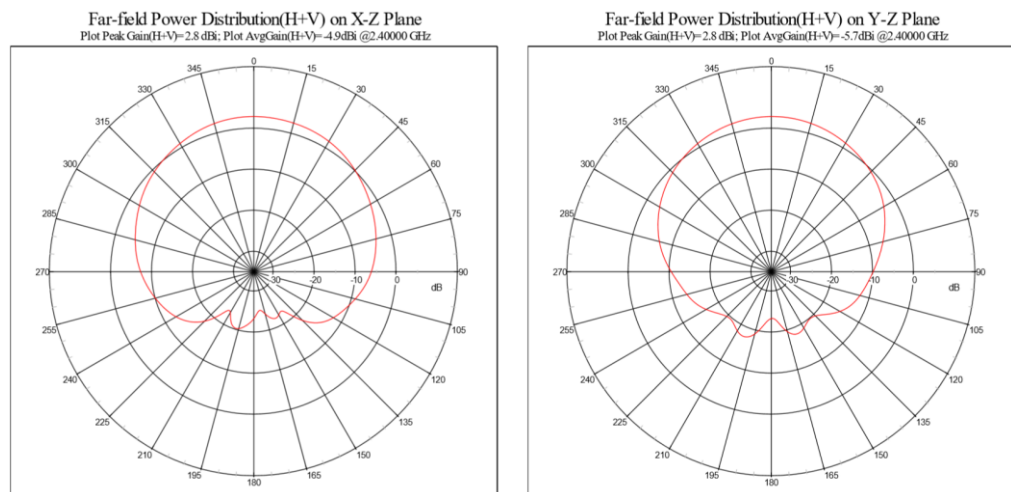


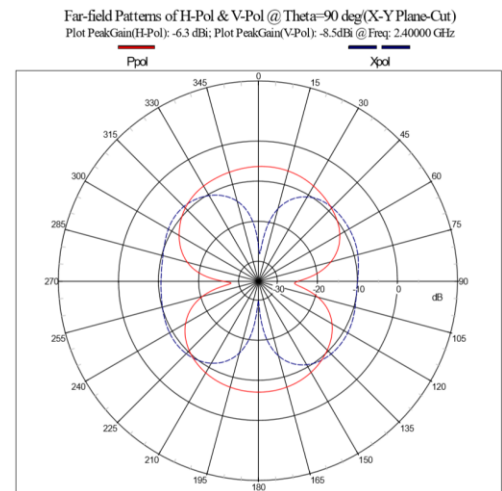
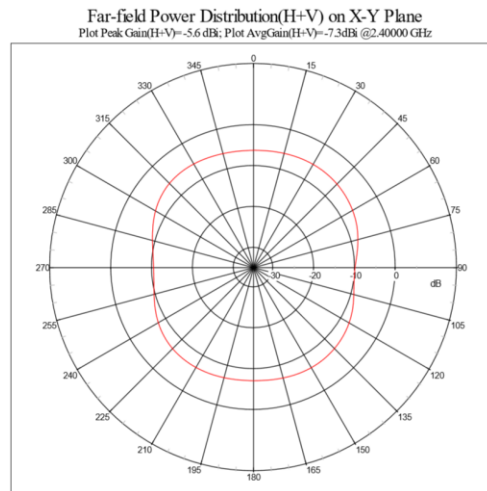
圖：XY 平面輻射場型圖分析圖

二、無反射實驗室量測數據

(一) 輻射場型圖

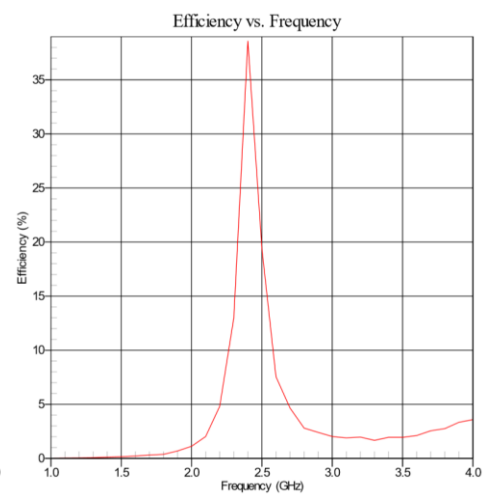
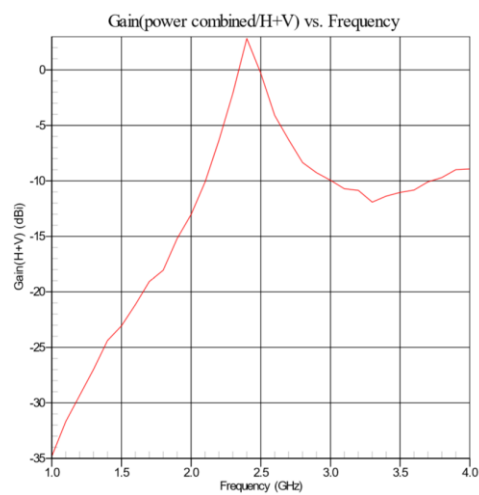
這裡的四張圖分別是 X-Y 平面、X-Z 平面、Y-Z 平面的輻射場型最大值圖，其中第四張圖是第三張圖兩方向疊合前的場型圖。





圖：無反射實驗室測量輻射場型圖

(二) 增益—頻率關係圖 (左) 與效率—頻率關係圖 (右)



圖：無反射實驗室測量資料

(三) 數據總表

Frequency (MHz)	X-Z plane (Phi=0) (H+V; dBi)		Y-Z plane (Phi=90) (H+V; dBi)		X-Y plane (Theta=90) (H+V; dBi)		Gain-3D (H+V;dBi)	Upper- Hemisphere- Avg-Gain (H+V: dBi)	Lower- Hemisphere- Avg-Gain (H+V: dBi)	Efficiency (H+V/%)
	Peak-Gain	Avg. Gain	Peak-Gain	Avg. Gain	Peak-Gain	Avg. Gain				
1100	-32.1	-35.4	-32.4	-35	-35.1	-36	-31.7	-37	-39.7	0
1200	-29.7	-33.8	-30.1	-33.1	-33.1	-34.5	-29.3	-34.9	-38.7	0
1300	-27.2	-32.4	-27.4	-31.3	-31.4	-33	-27	-32.9	-37.8	0
1400	-24.8	-30.4	-25.1	-29.2	-29.5	-31.1	-24.4	-30.6	-36.2	0
1500	-23.7	-29.2	-23.6	-28.2	-28.5	-29.9	-23.1	-29.2	-35.5	0
1600	-21.3	-27.7	-21.3	-26.7	-27.2	-28.4	-21.2	-27.6	-34.5	0
1700	-19.4	-26.2	-19.6	-25.2	-25.6	-27	-19.1	-25.9	-33.4	0
1800	-18.4	-25.3	-18.5	-24.6	-25	-26.3	-18	-25	-33.1	0
1900	-15.5	-22.7	-15.8	-22.1	-22.5	-23.8	-15.2	-22.3	-30.7	1
2000	-13.2	-20.5	-13.2	-20.2	-20.6	-21.9	-13	-20.1	-29	1
2100	-10.3	-17.9	-10.4	-17.9	-18.3	-19.6	-10.1	-17.5	-26.9	2
2200	-6.5	-14.1	-6.7	-14.3	-14.7	-16.1	-6.3	-13.7	-23.4	5
2300	-2.1	-9.8	-2.1	-10.2	-10.5	-11.9	-2.1	-9.3	-19.2	13
2400	2.8	-4.9	2.8	-5.7	-5.6	-7.3	2.8	-4.6	-14.7	39
2500	-0.3	-7.9	-0.3	-8.8	-8.6	-10.4	-0.3	-7.6	-17.5	19
2600	-4.1	-11.9	-4.2	-12.9	-12.6	-14.5	-4.1	-11.7	-21.5	8
2700	-6.3	-14.1	-6.5	-14.9	-14.8	-16.5	-6.3	-13.8	-23.2	5
2800	-8.4	-16.3	-8.8	-16.8	-17	-18.7	-8.3	-16.1	-24.9	3
2900	-9.3	-17.1	-9.7	-17.2	-17.7	-19.3	-9.3	-16.8	-25.2	2
3000	-10	-18	-10.5	-17.6	-18.5	-20	-9.9	-17.6	-25.7	2
3100	-10.7	-18.5	-11.1	-17.6	-19.1	-20.2	-10.7	-17.9	-25.7	2
3200	-11	-18.5	-11.1	-17.1	-19	-20	-10.9	-17.8	-25.4	2
3300	-12.5	-19.5	-11.9	-17.6	-19.4	-20.7	-11.9	-18.5	-26.2	2
3400	-12.5	-19	-11.4	-16.9	-18.3	-20	-11.4	-17.9	-25.5	2
3500	-12.7	-19.1	-11	-16.9	-17.7	-19.8	-11	-17.9	-25.6	2
3600	-12.6	-19.2	-10.8	-16.5	-17	-19.1	-10.8	-17.5	-25.2	2
3700	-11.8	-18.8	-10.1	-15.9	-15.4	-17.9	-10.1	-16.7	-24.2	3
3800	-11.9	-19	-9.7	-15.6	-14.5	-17.2	-9.7	-16.5	-23.6	3
3900	-12	-18.7	-9.1	-15	-13.2	-16	-9	-15.7	-22.4	3
4000	-12.8	-19	-9.1	-14.8	-12.6	-15.4	-8.9	-15.5	-21.8	4

表：無反射實驗室量測數據表

三、網路分析儀測量反射係數、功率轉移比

(一) 單一天線發射情況 (反射係數)

由表 (節錄) 可知由於實作材質緣故， $S(1, 1)$ 有些頻偏，最小值出現在 2.41GHz，為 -19.6dB 。

Freq (GHz)	$S(1, 1)$	Freq (GHz)	$S(1, 1)$
2.2	-0.695	2.41	-19.58
2.215	-0.821	2.425	-13
2.23	-0.98	2.44	-8.616
2.245	-1.079	2.455	-6.066
2.26	-1.281	2.47	-4.541
2.275	-1.489	2.485	-3.419
2.29	-1.839	2.5	-2.737
2.305	-2.22	2.515	-2.236
2.32	-2.811	2.53	-1.808
2.335	-3.604	2.545	-1.523
2.35	-4.826	2.56	-1.338
2.365	-6.729	2.575	-1.152
2.38	-9.708	2.59	-1.003
2.395	-14.88	2.605	-0.904

表：單一天線 $S(1, 1)$ —頻率關係表

而由表繪製而成的圖可知本次實作天線數據合理，在 2.4GHz 有最小值 -18.4dB ，與模擬值比較僅增加 1dB。



圖：單一天線 $S(1,1)$ —頻率關係圖

(二) 兩天線互相耦合訊號收發的功率轉移比

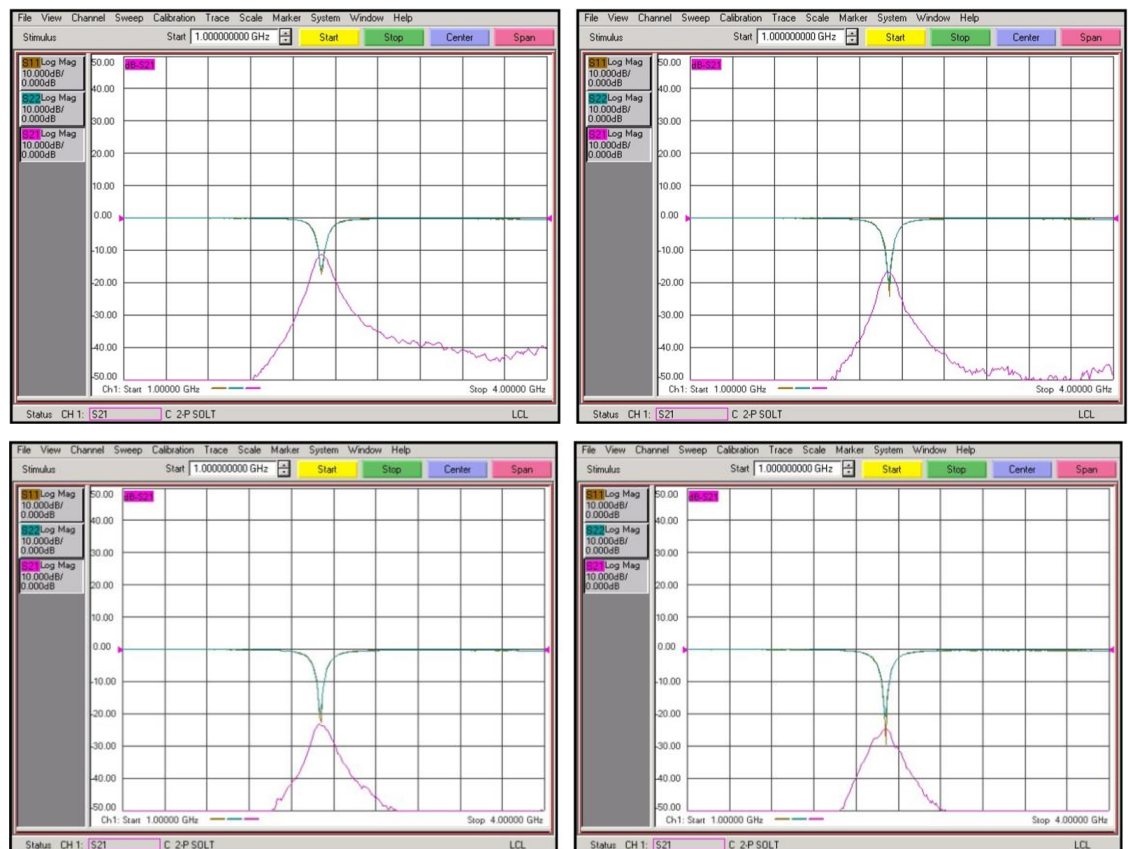
本實驗共有四組數據，探討的是距離與功率轉移比的關係，作為操縱變因的距離做了四組實驗，分別是 5cm、10cm、15cm、20cm 四組數據，其測量結果如下列表格所示（節錄），以及下圖（粉色線）所示。

$S(2,1)$ （功率轉移比）的單位為 dB。

Freq (GHz)	5cm $S(2,1)$	10cm $S(2,1)$	15cm $S(2,1)$	20cm $S(2,1)$
2.27	-25.17775	-31.31395	-36.63374	-34.08699
2.28	-24.24156	-30.20365	-35.61209	-32.75334
2.29	-23.07351	-29.06072	-34.20942	-31.36642
2.3	-21.77797	-28.08714	-33.27304	-29.83347
2.31	-20.29383	-26.37453	-32.13063	-28.48100
2.32	-18.72602	-24.67327	-30.57929	-27.75625
2.33	-17.27355	-22.95672	-29.26947	-27.29349
2.34	-16.00514	-21.44278	-27.65849	-27.48189
2.35	-14.76864	-20.35295	-26.06630	-27.33931
2.36	-13.71576	-19.16079	-24.73684	-27.25767
2.37	-12.77143	-18.14984	-23.89997	-26.84860
2.38	-12.09217	-17.38305	-23.08116	-26.37918

2.39	-11.60898	-16.91599	-22.55536	-25.59291
2.4	-11.45278	-16.82597	-22.62555	-25.26050
2.41	-11.56117	-17.05147	-22.91444	-25.40096
2.42	-11.90203	-17.30920	-22.79481	-25.43746
2.43	-12.35617	-17.89966	-22.7948	-25.72056
2.44	-13.01631	-18.53494	-23.24049	-26.10352
2.45	-13.86834	-19.23516	-23.88345	-27.08205
2.46	-15.07564	-20.29437	-24.5642	-28.38649
2.47	-16.34651	-21.71573	-25.75143	-29.83286
2.48	-17.50979	-23.23422	-27.02506	-30.75543
2.49	-18.45580	-24.41522	-28.07924	-31.06003
2.50	-19.42469	-25.36482	-28.96089	-31.77062

表：兩天線功率轉移比－頻率關係表



圖：兩天線功率轉移比－頻率關係圖（5cm、10cm、15cm、20cm）

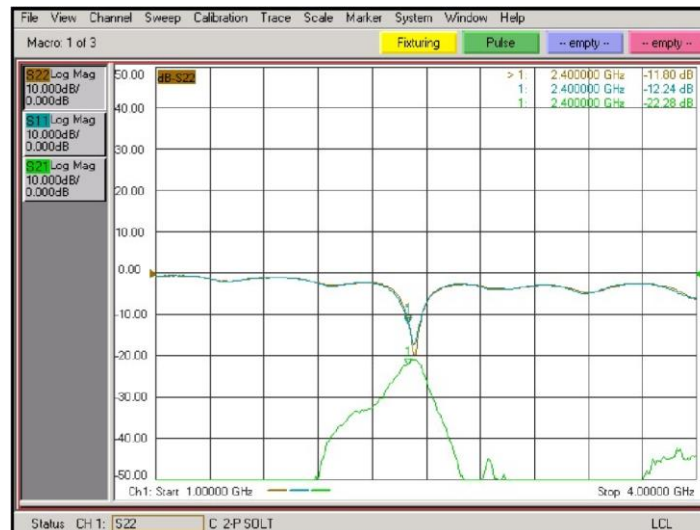
（三）製成陣列結構天線的 $S(1,1)$ 、20cm $S(2,1)$ 數據

本實驗改以設計好並實作完畢的陣列天線取代前述實驗所使用的單

一微帶天線，觀察天線製成陣列之後的頻偏現象，以及天線耦合時的功率轉移比變化。由附表（節錄）數據可知：極值發生在 2.43～2.44GHz 位置，與原先設定的 2.4GHz 有 0.03～0.04GHz 的頻偏現象，所屬合理。

Freq (GHz)	S(1, 1)	20cm S(2, 1)
2.27	-3.307963	-29.35985
2.28	-3.508101	-28.30498
2.29	-3.760139	-27.65748
2.3	-4.070039	-27.1389
2.31	-4.459926	-26.76665
2.32	-4.914896	-26.18728
2.33	-5.391785	-25.46252
2.34	-6.038735	-24.69573
2.35	-6.777274	-24.13409
2.36	-7.684448	-23.41915
2.37	-8.696782	-22.88485
2.38	-9.852062	-22.46707
2.39	-11.08419	-22.14022
2.4	-12.51696	-21.96766
2.41	-14.37709	-21.31087
2.42	-16.34692	-21.04379
2.43	-17.67497	-21.02735
2.44	-17.0244	-20.95558
2.45	-15.11933	-21.23533
2.46	-13.0251	-21.80511
2.47	-11.1376	-22.45273
2.48	-9.641954	-23.51287
2.49	-8.379379	-24.6017
2.5	-7.28831	-25.96517

表：兩陣列天線功率轉移比－頻率關係表



圖：兩陣列天線功率轉移比—頻率關係圖

四、結果討論與理論分析

(一) 天線的種類與頻率的選定

1. 微帶天線 (Microstrip Patch Antenna) 的選定

雖然微帶天線之於其他天線諸如環形電感天線、偶極天線來說比較陌生，但是選定微帶天線的原因主要有下列兩點：

(1) 材料常見且價格相對低廉

微帶天線所使用的材料為鍍銅 FR4 epoxy 環氧樹脂玻璃板，在市面上常見，比起電磁波實驗所使用的號角天線價格相對低廉，卻也能經過設計後達到良好效果。

(2) 後續電路處理相對容易

因為使用了鍍銅 FR4 epoxy 環氧樹脂玻璃板，後續如二極體 RC 整流電路皆可使用蝕刻的方式處理，在高頻的阻抗匹配處理可以達到良好效果，而不須利用電路板、麵包板等元

件處理，造成過多能量損耗。

2. 2.4GHz 頻段的選定

由於 2.4GHz 頻段相當高，因此部分阻抗匹配處理需減少損耗，但是選用此頻段的原因有以下兩點：

(1) 實驗系統大小適中

根據計算可得出此電磁波的波長為 12.5 公分，使得未來的發射接收基本系統能夠在實驗桌上完成，方便操作與觀察。

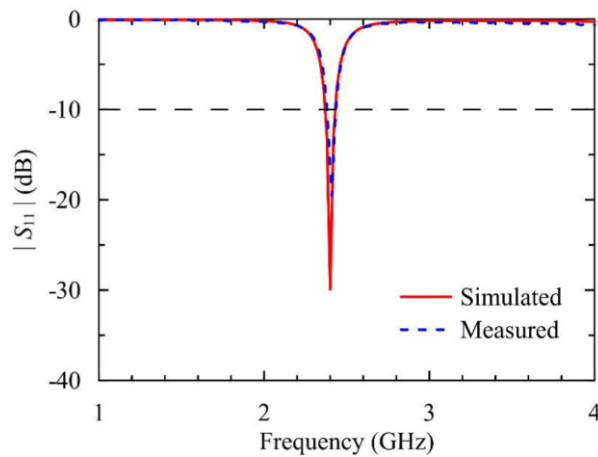
(2) 常見應用頻段

此頻段為市面上常見的 Wi-fi 頻段，在未來應用比起其他頻段更為廣泛，且較容易在市面上購得相同工作頻段的其他元件，利於研究進行。

(二) 模擬與實作測量結果的疊圖分析比較與探討

1. $S(1,1)$ 數據的疊圖分析比較

將模擬與實作測量值疊圖分析數據如下圖所示。由圖可知此曲線大致吻合，也就是模擬與實作測量結果相似，但實作測量結果有些微往高頻頻偏的現象，屬正常現象與合理誤差。



圖：單一天線 $S(1, 1)$ —頻率關係圖模擬與量測疊圖

2. 輻射場型圖疊圖分析

由模擬與量測的輻射場型圖比較可知：兩者的上半部的輻射場型曲線大致吻合，不同之處除了因實作誤差而合理降低的增益值之外，尚有曲線的下半部圖形，而造成此問題的原因是在無反射實驗室 NSI 儀器測量時接上 SMA 接頭並用保麗龍塊堆疊，阻擋量測而無法準確測量下半部場型。不過天線主要輻射方向為向上，因此實驗主要量測的是上半部的場型，因此只看上半部曲線吻合即實作符合模擬。

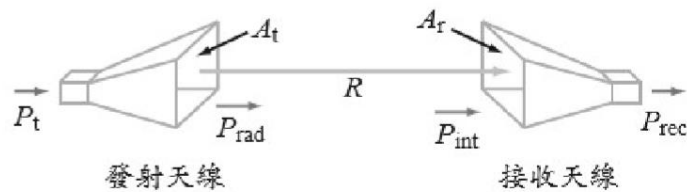
3. 增益與效率峰值的比較

由模擬數據與無反射實驗室的量測圖表可知實際天線的增益值為 2.8 dB，模擬值為 3.56 dB，降低僅 0.76 dB，而效率則由 43.02% 降至 39%，經參考文獻可知皆在合理範圍之內，誤差甚小，因此可為天線實作符合模擬的另一證據。另外，在天線領域中，以使用的材料為基礎，效率高達 39% 算是相當的高。

（三）由網儀兩天線互相耦合訊號收發（不同距離）與理論值的比較

1. 理論簡介：弗里斯傳輸公式 (Friis Transmission Formula)

下圖所示的兩天線是自由空間通信鏈路的一部分，兩天線之間的距離 R 足夠大，所以彼此皆在對方的遠場區域。發送和接收天線的有效面積分別為 A_t 與 A_r ，且輻射效率為 ξ_t 和 ξ_r 。目標是要找到兩個功率 P_t 和 P_{rec} 之間的關係，前者 P_t 是供應給發送天線的功率，後者 P_{rec} 是輸送到接收機的功率。



圖：天線接收與發射示意圖

先把發射天線視為一個無耗且各向同性的輻射體，在和各向同性發射天線相距 R 之處，入射在接收天線的功率密度可以簡單計算如下：

$$S_{iso} = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

真正的發射天線既非無耗，也非各向同性，因此實際天線的功率密度 S_r 為：

$$S_r = G_t S_{iso} = \xi_t D_t S_{iso} = \frac{\xi_t D_t P_t}{4\pi R^2}$$

此處增益 $G_t = \xi_t D_t$ ， ξ_t 反映著底下的事實：供應給天線的功率 P_t 只有一部分輻射進入空間中；而 D_t 代表發射天線的指向性（朝接

收天線的方向)。而且已知 D_t 和 A_t 的關係為： $D_t = 4\pi A_t / \lambda^2$ ，因此，
上式變成：

$$S_r = \frac{\xi_t A_t P_t}{\lambda^2 R^2}$$

對接收天線而言，它截獲的功率等於入射功率密度 S_r 和有效面積 A_r 的乘積：

$$P_{int} = S_r A_r = \frac{\xi_t A_t A_r P_t}{\lambda^2 R^2}$$

遞送到接收機的功率 P_{rec} 等於截獲功率 P_{int} 乘以接收天線的輻射效率 ξ_r ，這導出底下的結果，即弗里斯傳輸公式，其中 $\frac{P_{rec}}{P_t}$ 為功率轉移比（power transfer ratio）：

$$\frac{P_{rec}}{P_t} = \frac{\xi_t \xi_r A_t A_r}{\lambda^2 R^2} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$$

2. 理論與實驗值的比較（其中 dB 的換算方式為 $10^{\frac{x}{10}} = x \text{ dB}$ ）

如下表所示，雖然理論與實驗值結果都是隨著距離拉遠而遞減，
且功率轉移比皆約為距離二次方反比，但實驗值的功率轉移比卻
不及理論值的 30%。造成理論與實驗誤差相距甚大的原因為天線
指向性不足，也就是部分能量沒有被接收器收到而散失。

功率轉移比	理論值	實驗值
5cm	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.05} \right)^2 = 0.310$	-11.45278 dB =0.075
10cm	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.10} \right)^2 = 0.077$	-16.82597 dB =0.021
15cm	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.15} \right)^2 = 0.034$	-22.62555 dB =0.005
20cm	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.20} \right)^2 = 0.019$	-25.26050 dB =0.003

表：兩天線訊號收發（不同距離）理論、實驗值的計算

根據理論與參考資料，解決此問題的方式為將天線製成陣列結構，提升指向性，因此改為量測陣列天線後可以得知問題有顯著改善。

下表是製成陣列結構之後重新計算而得的數據，實驗值從理論值的 16% (0.003/0.019) 變為 43% (0.008/0.0187)。

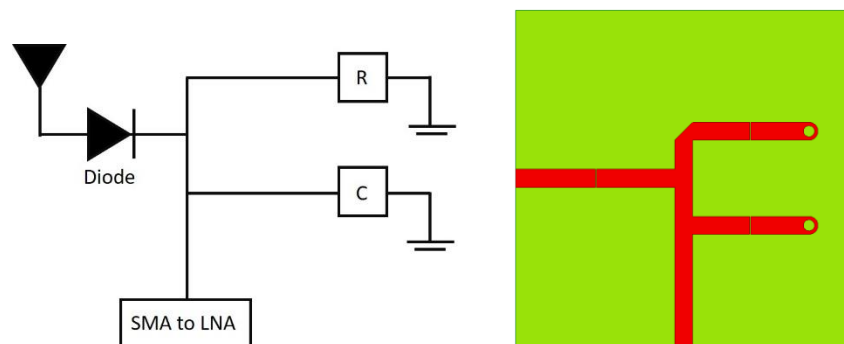
功率轉移比	理論值(皆為 20cm)	實驗值(皆為 20cm)
單一天線	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.4 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.20}\right)^2 = 0.019$	-25.26050 dB =0.003
陣列結構	$2.8^2 \times \left(\frac{3 \times 10^8}{2.44 \times 10^9 \times 4\pi \times 0.20}\right)^2 = 0.0187$	-20.95558 dB =0.008

表：單一與陣列結構天線訊號收發理論、實驗值計算與比較

五、目前研究方向概述與困境

（一）接收器的整流電路設計

天線所接收的訊號為交流電，透過整流系統轉為直流電較容易後續應用，因此選擇了以二極體 (Diode)、RC 並聯電路整流。設計整流電路同樣使用蝕刻電路，而非常見的麵包板，原因在於麵包板的結構問題只適用於低頻，在高頻會吸收訊號。設計圖如下：



圖：整流電路圖與蝕刻設計圖

其中蝕刻設計圖電路中間的縫隙用以焊接元件，然而因縫隙過小圖檔無法顯像，必須人工刮除金屬；最右側的兩個圓形部分則會穿洞，焊接銅線接地；左端與下端則是焊接 SMA 接頭，連接天線與低雜訊放大器。焊接成品如下圖所示。



圖：焊接整流電路板（左圖為正面，右圖為接地面）

其中，選用的 RC 值可由理論公式 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 計算而得，再透過模擬選用較好的組合值。選用的 $f=100\text{kHz}$ （因為要看的是 Low Pass），模擬的 RC 最後選用的數值分別為 5100Ω 、 330pF 。

（二）研究困境

如上，在測量整流電路時發現二極體未達到預期之整流效果，雖然有成功將電路接為通路，但在頻譜分析儀上顯示的仍然是正負電壓值差不多的交流弦波，未達到半波整流效果，此問題待釐清與排解。

（三）未來研究方向

完成接收器與發射器的製作，並能夠在其中做出類似光學實驗中的偏振、折射、干涉等不同處理方式，使訊號以不同方向與強度傳遞。

陸、本計畫之創見性及其未來應用

- 一、本實驗未來希望能以設計並量測好的這組天線來建構發射接收系統，而不是單純的用網路分析儀量測訊號的收發。屆時可以完成整套電磁波實驗器材（包含發射器、接收器以及中間處理 Band Stop、Band Pass 的金屬板）並可接上電子元件或電腦生成數據。
- 二、本研究的未來應用與展望為：方便日後用以在普通高中實驗室進行電磁波實驗研究，如在基本系統中可以做類似光學實驗的處理，包含折射、干涉等。並改善因實驗器材價格昂貴，造成高級中等學校負擔，阻隔學生學習機會的情況，對於教育能有所裨益。

柒、結論

- 一、本實驗所設計的微帶天線能將發射器的訊號吸收大部分，僅反射約 -19.58dB ，為一設計數據合理的天線。
- 二、單一天線的輻射場型有指向性過差，造成訊號大幅散失的問題。
- 三、兩天線功率轉移比在理論上與實驗上皆符合二次方反比，隨距離遞減，且遞減速度趨緩。
- 四、陣列結構的設計無論在模擬與實作上皆發生微幅頻偏的合理現象。
- 五、陣列結構助於提高指向性已利用網儀的比較結果中證實。
- 六、無論單一天線或陣列結構在模擬時皆已將數據修正，實作量測時的結果與模擬差異不大，故本實驗實作部分皆為成功的。

七、本實驗預計完成的裝置與目前完成的裝置比較：

預計完成	發射器	發射天線	偏振、折射干涉	接收天線	接收器
實作進度	待完成	已完成	待完成	已完成	進行中
理論理解	了解架構	已完成	了解架構	已完成	了解架構

捌、參考資料（文獻）及其他

- 一、David Halliday, Robert Resnick, & Jearl Walker (1985) 物理。臺北：全華。
- 二、Fawwaz T. Ulaby. & Umberto Ravaioli. (2017). Fundamentals of Applied Electromagnetics. 臺中：滄海。
- 三、David M Pozar. (1990). Microwave Engineering. NJ: Wiley.
- 四、David M Pozar. (2000). Microwave and RF Design of Wireless Systems. NJ: Wiley.
- 五、Constantine A. Balanis. (1982). Antenna Theory: Analysis and Design. NJ: Wiley.

玖、計畫執行進度表

期 間 工作項目	民國109年									
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
陣列結構設計與量測										
整流系統製作										
偏振、干涉、折射量測										
發射器製作										
數據整理										
背景知識學習										
延伸應用										

壹拾、研究經費明細表

項 目 名 稱	說 明	單 位	數 量	單 價	金 額	備 註
感光電路板	作為天線與電路的蝕刻元件	片	5	125	625	
感光顯像劑	洗去曝光後的感光電路板表面	包	3	40	120	
LNA2-3G-40DB 低雜訊放大器	整流元件	個	1	580	580	
NSR201MX 二極體/RF 檢測器	整流元件	個	50	12	600	
三用電表	測量二極體效能與整流電壓電流	台	1	1000	1000	
天線、電磁學參考書籍	背景知識儲備	本	1	600	600	
合 計					3525	