

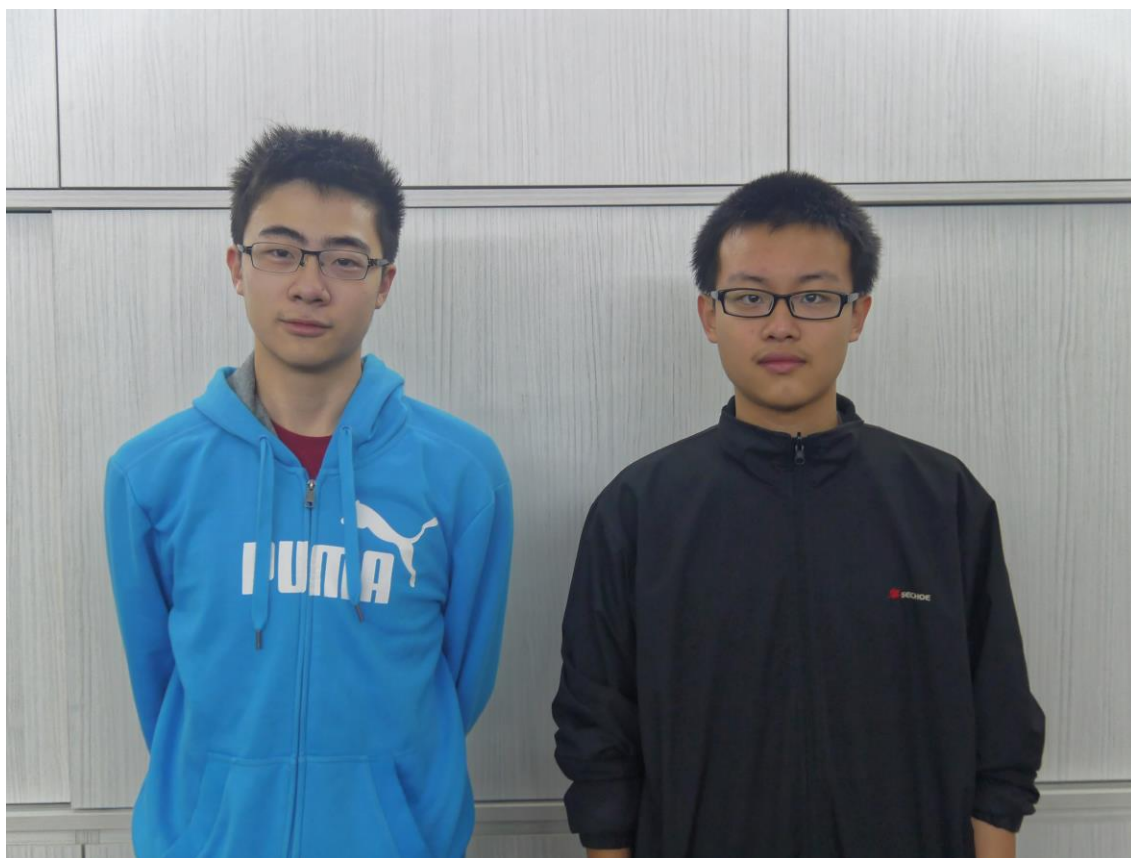
2017 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100022
參展科別 工程學
作品名稱 獵能系統與整流天線(Energy harvesting
with rectenna system)
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 臺北市立麗山高級中學
指導教師 張堯卿
作者姓名 林容緣、劉祖禕

關鍵字 獵能系統、整流天線、電波產能

作者簡介



Hello, our name are LIU, TSH YI and LIN, RONG YUAN. Both of us are senior high school students from Taipei. It is our first time to participate in such a significant fair. The project we design is about a device that could collect the radio waves around us in our daily life. The original idea originates from my chemistry teacher. He gave us inspiration and pushed us to create the prototype. We expect that it will be a groundbreaking invention and help people in the beautiful planet to fight against the grave global warming. The most important purpose is to cut down on the carbon dioxide emission by utilizing this innovation. To achieve this majestic goal, we still have to confront different kinds of barriers and we will work double harder to solve these problems.

摘要

從資訊革命後，為了使資訊更快速地傳遞，無線電波已成為我們生活上無法割捨的一部分。無論身處何處，我們日常生活已被無線區域網路(WLAN)、廣播以及蜂巢式行動通信基地台(Cell site)，甚至包括變壓器和日光燈管等所釋放各種各式波段及能量的無線電波包圍，但由於這些電波並非無時無刻地在通訊，以及基地台並非隨時都處於高負載狀態，加上其服務對象可能僅處於基地台覆蓋範圍之某一區域，因此無法被完全地利用，而損失了需多能量。有鑑於此，我們希望設計一組結合天線及整流器之整流天線(Rectenna-rectifying antenna)為主體之獵能系統(Energy Harvesting System)，以環境中的電磁波訊號作為我們獵能的目標，收集未被利用之電波後轉換為直流電(DC)。目前實驗初步成果對於環境中之無線電獵能平均電壓可達 474 毫伏，最高峰可達 1330 毫伏。未來可應用於擁有低功耗特點之物聯網(IOT)裝置上，在顧及環保節能的同時，達到自我供電的目的。

Abstract

After the information revolution, radio waves has become a necessary part in our life in the purpose of delivering data faster. Wherever we are, our daily life has already been surrounded by radio waves which come from, like Wireless Local Area Networks(WLAN), radio stations, Cell sites, transformers and even fluorescent tubes. But these radio waves aren' t used all the time, besides, base stations aren' t always at high electrical load and its customers wouldn' t always be in the range of service, we decide to create an energy- harvesting system that use rectenna (Rectifying antenna) as the main part which combine antennas and rectifiers. Using environmental radio waves signals as our energy harvesting target, by collecting these unused radio waves, the energy could be transformed into the power source which could be used directly, like Direct Current(DC), At present this experiment for the environment in the radio hunting can average voltage up to 474 millivolts, and the highest peak of up to 1330 millivolts. we hope to be used on devices, like Internet of Things(IOT), taking into account environmental protection and energy conservation at the same time, get to the purpose of self-powered devices.

壹、前言

一、研究動機

近年來，大家都面臨到了同樣的問題—「能源危機」，在此高度發展的代價之下，未來資源枯竭的窘境必是我們需要共克服的課題，因此能源之發展趨勢自然是以不傷害大自然且取得較容易的方式為主。

為了抵抗此困境，各國都在積極的尋求更多的替代能源，想要尋找一些，既沒有火力發電的污染、又沒有核能發電的不安全，能夠取而代之的是，高產出、低耗能、低成本、無污染也就是所謂的「綠色能源」，但以目前各國現有的技術而言，綠能普遍被普羅大眾認為是一種昂貴、不符合經濟效益的一種高貴能源，因此，我們便找了一些有關綠色能源的資料，想要藉由改善，以期達到此目標。

而自從 1893 年尼古拉·特斯拉展示了無線電通訊後，該技術從古發展至今，已經成為人們生活中不可或缺的元素，而當我們在發送無線電波的同時，亦等同於發送能量，雖然數值並不大，卻處處皆有。若我們能採集，聚沙成塔，並且利用這些蒐集而來的能量用於如物聯網裝置或感測器等低功耗的裝置上，即可省去供電線路配置抑或時常更換電池的困擾。在傳輸無線訊號的同時，也為該裝置供電。如此不但可排除若以太陽能透過光電效應，用以作為供電來源時所面臨到的天候因素之影響，更可回收發散於環境中之無線電波的能量，同時兼有環保節能之利益。

二、研究目的

(一) 獵能系統設計

設計可採集環境中的無線電波之整流天線，其中包括設計天線、電路，並對低耗能裝置作為負載、進行供電。

(二) 環境保護層面

獵能系統雖不如太陽能或風力發電般為可再生能源，但該系統所採集之能量為環境中的電波，可回收原本只會衰減轉換為熱能而散失的電波，既不浪費能源，達到每一分每一毫的資源都能被人類所利用，同時現今全球大多數國家不斷倡導的節能減碳、愛護地球以達到永續經營的口號，身為世界村的一員，理應為此付出精神氣力，共同維護屬於我們的地球。

(三) 經濟效益

現代生活環境已被各式電波所包圍，而發射這些電波基站事實上耗費了巨大的能源，以手機基地台為例：根據台灣諾基亞西門子表示，每個基地台平均耗電量約為 700 瓦特/小時，是筆可觀之能源支出。另基站所發出的電波亦非完全地被使用，若能採集使用部分能源，對我們而言，成本近乎為零。

貳、研究方法與過程

一、研究設備與材料

(一)研究設備

表 2-1-1 研究設備清單

設備名稱	型號或說明
數位電表	Instek GDM-8261 6 1/2 Digit Dual Measurement Multimeter
筆記型電腦	
無線電發射器	Futuba Skysport 4, 35.160 MHz

(二)研究材料

表 2-1-2 研究材料清單

設備名稱	總數量	規格或說明
麵包板	1(片)	
單芯線	30(條)	
電容器	5(個)	0.1 μ F 及 33 μ F
可變電容器	1(個)	1 pF ~ 200 pF
電感器	1(個)	1 μ H
漆包線	1(捲)	一號線
發光二極體	1(個)	5 Φ 紅光
檢波二極體	4(個)	1N60

二、研究流程

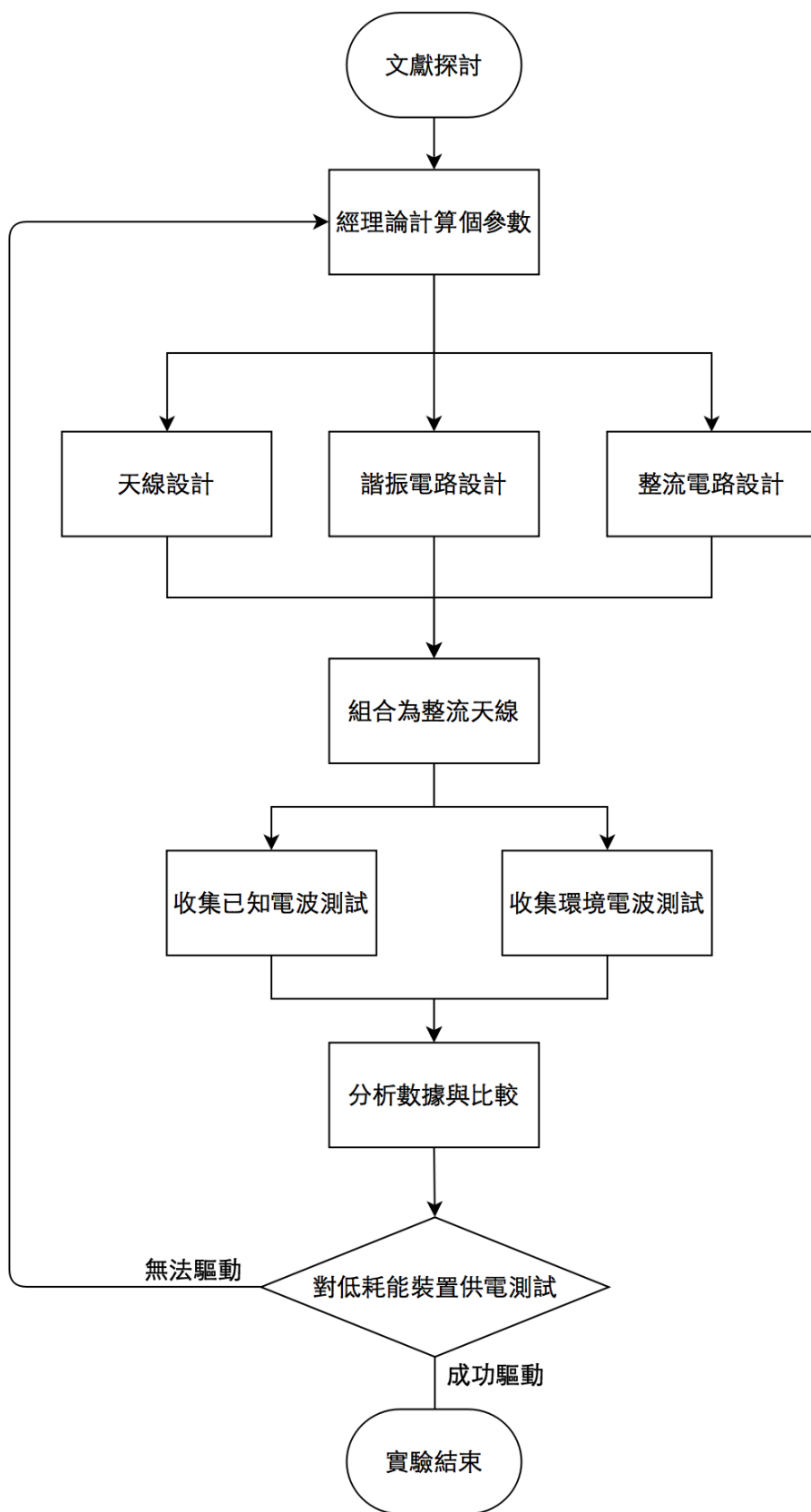


圖 2-2 研究流程圖

三、研究方法

(一)概述

我們先透過天線攔截空氣中之無線電波，傳入諧調電路選擇適當頻率後並與其共振提高能量後，導入整流器將交流訊號(AC)轉換為可直接利用之直流電(DC)，並對負載供電或進行儲存。

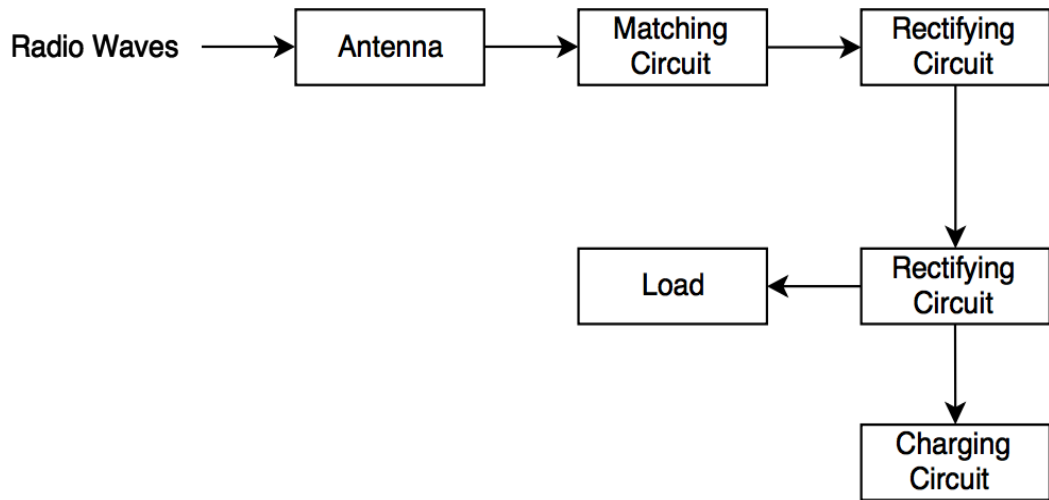


圖 2-3-1 系統架構圖

(二)天線

1. 文獻探討及理論數據計算

天線可捕捉於空中傳播之無線電波，但若欲與某頻率之電波進行共振以達到最佳之收訊效果，天線之長度必須之少大於其電波之波長之四分之一，可透過下式(式 2-3-1)求出。若假設無線電波為一正弦波，則波長與天線長度之關係可於(圖 2-3-2a)中所表示。

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

λ = 電波波長(m)

c = 光速=電波行進速度= 3×10^8 m/s

ν = 電波頻率(Hz)

式(2-3-1)

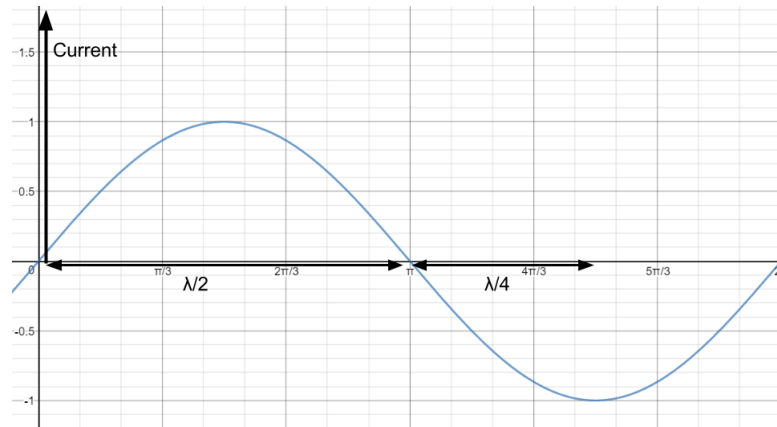


圖 2-3-2a 波長於天線長度之關係

最經典及簡單之天線結構為赫茲偶極天線(Hertz Dipole Antenna)，基本構造及利用暫態分析之電流分布見圖(2-3-2b)。而若欲天線之增益，則可透過天線前方之激勵器及後方之反射器來完成。

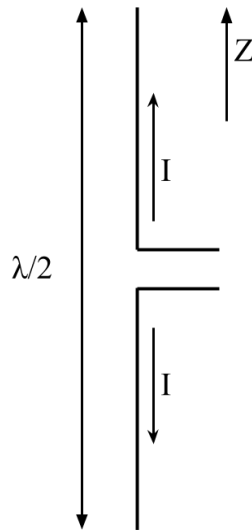


圖 2-3-2b 赫茲偶極天線之暫態分析

另外，我們可使用弗林斯傳輸方程式(Friis transmission equation)，如式(2-3-2)，計算兩任意類型之天線於真空中互相平行且沒有損耗之狀態下接收端所能接收之功率。經由該式使用赫茲偶極天線於理想狀態下且發射功率為 50 W 下所試算之各項理論數據，如表(2-3-3)。

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{\lambda^2}{4\pi r^2} G_T G_R$$

P_R = 接收端功率

P_T = 發射端功率

G_R = 接收端天線增益(dBi)

G_T = 發射端天線增益(dBi)

λ = 傳輸間電波波長

r = 距離

式(2-3-2)

表(2-3-3) 理論接收功率計算

距離(Km) \ 頻率(MHz)	0.5	0.05	0.01
35.160	1.83×10^{-4}	2.27×10^{-2}	4.59×10^{-1}
100	2.27×10^{-5}	2.27×10^{-3}	5.56×10^{-2}
700	4.63×10^{-7}	4.63×10^{-5}	1.15×10^{-3}
900	2.08×10^{-7}	2.84×10^{-5}	7.01×10^{-4}

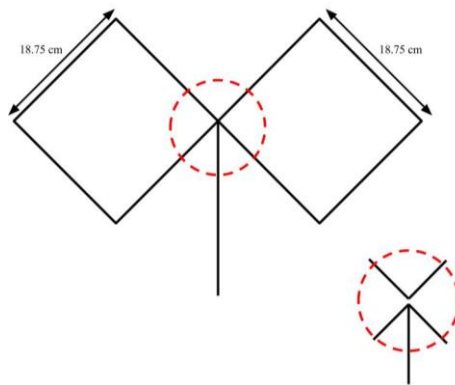
單位:瓦(W)

2. 天線設計

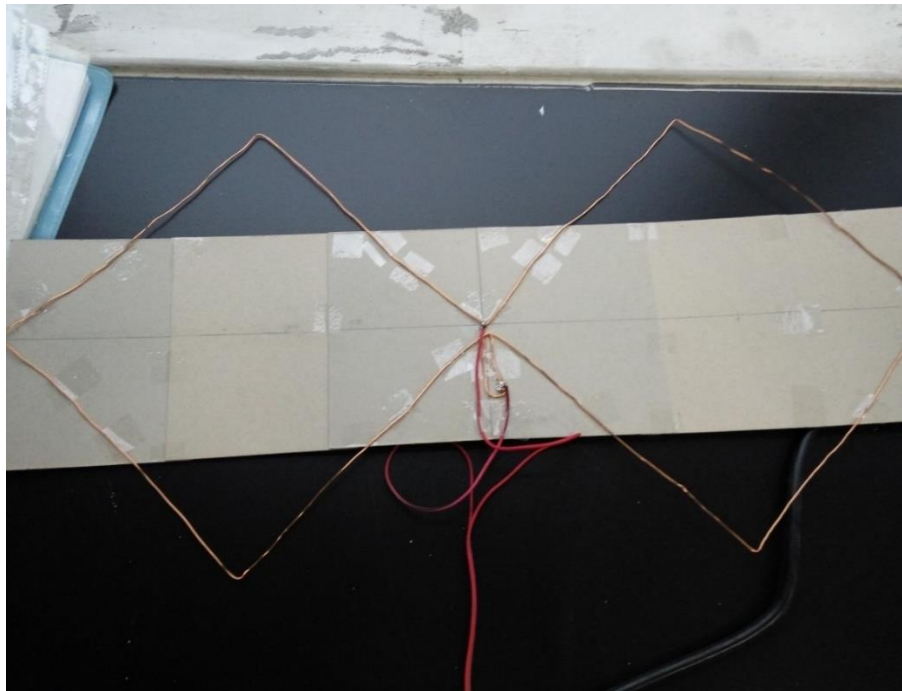
經由式(2-3-1)可得知，天線若欲和頻率 100MHz 以上之電波共振，天線長度必須大於 3 公尺，但礙於尺寸問題，我們將赫茲偶極天線變形為環狀菱形天線，令一菱形環之總長度為 $\lambda/4$ ，則每一邊之長

度為 18.75 公分，天線示意圖如圖(2-3-2c)，注意圖中兩菱形交界如紅虛線圈處之上下兩線並無短路。實際天線如圖(2-3-2d)。

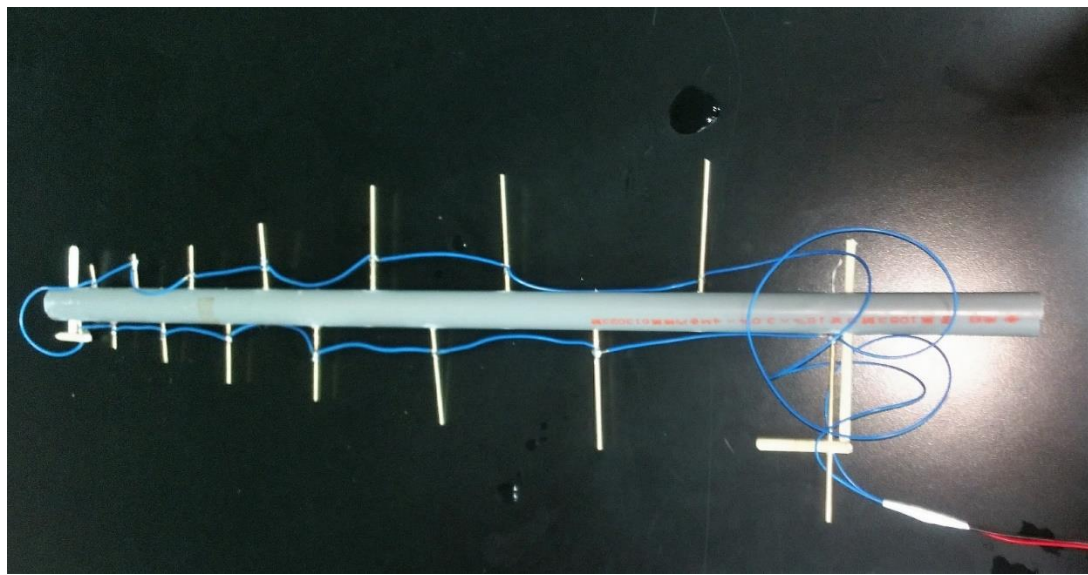
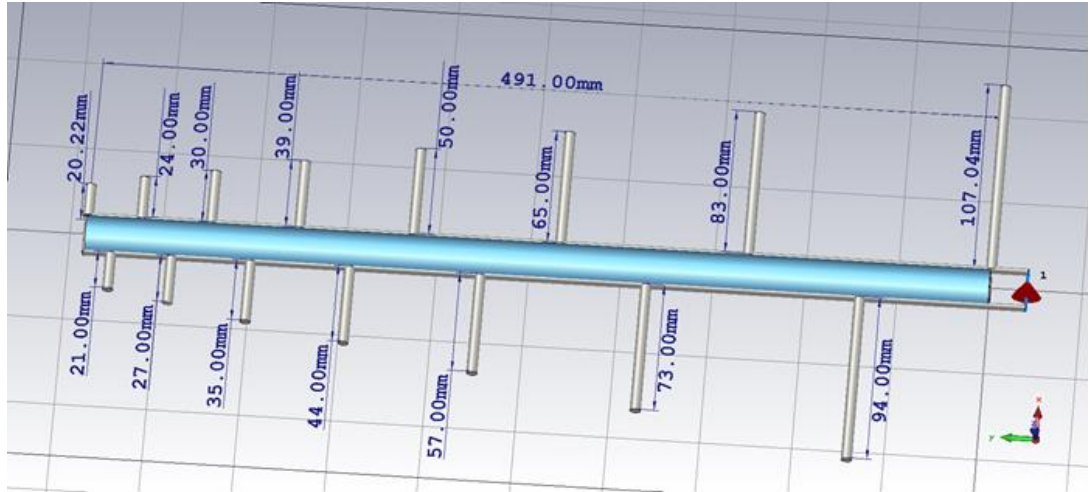
而我們於實驗後期引入 CST Studio 天線模擬軟體協助天線之設計及數據模擬。透過此軟體，我們別設計了針對 4G 訊號的高寬頻對數週期天線，見圖(2-3-2f)以及針對無線電視訊號之雙菱形天線，如圖(2-3-2g)，其經由軟體模擬所得之 S_{11} 參數圖、VSWR 電壓駐波比以及於不同頻率下之遠場圖，分別於下表中標示。



圖(2-3-2c) 菱形天線示意圖

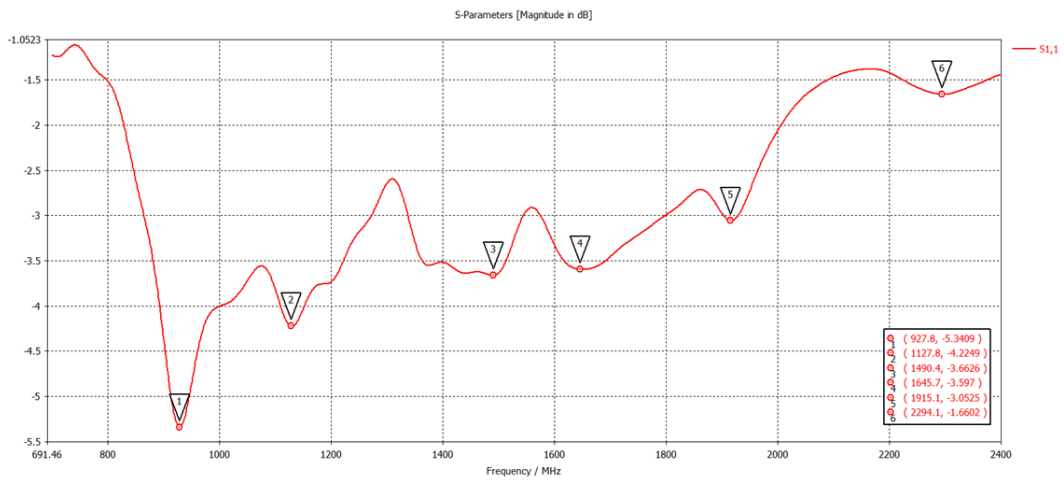


圖(2-3-2d) 實際製作之天線

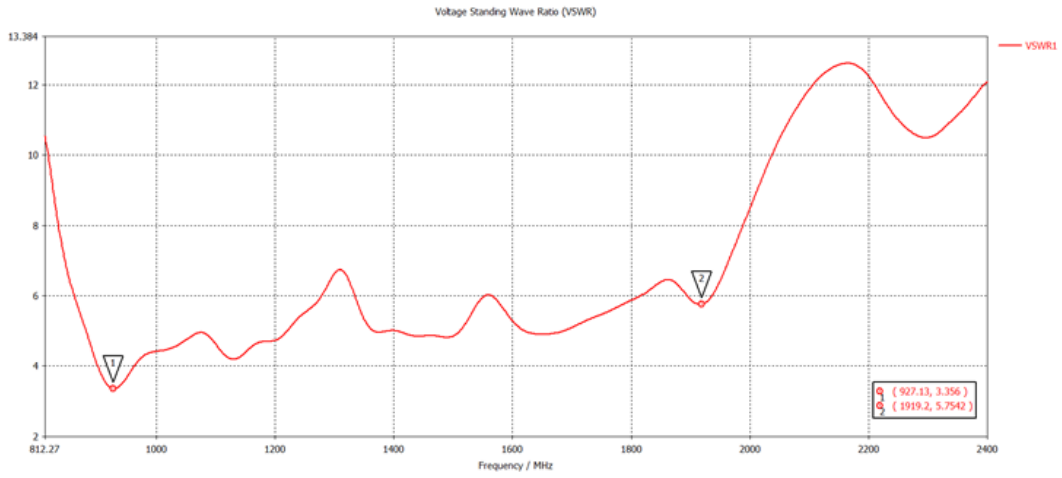


圖(2-3-2f)對數週期天線之 3D 模型及實體照片

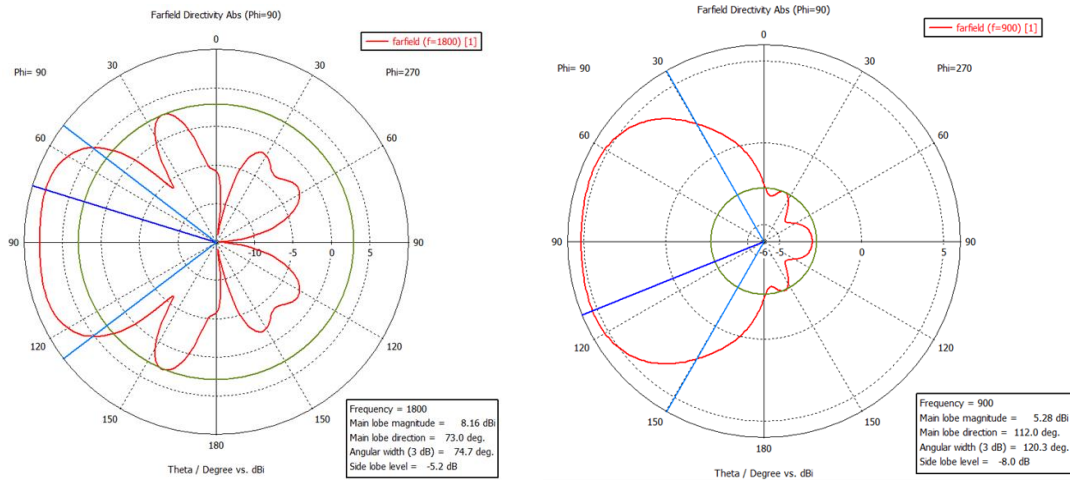
表(2-3-4)對數週期天線之 S_{11} 模擬數據

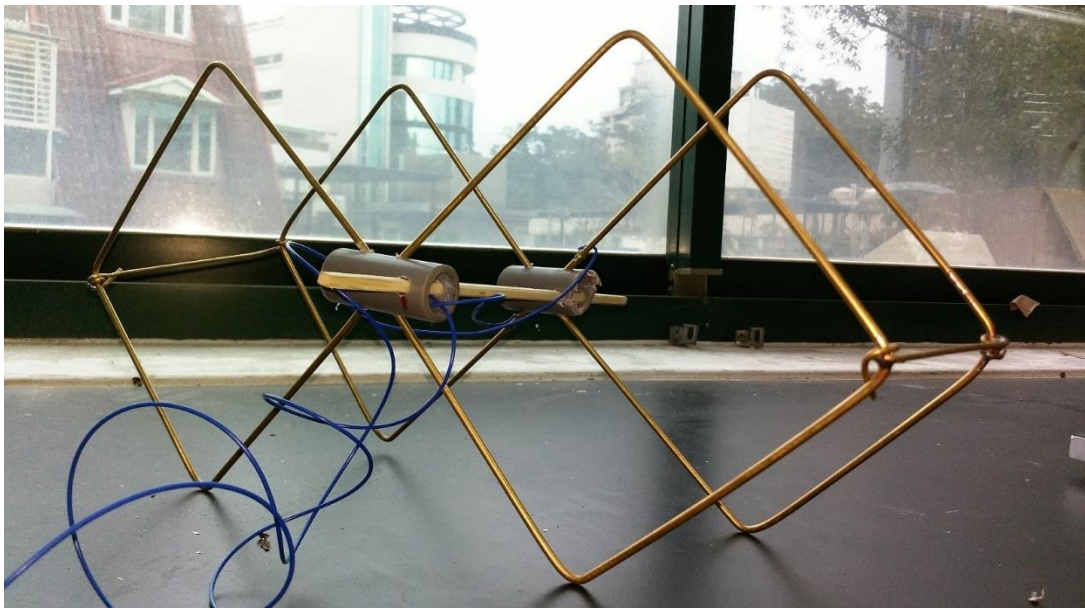
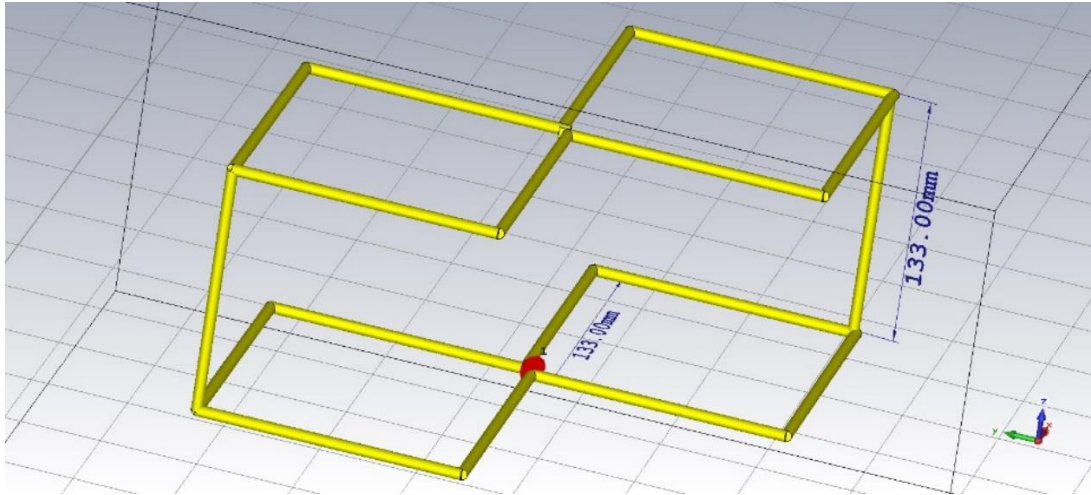


表(2-3-5)對數週期天線之 VSWR(電壓駐波比)



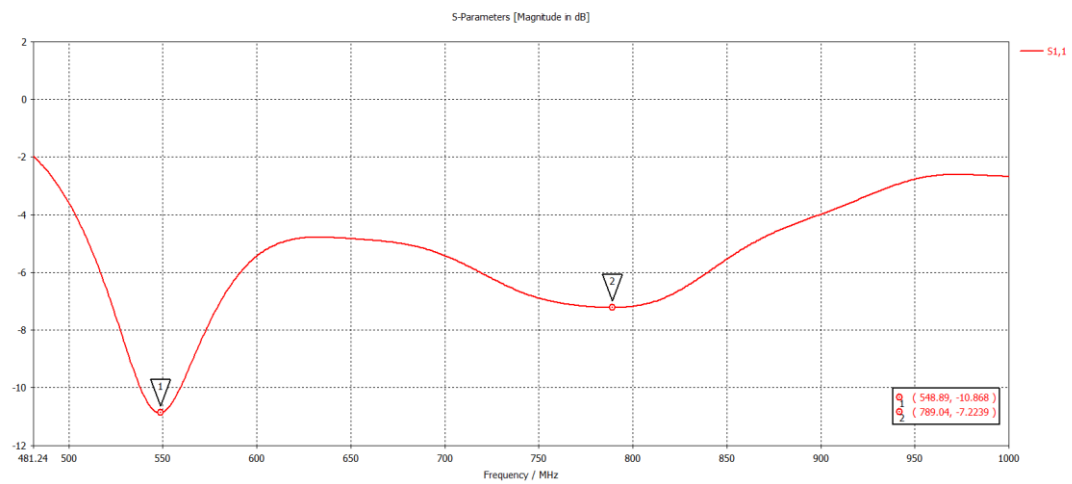
表(2-3-6)對數週期天線於不同頻率下之遠場模擬



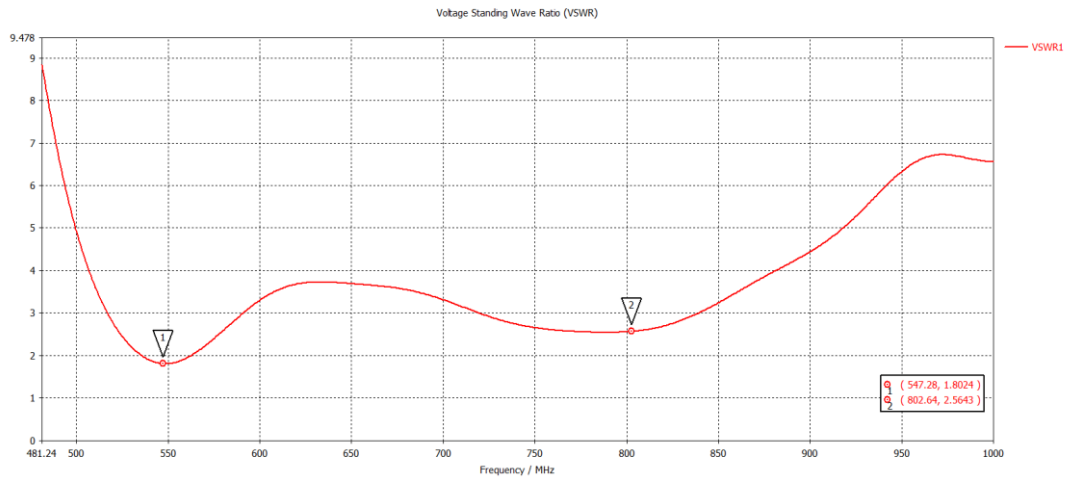


圖(2-3-2g)雙菱形天線之 3D 模型及實體照片

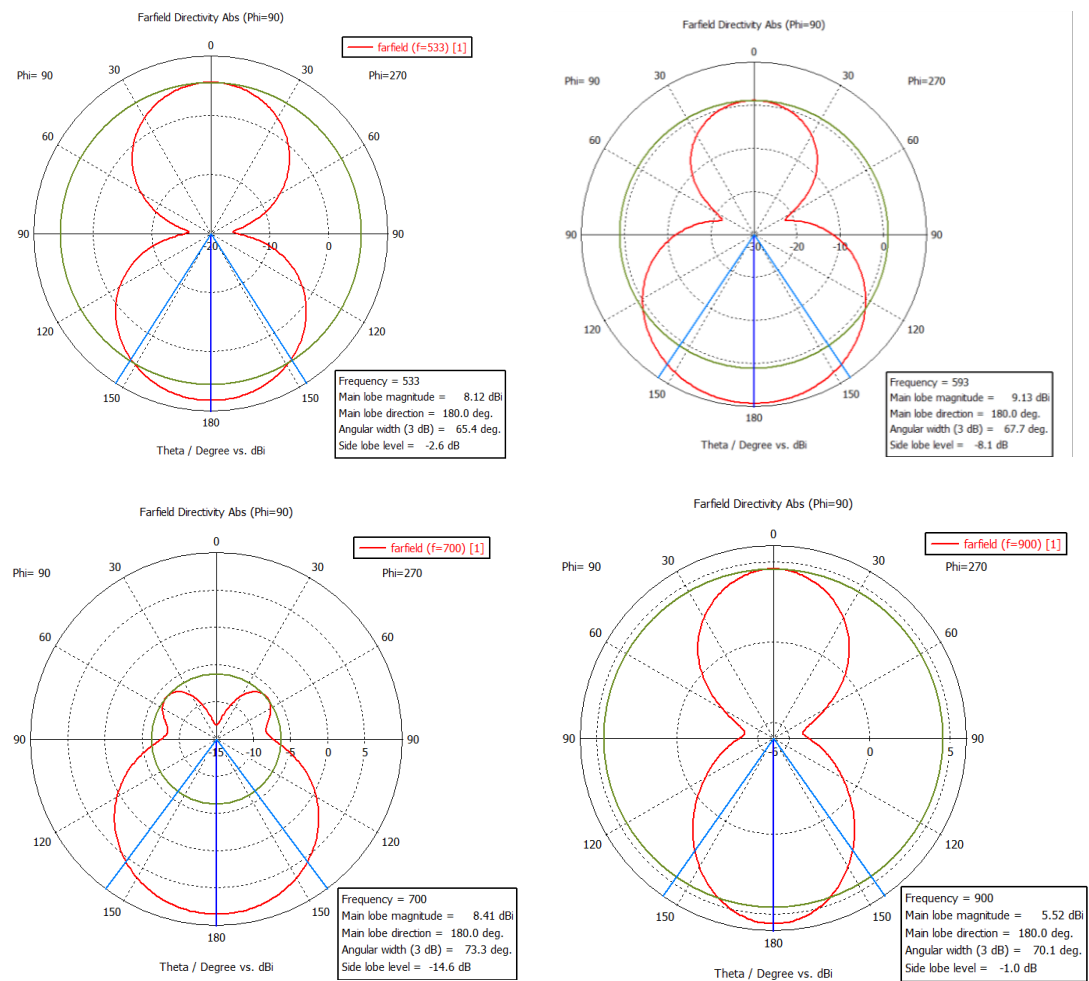
表(2-3-7) 雙菱形天線之 S_{11} 模擬數據



表(2-3-8) 雙菱形天線之 VSWR(電壓駐波比)



表(2-3-9)雙菱形天線於不同頻率下之遠場模擬



(三) 諧振電路

1. 文獻探討

諧振電路可分為由電感(Inductance)及可變電容(Variable Capacitor)所組成之 LC 諧振電路，與加上電阻(Resistance)以產生適當之阻尼效應以控制諧振曲線之 RLC 諧振電路。在 LC 諧振電路中，當可變電容調整至使電路中由電感與電容所產生至相移效應相等並互相抵消時，可使與其產生諧振頻率之振幅增大，而該頻率可由下式(2-3-4)所整理出之式(2-3-5)計算推得。

$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0$$

式(2-3-4)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f = 電波頻率

L = 電感值

C = 電容值

式(2-3-5)

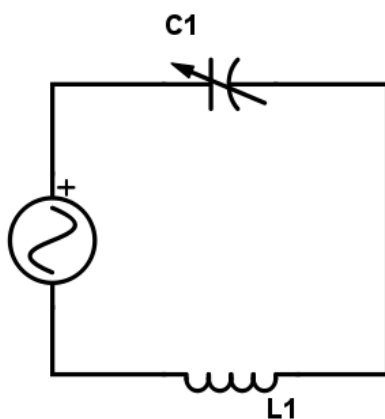
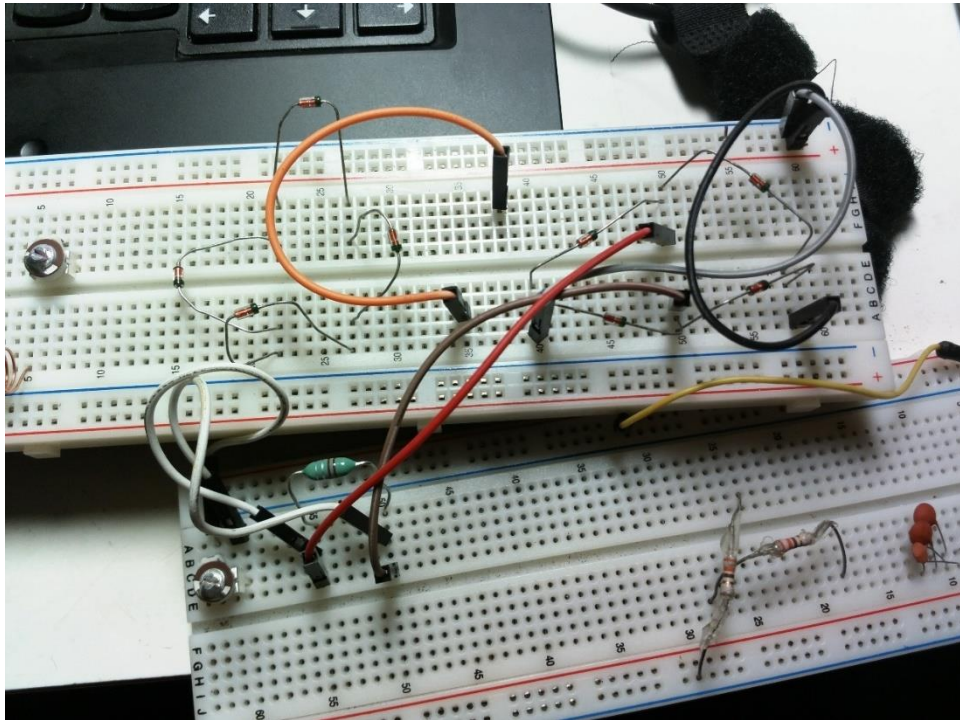


圖 2-3-3a LC 諧振電路示意圖

2. 電路設計

我們將天線、電感、可變電容及整流電路並聯，如圖(2-3-3b)。



圖(2-3-3b) 實際諧調電路

3. 後期應用

於實驗後期中，由於發現由使用進行調諧之可行性問題以及對環境電波的採集效果不如未經過濾波之模組，故在實驗後期取消對諧調電路的使用。

(四) 整流電路

1. 理論探討

二極體為組成整流電路之主要原件，其特性為電流僅可由單向通過。若電流於二極體之陽極通過，電子注入 N 型半導體，造成半導體間之空乏層縮小，使電子可順利通過，是為順向偏壓 (Forward Bias)；反之則會使半導體間空乏層變大，使逆向電流無法通過，稱為逆向偏壓 (Reverse Bias)。

鍺所構成之檢波二極體比起一般 PN 接面二極體擁有較低的障蔽電壓、反向電壓 (Reverse Current) 及回復時間 (Reverse recovery time)，因此有能力對對高頻訊號，如 VHF (Very high frequency) 波段之檢波工作。

而將二極體組成橋式整流器，以電流方向進行分析，如圖(2-3-4a)時，電波之正半波通過入整流器，二極體 D1 及 D3 產生順向偏壓，反之則如圖(2-3-4b)，電流通過二極體 D2 及 D4，因此不論輸入波型為和，附載 R1 之正負極皆不會改變，如此即可將交流訊號整流為直流訊號，如圖(2-3-4c)與圖(2-3-4d)所示。但由於此訊號並非恆定之直流電，故可於負載端並聯一平滑電容 C1 以消除部分漣波，該平滑電容之值大於式(2-4-1)之計算結果即可產生效果。

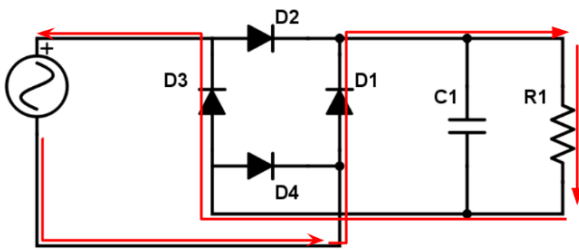


圖 2-3-4a 橋式整流電路分析之一

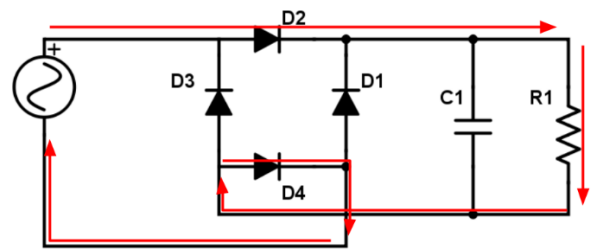


圖 2-3-4b 橋式整流電路分析之二

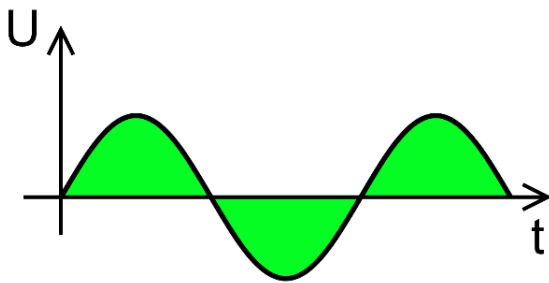


圖 2-3-4c 原始交流電波形

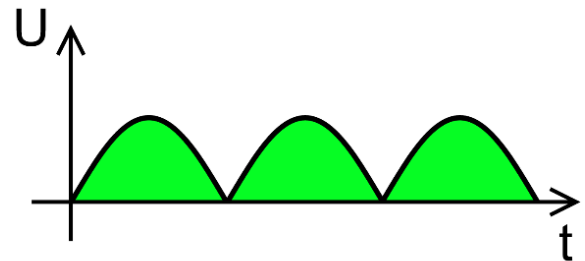


圖 2-3-4d 經橋式整流後之波形

註：圖 2-3-4c 與圖 2-3-4d By Wdwd (Own work) [GFDL

(<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY 3.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>), via Wikimedia Commons

$$C = \frac{0.289}{f \cdot \frac{v}{I} \cdot AC_v}$$

f = 輸入整流器之頻率(Hz)

AC_v = 波紋係數

v = 電壓值(V)

I = 電流值(I)

C = 電容值(F)

式(2-4-1)

2. 電路設計

在二極體方面，基於低回復時間等因素，我們選擇 1N60 作為整流電路中之二極體，並以全波橋式整流之方式將高頻交流訊號(AC)轉換為直流電(DC)，另外必須於整流後之負極端接地以構成地迴電路。

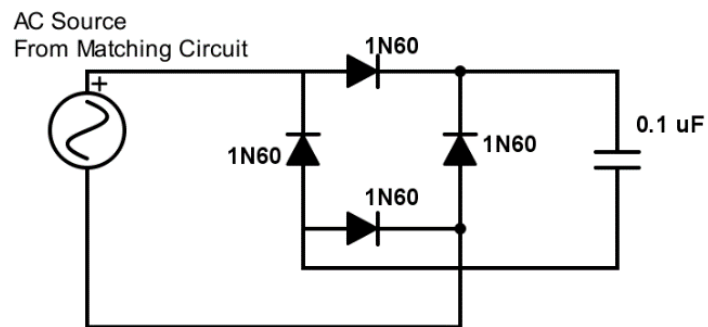


圖 2-3-4e 整流電路圖

參、研究結果與討論

一、結果數據測量模擬及分析

(一)以無線電發射器作為無線電波來源

1. 概述

因設備限制，我們僅能使用 35.160 MHz 之四軸遙控器作為已之頻率之固定無線電發射源，雖其波長無法完整和天線產生共振，但何無法測量之環境電波相比，仍可作為實驗中之控制變因。

在本次測量中，除了量測距離和接收能量之關係外，如圖(3-1-1a)，另由於獵能目標之頻率已知，固可經由式(2-3-5)計算諧振電路之各項電子元件之參數，因此可測量有無諧振電路對獵能結果之影響。

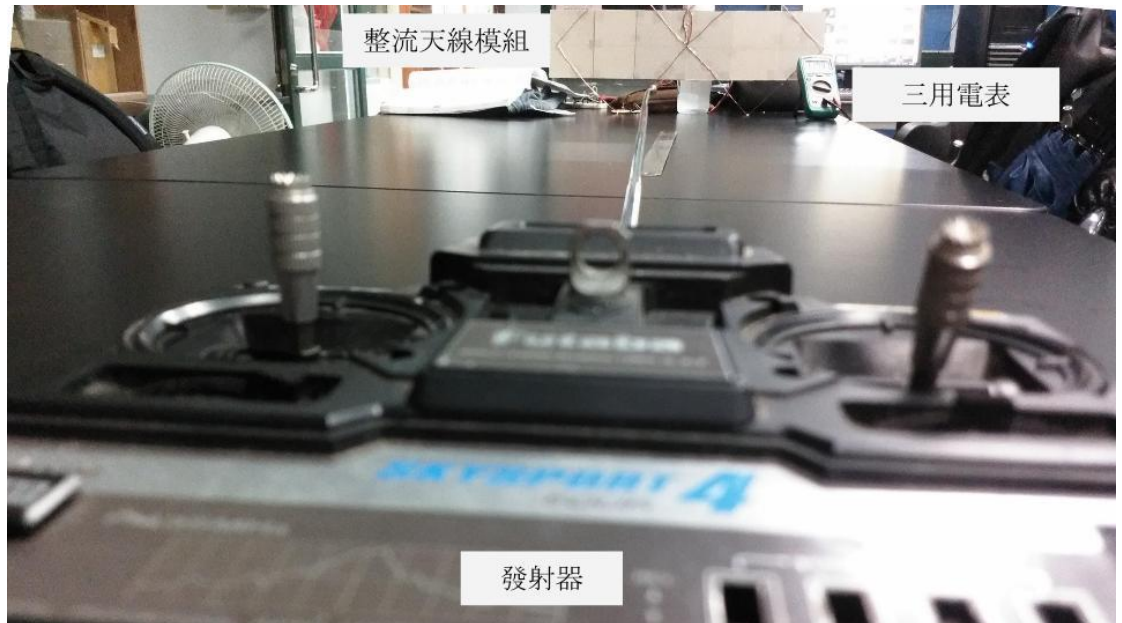
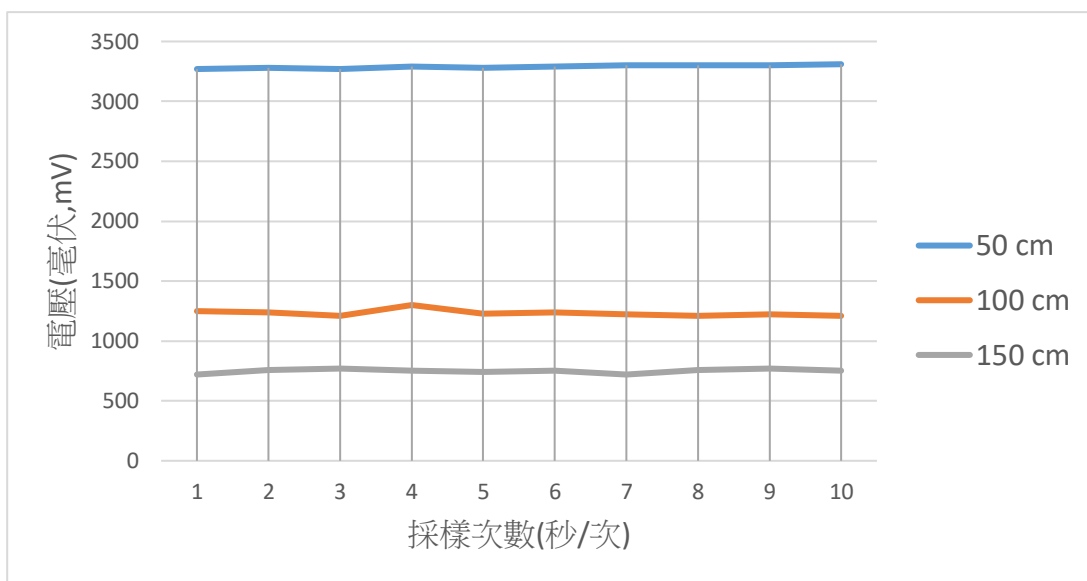


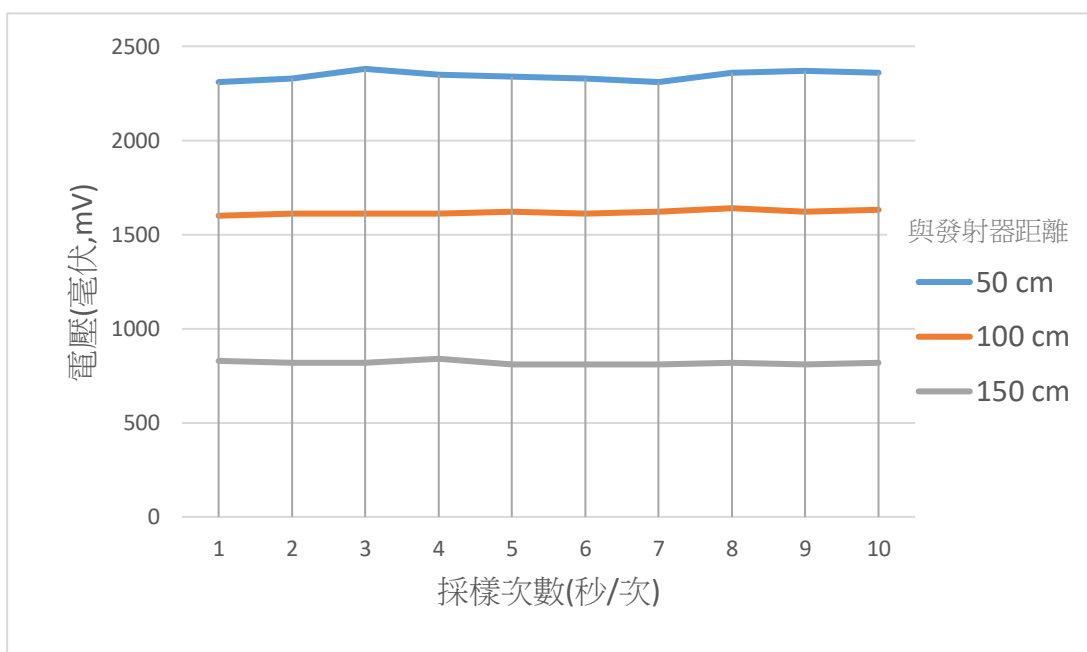
圖 3-1-1a 量測方式示意圖

2. 數據結果

表(3-1-1a) 於與發射器不同距離下所得到之電壓(包含諧振電路)



表(3-1-1b) 於與發射器不同距離下所得到之電壓(不含諧振電路)

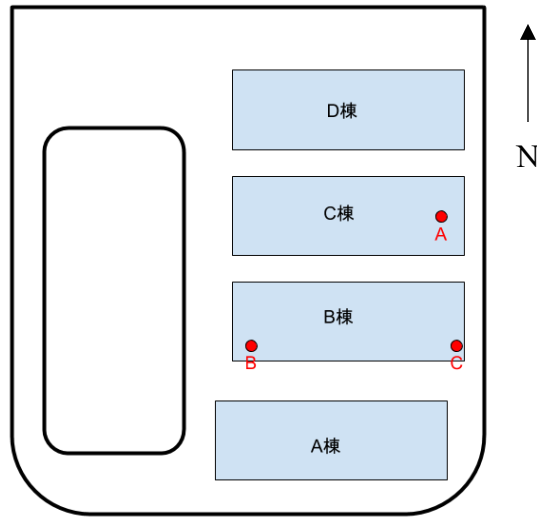


(二)以環境電波作為無線電波來源

1. 概述

此測試模擬真實環境中獵能之能力。我們在校園中隨機選擇三鄰近有地線插座之定點進行測試，測試方式為將天線指向八不同方位並

蒐集電壓資料。

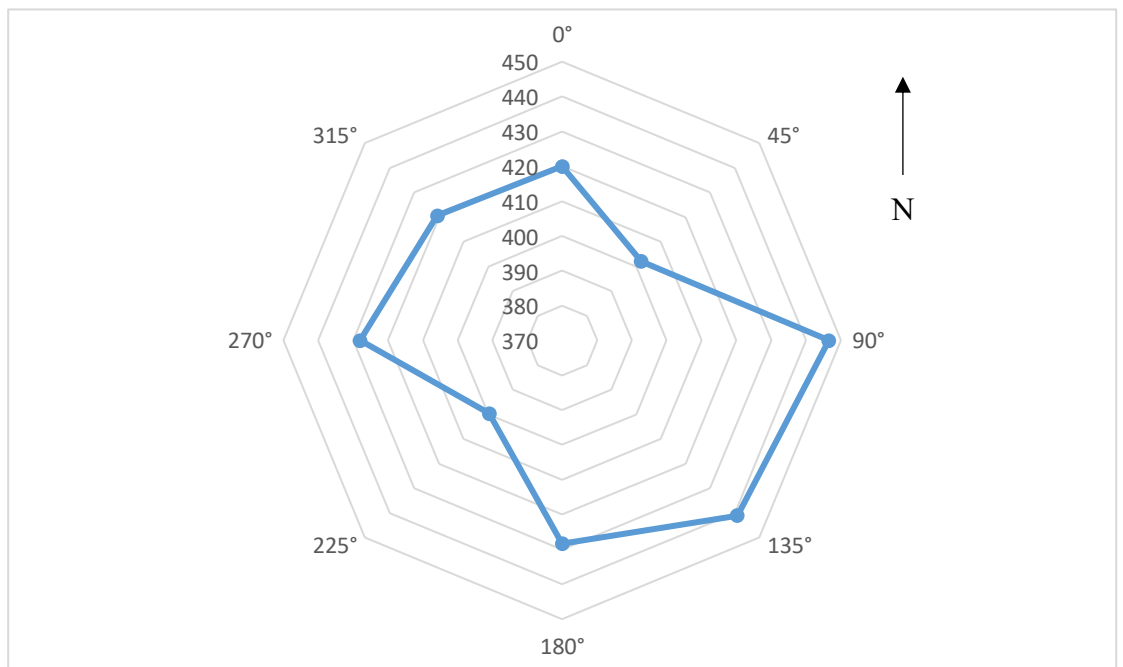


圖(3-1-2) 採樣地點示意圖

2. 數據結果

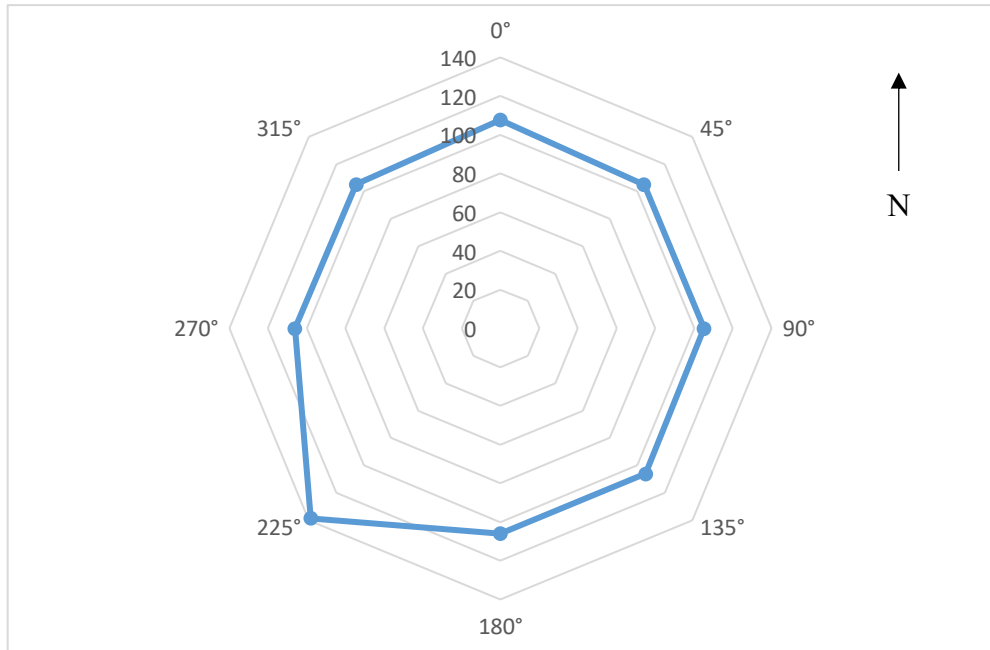
資料經標準化處理分析後可得下方各表。

表(3-1-2a) 於 A 點測得之電壓分布



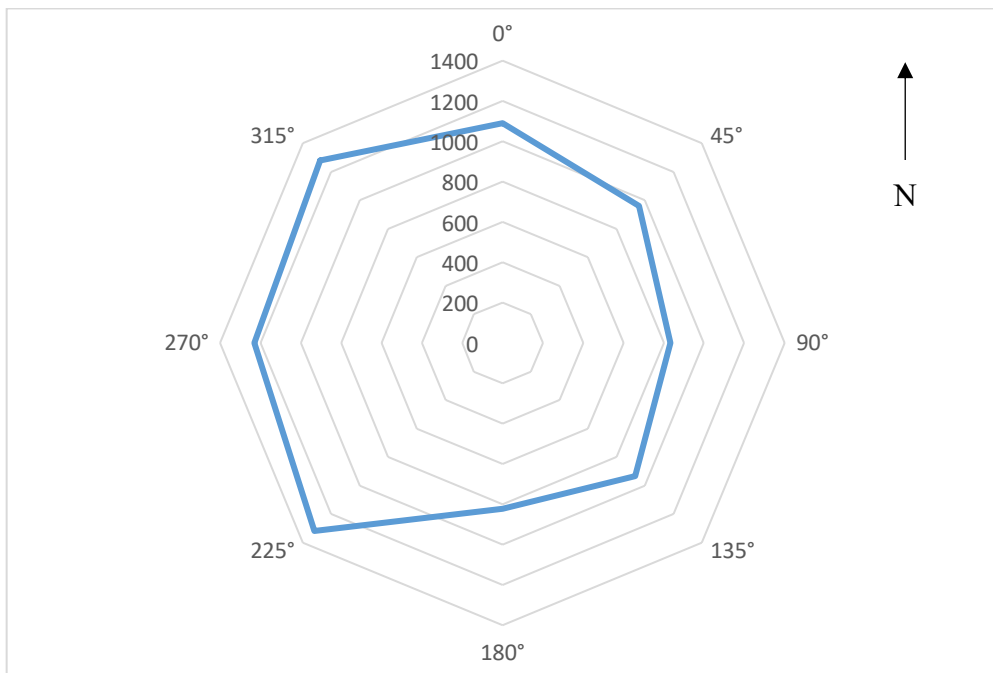
單位：毫伏(mV)

表(3-1-2b) 於 B 點測得之電壓分布



單位:毫伏(mV)

表(3-1-2c) 於 C 點測得之電壓分布

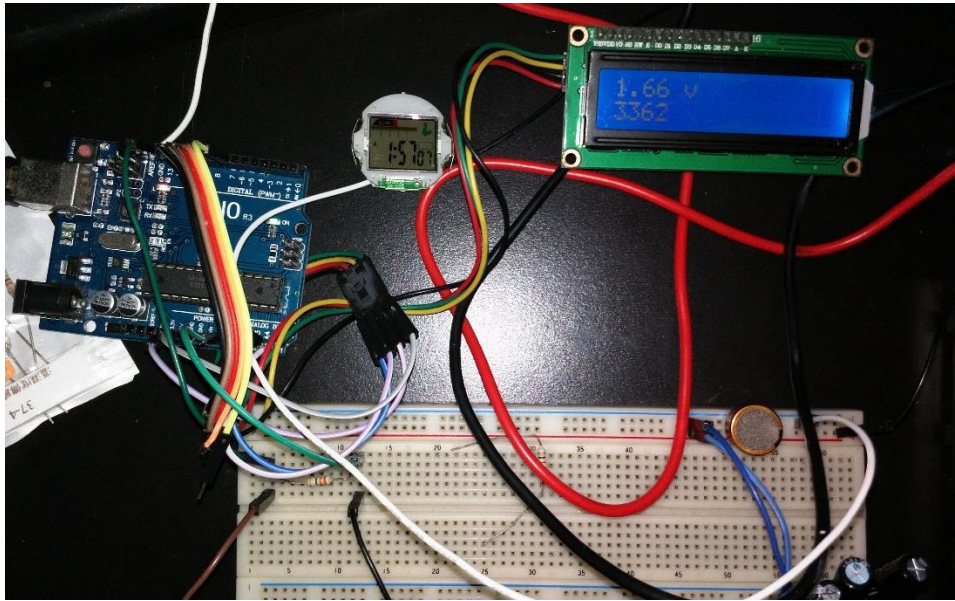


單位:毫伏(mV)

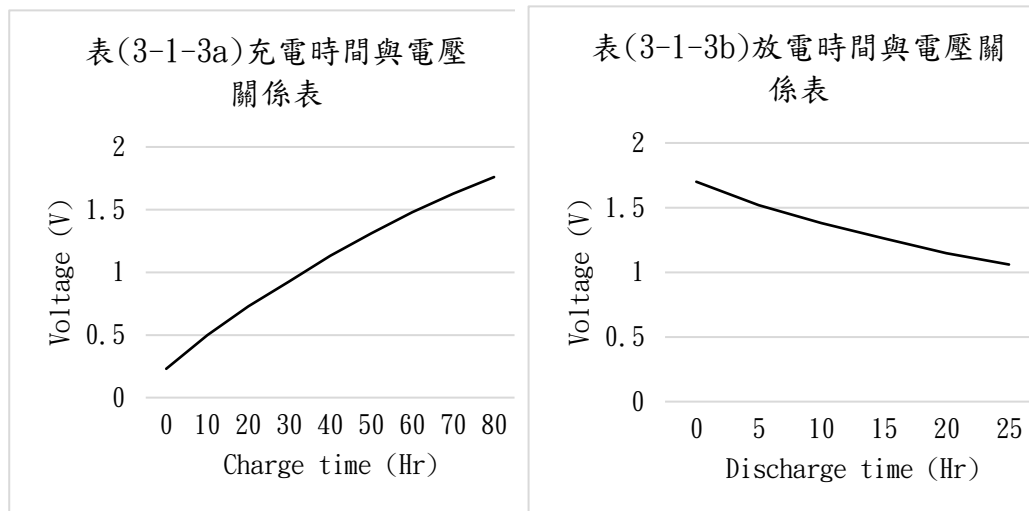
3. 對法拉電容之充放電

在本實驗中，透過 Arduino 與 Raspberry Pi 的結合，作為一自動與遠端伺服器同步之數位電表，自動記錄充放電時的電壓數據。實驗圖如圖(3-

1-3a)，數據如表(3-1-3a)及表(3-1-3b)所示。

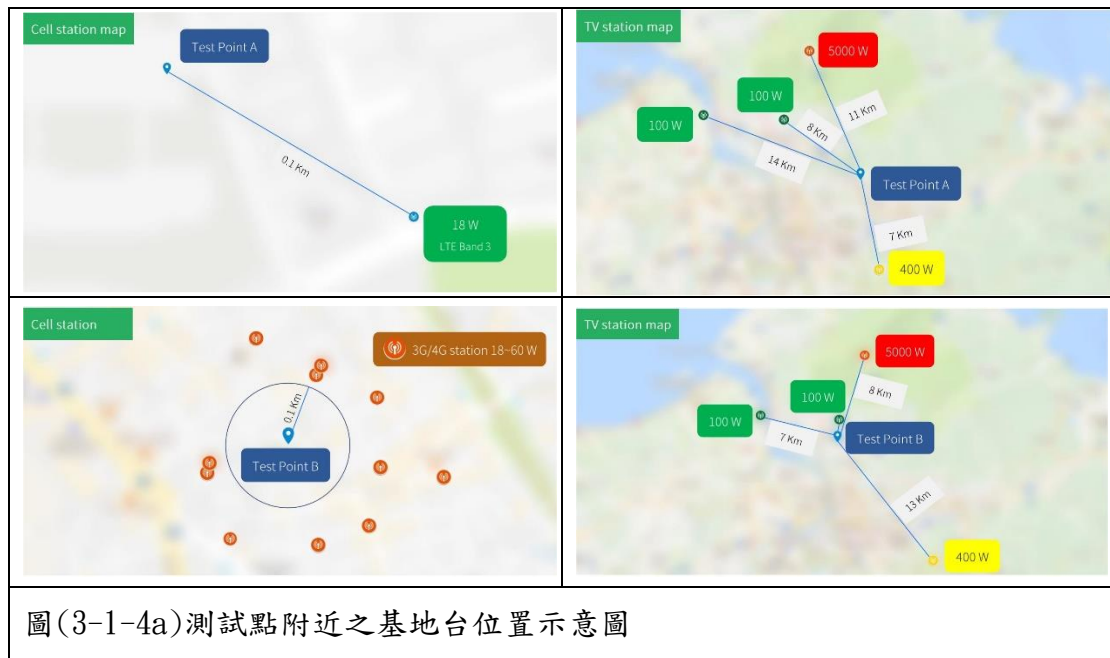


圖(3-1-3a)實驗部分設備圖



4. 以軟體模擬之對數週期天線及雙菱形天線數據收集

針對這兩支天線，我們分別至兩個測試點進行數據收集，測試點及附近之基地台示意圖請見圖(3-1-4a)，對數週期天線得到之平均電功率約為 $2.823 \mu\text{W}$ ，而雙菱形天線則為 $3.36 \mu\text{W}$ 。



圖(3-1-4a)測試點附近之基地台位置示意圖

二、討論

(一) 二極體之選用

在本次實驗中，我們選用之二極體型號為鍺二極體 1N60，但研究後發現，市面上有販售幾乎不存在回復時間(Reverse recovery time)之蕭特基二極體，如 1SS106。蕭特基二極體和一般 P-N 半導體構成之二極體不同於其接面為金屬-半導體構成之蕭特基勢壘，可以迅速地於高頻訊號環境中切換，因此工作頻率甚至可高達到 30GHz 之 SHF(Super high frequency)波段。若以此種類之二極體組成整流電路，由於工作頻段範圍提高，所捕獲到之功率應會隨之提升。

雖該種類二極體存在逆向偏壓較低之問題，但若應用於高頻訊號之整流所產生之電壓仍不會大於該逆向偏壓值，故此問題可被省略。

表 3-2-1 1N60 與 1SS106 重要性能比較

	1N60	1SS106
Reverse voltage	20 V	10 V
Reverse current	0.5 μ A	70 μ A

Rectifier efficiency(min)	55 %	70 %
Reverse Recovery Time (IF=IR=1mA, Irr=1mA, RC=100Ω)	1 nS	10 pS

(二)地線問題

至今我們因為技術上的限制，接收端跟發射端無法形成一個地回迴路(Earth return circuit)，因此我們目前沒辦法在沒有地線的狀況下得到較好的電力轉換結果，以至於現今的實驗方式都是以房屋內的定點為主，在該地點地線之與否作為是否進行實驗重要考慮條件。我們希望能透過改善地線的接地方式來達到能夠隨身攜帶，並隨時供電。

(三)天線增益問題

我們設計的主軸是以菱形天線為主，並以 100Mhz 為主要獵能目標，用 $\lambda/4$ 為每一邊長，則每一邊之長度為 18.75 公分，在參考其他有關複雜天線文獻後，未來，將會增添指向器(indicator)、激勵器(activator)、反射器(reflector)形成一個八木天線，組成一個寄生陣列(Parasitic Array)，按照理論，透過這些加強的方式，會使得收波的效果提高，進而使我們的轉換輸出數值提高，可讓我們的應用範圍更加地廣泛。

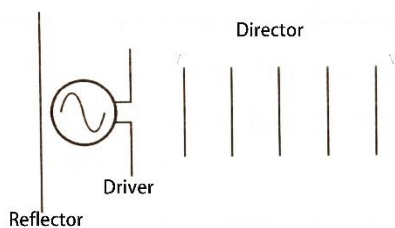


圖 3-2-3a 天線與激勵器及導波器架構

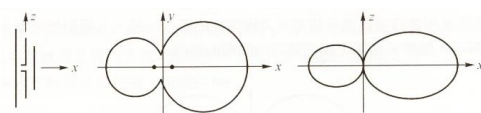


圖 3-2-3b 左列天線之導波場模型

圖片修改自 鄭士康(2006)。電磁波。台北市：全華科技圖書股份有限公司

(四)採集目標及數據分析之考量

在未來的實驗中，我們希望透過採集更多不同頻率的無線電波，包括例如由變電箱釋出之低頻電磁波，以達到更佳的採集效果。另外，我們希望透過高頻示波器以及相關設備，來更精準的測試及驗證實際之天線與電腦模擬數據的差異性。

肆、結論與應用

一、結論

在實驗過後，我們得到了以下幾點結論

- (一)本實驗已成功將環境中之無線電波轉換為可使用之直流電
- (二)我們所設計的實驗作品必須保持在隨時都有地線的情況下使用，如果只接受到環境的電磁波，卻無法與外界形成一個地回電路，轉換出來的效果會與有接地的電路相差數十甚至數百倍，以致於所產出的電力不堪使用。
- (三)此裝置對於環境的改變敏感度極高，當有可能有導波效果之物體如人體接近或遠離時，電表的數值瞬間就會有反應，並且躍遷程度甚高。
- (四)菱形天線的指向性強烈，角度改變與數值結果有較大幅度的差異關聯性。
- (五)諧振電路對於已之頻率共振效果有明顯差異，如表 3-1-1a 與 3-1-1b 的比較結果。

二、應用

我們將其產生之電能運用於電子錶上，並穩定的持續顯示 72 小時以上，見圖 4-2，可見採集之能量具有能力驅動低耗能裝置。而接上 LED 發光二極體，於環境電波功率不大的情況下，會出現閃爍的狀況(當電容充電到 LED 額定電壓後，瞬間對 LED 放電，再繼續進行充電之循環)，若使用可控制之無線電發射器作為來源，LED 則可維持恆亮狀態。



圖 4-2 以環境電波供電之電子錶

三、未來展望

我們所設計出來的產品就像一個小型的發電機，可以無時無刻從空中攔截電波發電。在未來的日子裡，我們希望在短期的時間內能透過這個實驗所產出的電能，能運用在低耗能物聯網裝置上，例如許多物聯網裝置需要每隔一段時間就需定期更換電池，希望能使該裝置擁有自我產電之能力。中程目標，期望能應用於如智慧型手機等行動裝置上，降低家庭耗電量，可以為家中的電費省下一筆費用，最弘遠的目標，同時也正是我們所懷抱的願景，我們希望有朝一日，這項資源能幫助人們在經濟發展與自然保護中取得一個平衡點，替代掉既耗能又高汙染抑或是高危險的發電方式，達到永續經營的最終目標。

伍、參考文獻

- 註一： Ugur Olgun (2012)。Ambient RF Energy Harvesting Technology and its Applications
- 註二： Yen Kheng Tan and Sanjib Kumar Panda (2010)。Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable WSN, Sustainable Wireless Sensor Networks, Yen Kheng Tan (Ed.), ISBN: 978-953-307-297-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-wireless-sensor-networks/review-of-energy-harvesting-technologies-for-sustainable-wsn>
- 註三： Caroline Perry (2014)。Infrared: A new renewable energy source? Retrieved September 30, 2016, Available from: <https://www.seas.harvard.edu/news/2014/03/infrared-new-renewable-energy-source>
- 註四： D. Vatansever, E. Siores and T. Shah (2012)。Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures, Retrieved September 30, 2016, Available from: <http://www.intechopen.com/books/global-warming-impacts-and-future-perspective/alternative-resources-for-renewable-energy-piezoelectric-and-photovoltaic-smart-structures>
- 註五： 國家通訊傳播委員會頻率資料庫查詢系統。October 1, 2016, https://freqdbo.ncc.gov.tw/Portal/NCCB06Q_01v1.aspx
- 註六： 谷腰欣司(譯)(1999)。圖解電波的構造。新北市：世茂出版

社。

- 註七： 鄭士康(2006)。電磁波。台北市：全華科技圖書股份有限公司
- 註八： OpenSignal: 3G and 4G LTE Cell Coverage Map。October 6, 2016, <https://opensignal.com/>
- 註九： Weitron 1N60/1N60P database。November 3, 2016, <http://phys.thu.edu.tw/~mengwen/exp-electronics/datasheet/1N60.pdf>
- 註十： Hitachi 1SS106 Silicon Schottky Barrier Diode for Various Detector, High Speed Switching。November 3, 2016, <http://rtellason.com/diodedata/1ss106.pdf>
- 註十一： Ekkaphol Khansaleel, Kittipong Nuanyai, and Yan Zhao(2002)。A Dual-Band Rectifier for RF Energy Harvesting。Engineering Computations Volume 19。190-197

【評語】 100022

該研究透過天線設計捕獲電磁波轉換成有效電力，實屬能源增益之議題。實作探究程度表現優良、口條清楚，唯建議可思考如何放大與增強捕獲效率。