

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100015

參展科別 工程學

作品名稱 無線傳能 運用磁共振現象增加能量傳遞的效率

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師 陳士元、黃裕修

作者姓名 胡和維、李承遠

關鍵詞 磁共振、無線傳能、天線

作者簡介



我是胡和維，目前就讀師大附中科學班高三，對於物理非常熱愛也有積極的關注目前物理的時事和發展，因此在決定專研的方向時，選擇增加無線傳能傳輸的效率為主要的研究目標。在做專題研究的過程中，有多次拜訪相關領域的教授，討論專題未來的走向、學習與之相關的專業知識。高二完成了青少年人才培育計畫，也讓我更加了解該主題後續發展的潛力。



我是李承遠，目前就讀國立臺灣師範大學附屬高級中學的高三科學班，一直以來都對物理方面的應用，尤其是電機相關領域有相當的興趣，因此，在高中科學班的專題研究課程就選擇了做電波相關的無線傳能的研究，也就是這次參展的作品。

摘要

隨著無線傳輸技術的進步，第四代行動通訊技術的普及化，以及第五代行動通訊技術的來臨，象徵著無線充電即將取代接著充電線的充電方式，但市售的無線充電產品效率大多比不上用充電線充電，並且必須接觸在充電版上才可充電。為此我們運用磁共振的原理，增加無線充電產品的效率及可使用的距離。用自製的發射器(線圈)及接收器(線圈)模擬天線發出訊號與接收訊號，在發射器和接收器前端各放置一個主線圈用來發揮磁共振的效果，達到增加傳輸效率及可使用的距離。

壹、 研究動機

在21世紀的現在，電，是生活中不可或缺的能源。電子產品琳瑯滿目，其中包含了手機、電腦、平板電腦等行動裝置。這些行動裝置都需要充電，而目前很多智慧型手機都有辦法支援無線充電。但大部分的人還是偏好使用充電線充電，因為市售的無線充電產品效率大多比不上用充電線充電，並且必須接觸在充電版上才可充電。

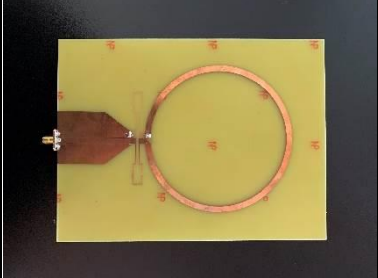
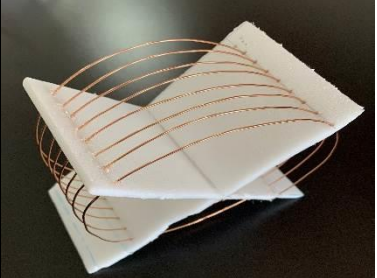





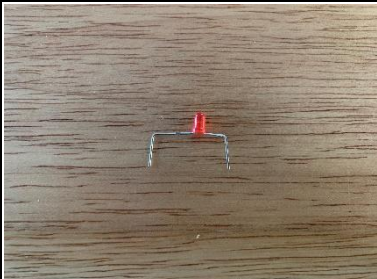




在找參考資料時，發現了一篇麻省理工學院發表在 Science 上的一篇文章 André Kurs, et al” Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances” , Science 317, 83 (2007)。內容與我們的部分相關，但前者的內容多與磁共振有關且使用9.9MHz 的頻率進行實驗，而我們在磁共振之外更添加了天線的內容，以更高的頻率進行實驗，使用500MHz 的頻率進行實驗，除此之外，我們主要是探討主線圈的不同與距離的關係。

貳、 研究目的及研究問題

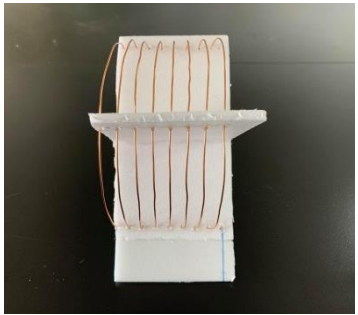
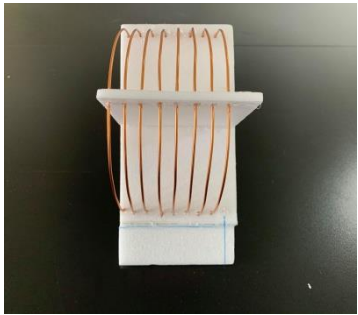
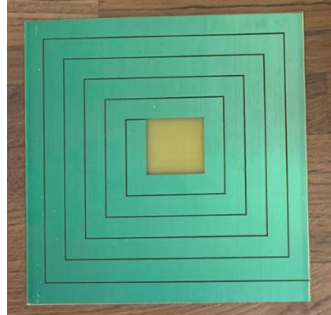
- 一、探討近場耦合下無線傳能傳輸時的損耗現象。
- 二、探討天線和主線圈之間距離和能量百分比的關係。
- 三、探討兩主線圈之間距離和能量傳輸百分比的關係。
- 四、探討在500MHz 的共振頻率下，不同電容及電感的主線圈，能量傳輸效率的差異。
- 五、探討在500MHz 的共振頻率下，不同線徑的主線圈，能量傳輸效率的差異。

參、 研究設備及器材

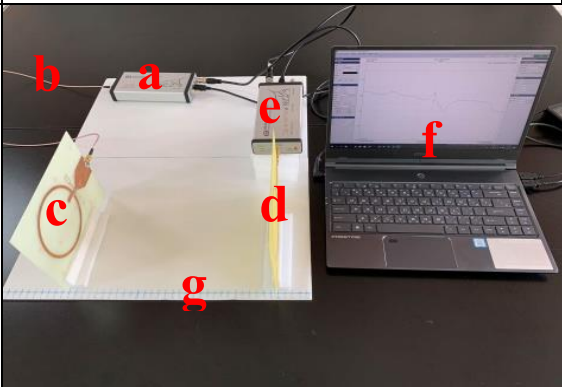
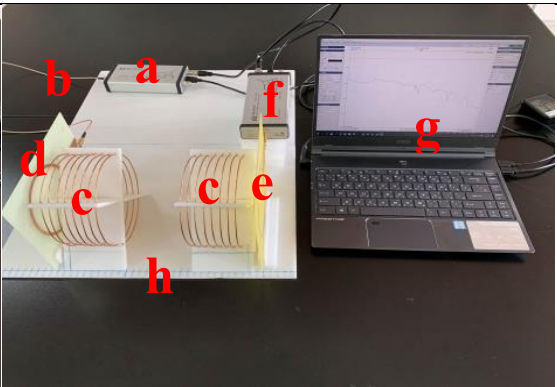
表一、研究設備與器材表

器材	自製天線	主線圈	同軸電纜
用途	傳出和接收訊號	加強磁共振	連接發射端天線
圖片			
器材	訊號產生器	訊號接收器	網路分析儀
用途	產生訊號傳至天線	接收訊號導入電腦	測量自製天線共振頻率
圖片			
器材	蕭特基二極體	LED	電容
用途	架設橋式整流電路	架設電路	架設放大電路
圖片			
器材	多功能電表	示波器	捲尺
用途	量測主線圈的電感、電容	量測主線圈共振頻率	標記長度
圖片			

表二、主線圈規格

	主線圈 a	主線圈 b	Spiral 型線圈
規格	圓直徑：14.00cm 線距：1.00cm 線徑：0.10cm 圈數：8圈	圓直徑：14.00cm 線距：1.00cm 線徑：0.16cm 圈數：8圈	線寬：1.00cm 線距：0.10cm
圖片			

表三、實驗器材架設表

	實驗裝置 a	實驗裝置 b
圖片		
說明	(a)訊號產生器 (b)同軸電纜 (c)發射端天線 (d)接收端天線 (e)訊號接收器 (f)電腦 (g)距離刻度	(a)訊號產生器 (b)同軸電纜 (c)主線圈 (d)發射端天線 (e)接收端天線 (f)訊號接收器 (g)電腦 (h)距離刻度

肆、 研究原理

一、原理

(一) 自製接收端、發射端線圈

驅動環形器 (Drive Loop) 設計

在此無線電力系統中，驅動環形共振器用來發射與接收的無線電磁波的設備。此環形共振器由雙匝驅動迴路和多匝螺旋線圈組成，如圖1所示。當供電給驅動環形器時，所產生的振盪磁場會激發螺旋線圈。本章節著重在驅動環形器的設計，由於操作頻率為500 MHz，其一個波長是60 cm，如果環形器的圈數為一匝時，其結構會太大，將造成實驗架設需佔用較多的空間，為了上述的考量，我們將環形器的圈數修改成兩匝，其結構大幅的減少，並且可在印刷電路板實現，如圖2所示。我們將說明環形器的設計原理，可分成以下兩部分：第一部分是環形結構，由於環形器的圈數為兩匝，所以我們需要將此兩環型結構分別蝕刻在介質基板的上下平面，並且利用銅柱穿孔的方式，使兩環形結構能構成一個波長。除此之外，環形起點和終點會構成共平面帶線 (Coplanar Strip, CPS) 的結構，此時我們可得知此處的特徵阻抗 (Characteristic Impedance)，其值大致在110 Ω ，其阻抗值與現今系統常用的阻抗值 (50 Ω) 存在較大的差異，這將使能量傳遞時出現不連續的狀況，進而使環形器的特性表現大打折扣。因此，第二部分著重在轉接結構的設計，我們引入共平面波導轉共平面帶線 (CPW-to-CPS) 的技術，使能量傳遞從饋電端 (50 Ω) 至環形器的端口 (110 Ω) 有一個良好的能量轉換，使能量有最小的損耗。

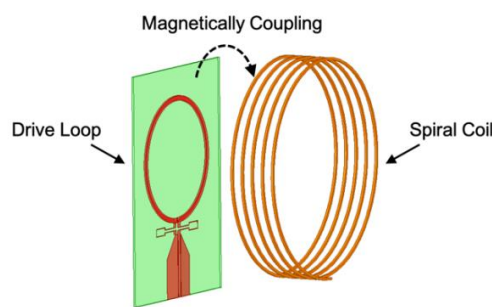


圖1. 驅動環形共振器結構

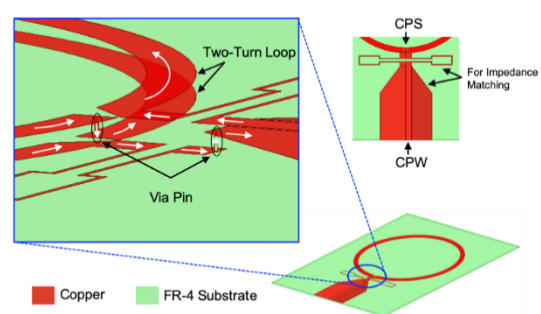


圖2. 驅動環形器 - 配置圖

此架構是使用全波電磁模擬軟體設計與分析。首先，我們須先確定能量是否能順利饋入環形器，由反射係數的反應可知，在500 MHz 時有較小的反射，這說明了轉接結構能將能量有效地饋入環形器，如圖3所示。接著，我們可以檢查阻抗變化，圖四清楚地顯示在500 MHz 的阻抗為 $Z = R + jX = 52.9 + j7.9 \Omega$ ，其值也證明了其結構有不錯的阻抗匹配。最後，我們須觀察環形器的輻射場型，這部分是為了確認場分佈的最大值在何處，從 XZ 平面與 YZ 平面的場型圖可知，輻射最大值在+Z 和-Z 方向，如圖5所示。

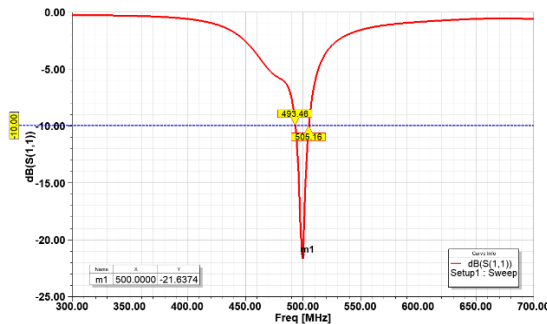


圖3. 驅動環形器的反射係數

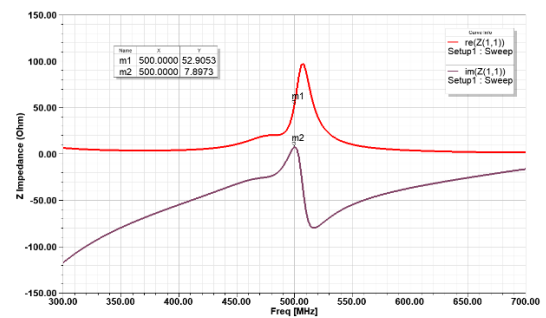


圖4. 驅動環形器的阻抗響應

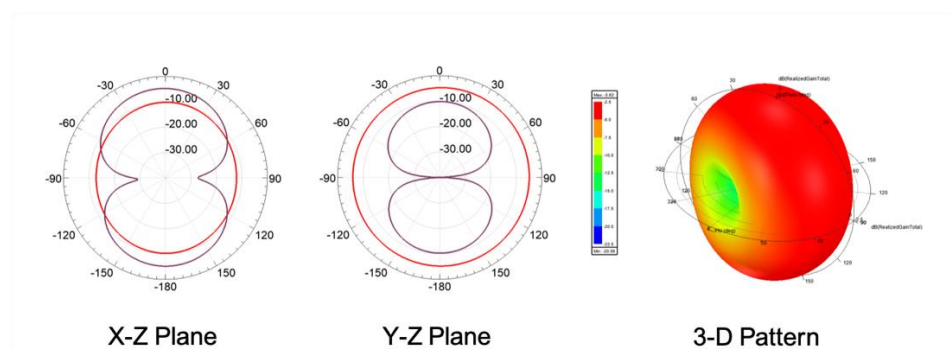


圖5. 在500 MHz 的輻射場型

(二) 主線圈

1. 磁共振

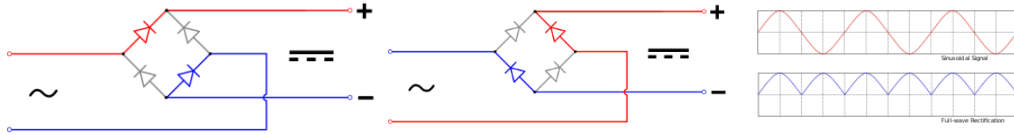
由初級線圈與次級線圈所組成，初級線圈為 RLC 電路，次級線圈由短路電感和諧振電容組合為諧振電路，藉由相同磁共振頻率使得初級線圈與次級線圈的磁場達到相位同步。結果因相互的磁通量增加，在次級線圈得以產生最高電壓，並且初級線圈的電阻發熱降低，發熱減少，效率相對提高。

(三) 電路

1. 橋式整流

是用四個或四個以上的二極體組成的電路組態，不論輸入電壓的電極性是正是負，輸出都可以維持相同的極性。將交流電（AC）轉換為直流電（DC）的全波整流器。

(四) 儀器



1. Signal Hound tracking generator(訊號產生器) / spectrum analyzer(訊號接收器)

這次我們的實驗是使用這兩台機器，並配合該儀器的使用軟體 Spike，架設方法是：由電腦的 USB 供電，並用 BNC 線將兩台儀器連接。量測前先用同軸電纜連接兩台儀器的 SMA 接頭以校正，消去同軸電纜所帶來的誤差和儀器本身的誤差。在量測時，我們使用的是 scalar network analysis 這個模式，經由我們的設定，訊號產生器會輸出300MHz~700MHz 的訊號，之所以這樣設定是因為在當空間中的天線旁有其他的線圈或天線時，天線或線圈本身的共振頻率會有頻偏的現象，需要觀察更寬廣的頻帶以確認共振的情形。開始量測時，程式會將訊號接收器接收到的訊號強度 I ，和訊號發射器發射的強度 I_0 做這樣的運算：
$$S = -10 \log \frac{I}{I_0}$$
， S 即為我們所紀錄之穿透係數，單位為 db。

伍、 研究步驟

實驗一：

- (1) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。

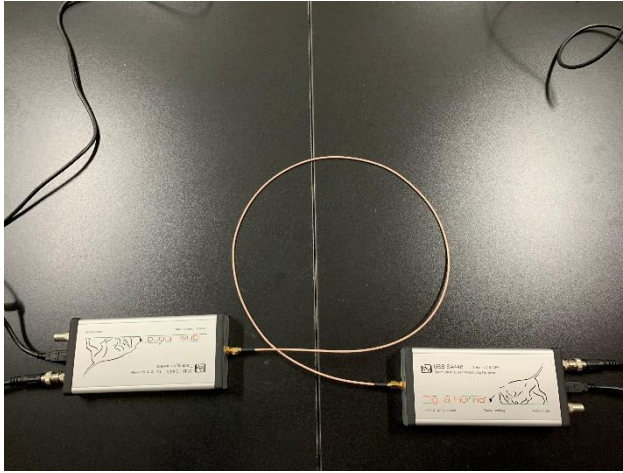


圖6. 校正

- (2) 架設自製天線，如實驗裝置 a。
- (3) 紀錄不同距離下，同一頻率的穿透係數，並比較。

實驗二：

- (1) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。
- (2) 架設天線、主線圈，如實驗裝置 b。固定圖7.中 d_1 (天線和天線之距離)，改變 d_2 (天線和線圈距離)，並比較同一頻率，不同 d_1 和 d_2 的穿透係數。

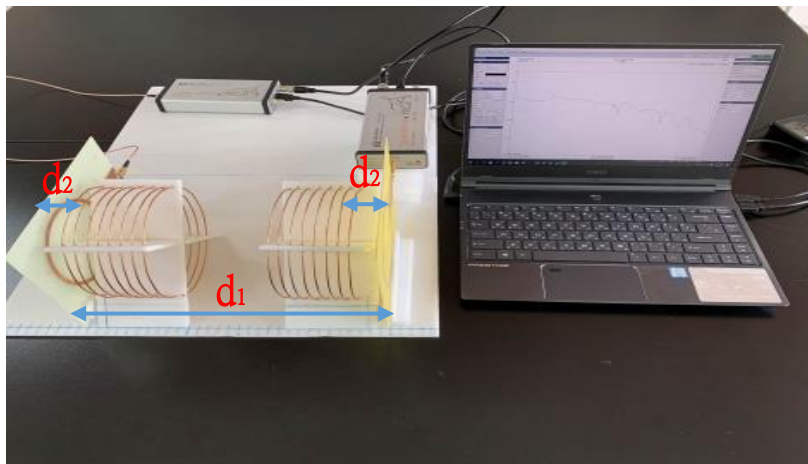


圖 7. 實驗二裝置圖

實驗三：

- (1) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。
- (2) 架設天線、主線圈，如實驗裝置 b。改變圖8.中 d_2 (天線和線圈之距離)，並記錄同一頻率下的穿透係數，並比較。

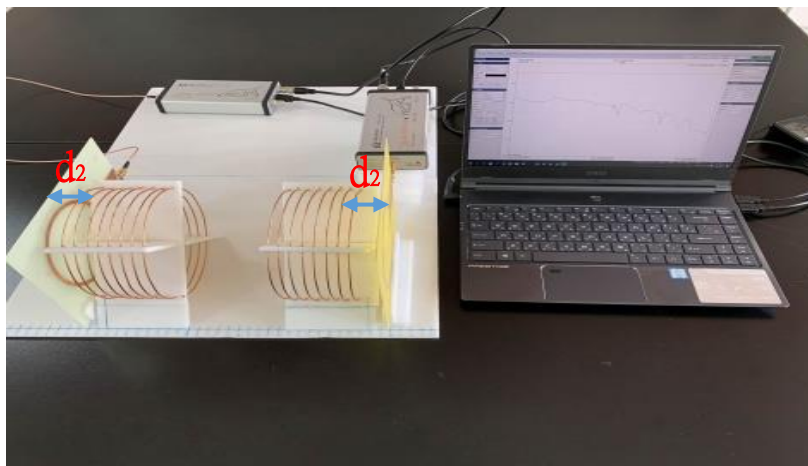


圖8. 實驗三裝置圖

實驗四：

- (1) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。
- (2) 架設天線、主線圈，如實驗裝置 b。
- (3) 改變圖9.中 d_3 (主線圈和主線圈之距離)，記錄同一頻率下的穿透係數。

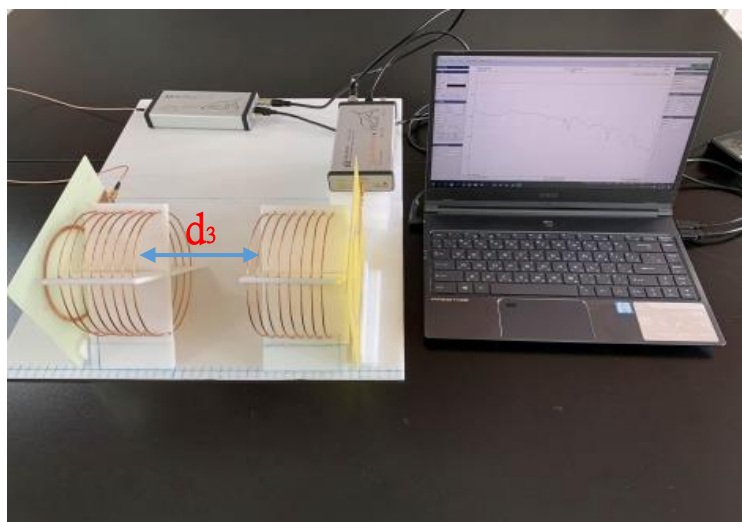


圖9. 實驗四裝置圖

實驗五：

- (1) 紀錄並比較實驗三及四的數據。
- (2) 探討 d_2 和 d_3 對穿透係數的影響。

實驗六：

- (3) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。
- (4) 架設天線、主線圈，如實驗裝置 a。
- (5) 改變圖10.中 d_3 (天線和天線之距離)，記錄實驗三選用之頻率下的穿透係數。
- (6) 將實驗結果和實驗三之結果比較，觀察差異。

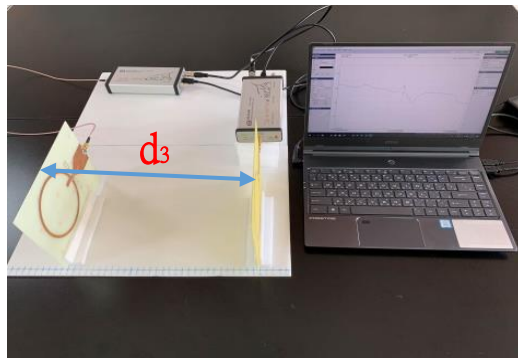


圖10. 實驗六裝置圖

實驗七：

- (1) 如圖6，校正儀器，消去同軸電纜所帶來的損耗。
- (2) 架設天線、主線圈，如實驗裝置 b。
- (3) 使用主線圈 b，改變圖9.中 d_2 (天線和天線之距離)，記錄同一頻率下的穿透係數，和實驗四之數據比較。

實驗八：

- (1) 將實驗四之主線圈改為 Spiral 型線圈。
- (2) 進行實驗四，紀錄穿透係數。
- (3) 將數據和原先實驗四之數據比較。

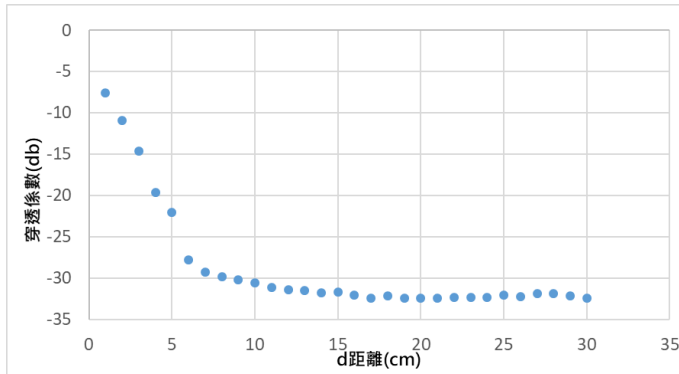
陸、 研究結果

一、實驗一：在無主線圈的情況下，自製天線的近場耦合損耗現象(實驗裝置 a)

選用頻率：500.00MHz

量測範圍(可變變因)：0-30.00cm

應變變因：穿透係數 db



由上圖可知，穿透係數的衰減相當劇烈，表示單純只有天線的近場耦合在空氣中的衰減率是相當高的，這樣的耦合並沒有辦法負荷長距離的傳輸。

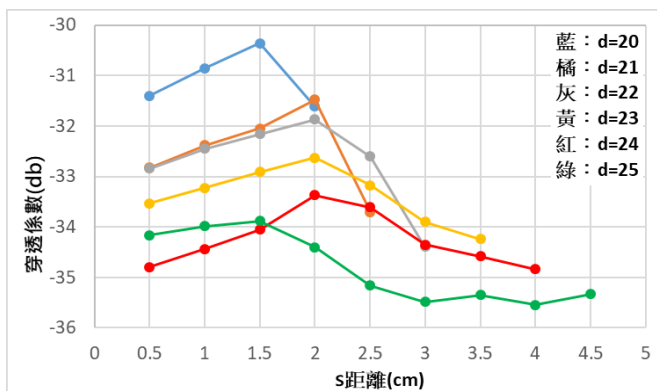
二、實驗二：兩天線間距固定，改變自製天線與主線圈間距離及兩主線圈間距離對穿透係數之影響(實驗裝置 b)

選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm

量測範圍(兩天線間距)：20cm-25cm

應變變因：穿透係數 db



由上圖可知，在不同的天線距離的條件下，在 1.5~2.0cm 的位置都有最大值。但最大值的位置不盡相同的原因推測是因為不同的線圈之間距離也會有所影響。

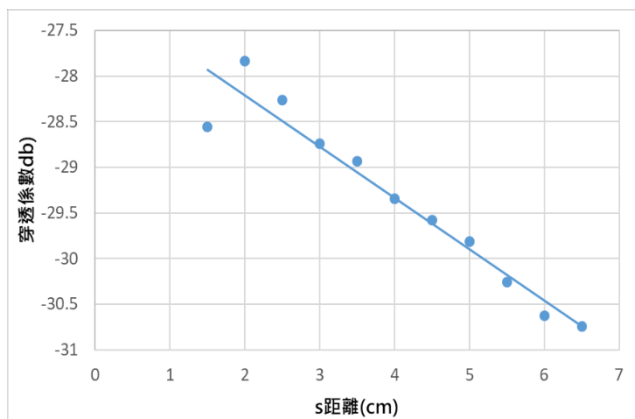
三、實驗三：兩主線圈間距不變，改變自製天線與主線圈間距離穿透係數之影響(實驗裝置 b)

選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm

量測範圍(可變變因)：1.50cm-6.50cm

應變變因：穿透係數 db



由上圖可知，在天線和線圈距離兩公分時，穿透係數是最好的，原因是在距離兩公分時，線圈和天線的共振頻率較為相近，滿足邊界條件，因而有較好的共振。

四、實驗四：比對兩主線圈之間距離不同時，對穿透係數的影響。

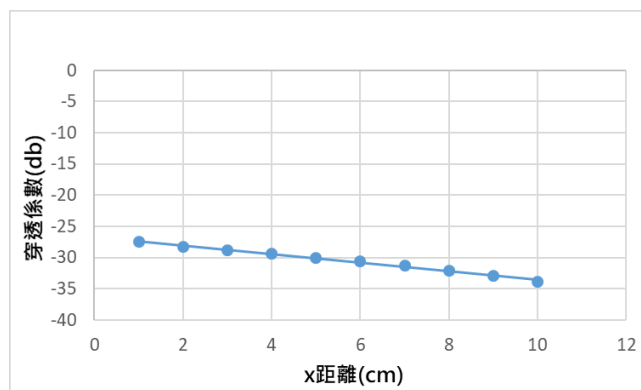
選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm

自製天線與主線圈之距離：2.00cm

量測範圍(可變變因)：21.00cm-30.00cm

應變變因：穿透係數 db



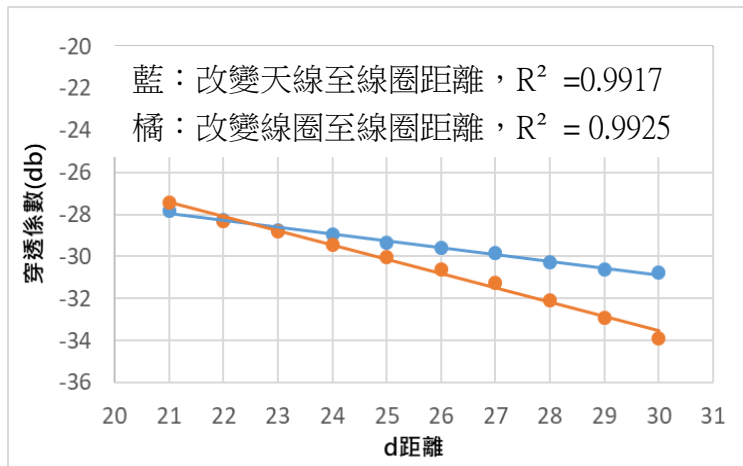
由上圖可知，距離愈長時，穿透係數愈小，但衰減較為平緩，可知加入了主線圈後，能減緩因為距離所造成的訊號強度衰減。

五、實驗五：根據實驗三及實驗四的結果，比較天線與線圈距離和線圈與線圈距離對穿透係數的影響(實驗裝置 b)

選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm

應變變因：穿透係數 db



由上圖可知，改變線圈至線圈距離對穿透係數的影響較大，因為我們的實驗主要是兩個主線圈的強共振，而線圈至線圈距離會直接影響到兩者之間的共振，對穿透係數的影響較大，反觀天線至線圈的距離則對穿透係數影響較小。

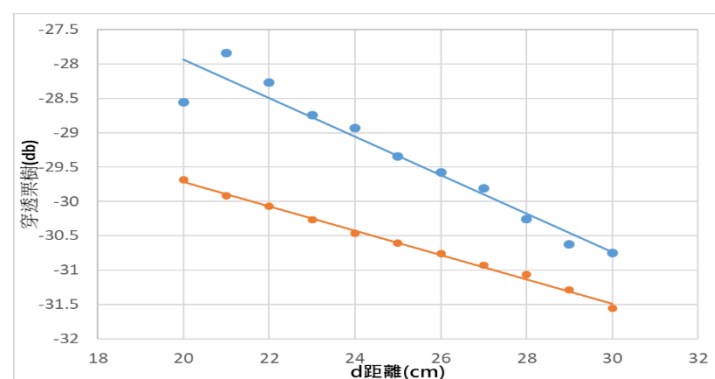
六、實驗六：比對兩自製天線在距離相同時，有無主線圈的損耗現象

選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm

量測範圍(可變變因)：20.00cm-30.00cm

應變變因：穿透係數 db



藍：有主線圈， $R^2 = 0.9305$

橘：無主線圈， $R^2 = 0.9959$

由上圖可知，有主線圈的加入時，穿透係數較高，且有出現一個最大值(實驗二之結果)。反觀無主線圈的穿透係數較低，可以證明加入主線圈會使能量的傳遞增加。

七、實驗七：比對自製天線與主線圈之距離相同時，主線圈之線徑不同的損耗現象(實驗裝置 b)

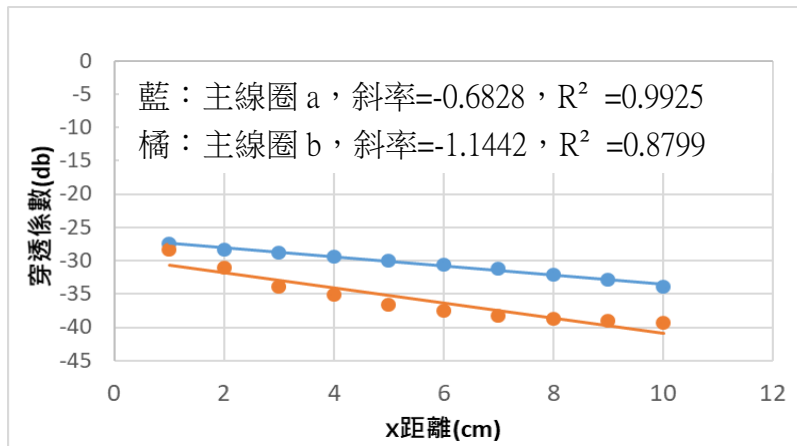
選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：主線圈 a，線徑：0.10cm 主線圈 b，線徑：0.16cm

自製天線與主線圈之距離：2.00cm

量測範圍(可變變因)：21.00cm-30.00cm

應變變因：穿透係數 db



由上圖可知，1.4mm 線徑的銅線所繞成的主線圈較無法達到好的磁共振，傳輸的效能較差，反觀1.0mm 線徑的銅線所繞成的主線圈能形成較強的共振現象，穿透係數因而較高。

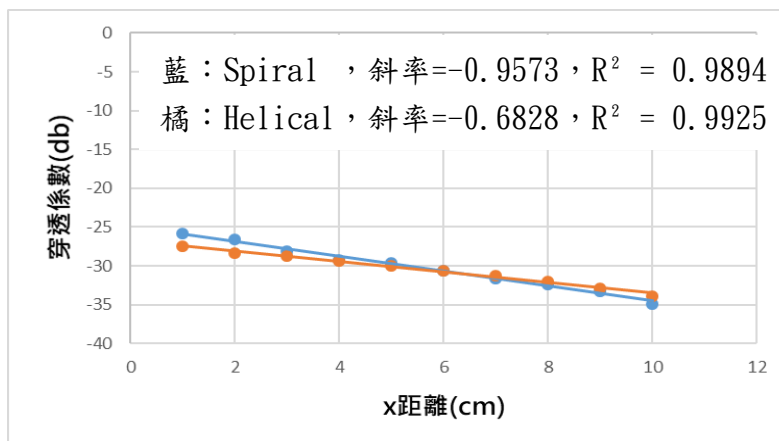
八、實驗八：將主線圈換成 Spiral 型線圈，進行實驗四，並和原先數據比較

選用頻率：500.00MHz

選用主線圈：Spiral 型，線徑：0.10cm

自製天線與主線圈之距離：2.00cm

應變變因：穿透係數 db



由左圖可知，Spiral 線圈在距離較小時，有較好的穿透係數，但衰減卻較 Helical 型線圈快。

柒、 討論

- 一、 本次實驗的頻率(500MHz)在現在市面上的使用中極少出現，且我們是使用電腦直接比較發出與接收到的兩筆訊號大小的比值，因此受到外界擾動的情況極小。
- 二、 在實驗一中，只有天線的近場耦合的能量百分比衰減在 0~7 公分時和 $1/d^2$ 成正比，但在距離較遠時因訊號強度太小，無法確認是否仍然有這樣的關係。
- 三、 在實驗二中，在 $s=1.5\text{cm}\sim 2.5\text{cm}$ 內，有能量傳輸效率的極大值，和我們的假設相符。
- 四、 在實驗五中，我們比對在實驗三及四的結果，發現改變 x 對穿透係數的影響較大，推測是因為線圈之間的耦合程度對穿透係數的影響較大，因此 x 的影響較 s 大。
- 五、 在實驗六中，由於本實驗的主線圈大小為長度為 8cm，我們無法測量在 16cm 以內的實驗結果，因此無法驗證在 16cm 內的實驗結果是否如同預期(兩天線距離 4cm 接收到的能量為百分之一)。
- 六、 在實驗七中，線距為 0.10cm 的能量耗損小於線距為 0.16cm，原因是 0.10cm 線徑的共振頻率較為接近 500MHz。
- 七、 在實驗八中，Spiral 型的主線圈在較近的距離下有較好的穿透係數，但隨著距離增加的衰減較 Helical 型快。

捌、 參考資料

- 一、 Yi Huang, Kevin Boyle. (2008). Antennas: From Theory to Practice.
- 二、 David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, Farrell Edwards, John J. Merrill. (1960). Fundamentals of Physics.
- 三、 André Kurs, et al. (2007). Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. Science 317, 83
- 四、 Luis G De La Garza, Tito Espino, Daniel Salazar, and Nantakan Wongkasem. Electromagnetic Metasurfaces for MHz Wireless Power Transfer.

【評語】 100015

本作品透過磁共振現象，採用自製的發射器線圈及接收器線圈模擬天線發出訊號與接收訊號，在發射器和接收器前端各放置一個主線圈用來發揮磁共振的效果，增加能量傳遞效率，具創新性與實用性。實驗結果透過自製發射器與接收器於所形成之磁共振環境，雖可達到增加傳輸效率與距離，以目前研究結果僅具垂直傳遞且距離有限。

目前僅考量 30 -45 cm 無線傳輸，且訊號衰減部分需再以精密設備量測，方能設計出有效之無線充電之模組，建議可多探討障礙物或其他干擾對於實際傳遞能量之情形。