

# 微波系統導論實驗三

## 非接觸式生理感測雷達

### 3-1 壓控振盪器量測

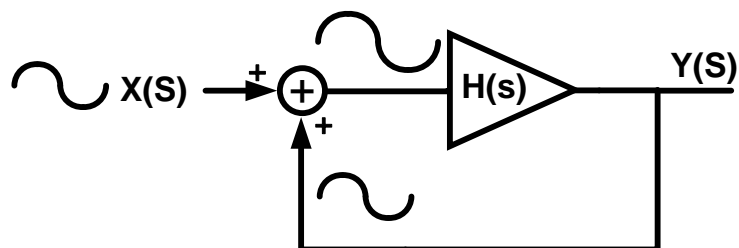
#### 實驗原理：

振盪器是無線通訊模組中重要的元件之一，在發射機中，振盪器提供載波將中頻訊號(IF frequency)升頻至射頻頻率(RF frequency)，再透過天線發射。在接收機中，振盪器的作用是提供本地訊號(LO frequency)透過混頻器將天線接收的訊號降至中頻。振盪器的架構分別由負電阻元件、諧振電路、以及輸出負載所組成，其示意圖如圖一



圖一. 振盪電路架構示意圖

負電阻元件是由主動元件形成負電阻，將直流功率轉換成射頻功率，而振盪訊號的頻率是透過諧振電路來決定，最後負載將振盪訊號引出。振盪的形成一開始是由雜訊所觸發，經由負電阻持續增長後，因主動元件的飽和效應以及諧振電路篩選頻率後進而達到一穩定頻率及振幅的振盪狀態。而振盪形成的條件可用回授的方式說明，圖二所示唯一常見之正迴授電路架構圖，輸入為  $X(S)$  經過頻率響應  $H(s)$  (通常為放大器) 後，輸出為  $Y(S)$ ，且此輸出被拉回與輸入  $X(S)$  作相加後輸入至  $H(S)$  而形成正回授。



圖二 正迴授示意圖

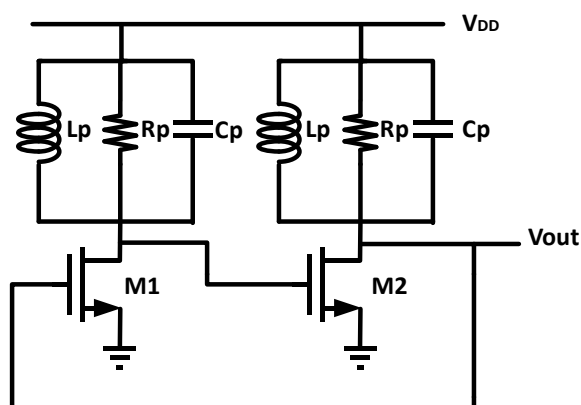
圖二的轉移函數可表示為

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H(s)}{1-H(s)} \quad (1)$$

在特定頻率的  $\omega_0$  下，若符合  $H(s=j\omega_0)=1$  的話，則上式會趨近於無限大，即可以形成振盪。此條

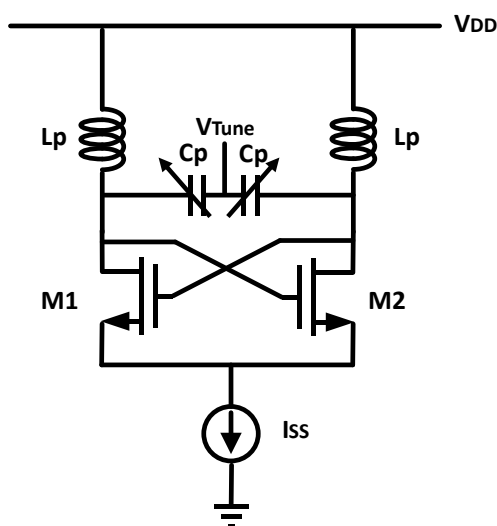
件即為 Barkhausen's criteria : (1) Loop gain  $|H(j\omega_0)|=1$  (2)  $\angle H(j\omega_0)=0^\circ$ 。

上述兩個條件中，說明在穩定振盪的時候，迴圈增益值為 1；但是要達到開始起振的可能，我們通常設計此迴圈增益至少為 3 倍以上。隨著振盪訊號逐漸放大趨於飽和後，則迴圈增益會下降至 1，所以在設計電路時候，小訊號的增益會大於 1。常見的振盪器為 LC 共振腔振盪器，如下圖三所示，由兩級放大器疊接組成，其中輸出端接回輸入端形成正迴授，其振盪頻率決定於 LC 共振之頻率。



圖三. LC 共振腔振盪器

上述的振盪器只能振盪在固定的頻率，但是在無線通訊的應用中，我們需要調整載波的頻率，故我們要加入一個可控制振盪器輸出頻率的機制，一般使用電壓控制元件的特性，以改變振盪頻率，所形成的電路便稱為壓控振盪器(VCO)，如圖四所示，其使用電壓控制電容值，進而改變振盪頻率。

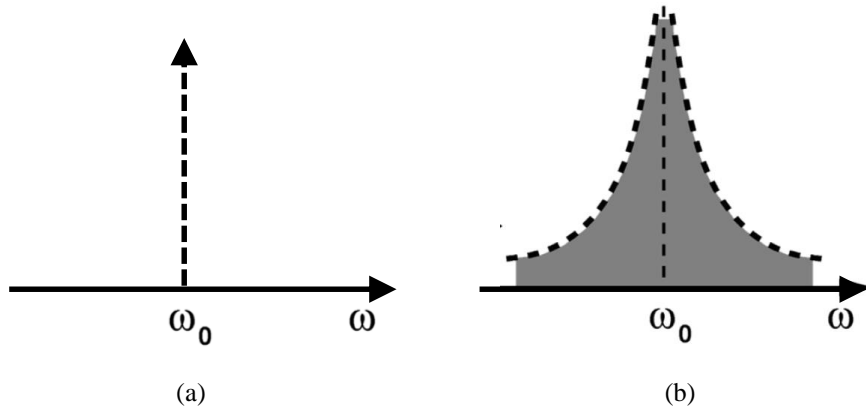


圖四. LC 壓控振盪器

一般來說，當我們拿到一份壓控振盪器的規格文件時，通常都會看到以下幾個描述一顆壓控振盪器的重要參數：

1. 相位雜訊 (Phase noise)

2. 頻率可調範圍 (Frequency tuning range)
3. 基頻輸出功率 (Fundamental output power)
4. 諧波輸出功率 (Harmonic output power)



圖五 (a)理想、(b)實際壓控振盪器的輸出頻譜。

理想上壓控振盪器的輸出為單一頻率的訊號，實際上因為無可避免的雜訊效應，使得在主要振盪頻率的兩側也會有能量的分佈，如圖五所示，相位雜訊的物理意義為中心振盪頻率( $\omega_0$ )差  $\Delta\omega$  位置處，每 Hz 中雜訊功率與中心載波功率的比值，以 dBc/Hz 來表示。

### 實驗器材：

1. 頻譜分析儀(Agilent E4408B)。
2. 同軸線(SMA coaxial cable)。
3. 電源供應器(Power supply)。
4. N-SMA 轉接頭
5. 同軸線(SMA coaxial cable)
6. 壓控振盪器(MiniCircuit ZX95-5400+ VCO)

### 實驗目的：

學習量測壓控振盪器，以獲得基本特性與相關參數。

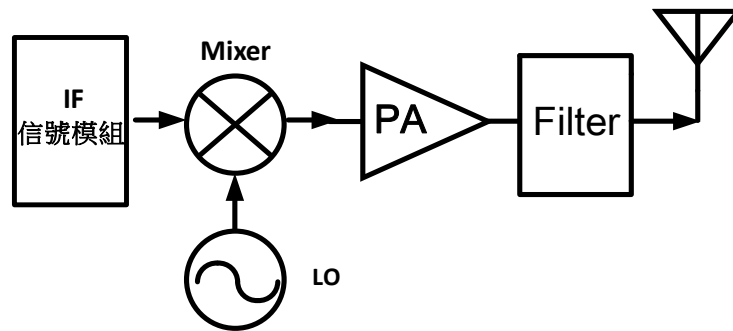
### 實驗步驟：

1. 校正功率器。
2. 設定微波射頻源之輸出頻率5 GHz、功率為 5dBm，使用功率器校準同軸纜線及轉接頭損耗。
3. 將微波射頻源之輸出輸入至頻譜分析儀，使用頻譜分析儀之同軸纜線及轉接頭損耗。
4. 將DC電源加於壓控振盪器，調頻電壓分別由0伏至11伏，紀錄伏特下的輸出頻率、輸出功率，並找出輸出5GHz振盪頻率之電壓大小。

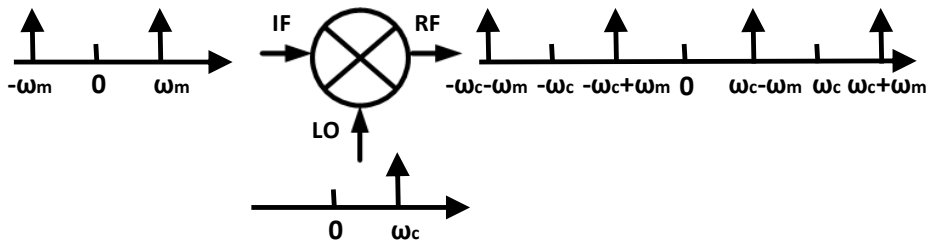
### 3-2 混波器量測

#### 實驗原理：

混波器的作用是將訊號升頻或降頻的元件，在作為升頻的功能時，用於發射機如圖六所示，由於理想上可將混波器想成兩信號相乘的元件，輸入信號為中頻(IF)信號 $f_{IF}$  並且加入本地振盪(LO)信號 $f_{LO}$ ，在混波器的射頻(RF)輸出端，會產生 $f_{LO} \pm f_{IF}$  信號如圖七所示。經過濾波器將不要的信號濾除，取出想要的信號，經由天線發射。在射頻輸出端會有 $f_{LO} + f_{IF}$ 、 $f_{LO} - f_{IF}$ 、 $f_{LO}$  三個頻率信號，一般的通訊系統會擇一選取 $f_{LO} + f_{IF}$  或 $f_{LO} - f_{IF}$  信號，因為在實際的情況下，混波器射頻端與本地振盪端之間的隔離度(RF-LO isolation)並非無窮大，因此混波器的射頻輸出端仍然有本地振盪信號漏出，這個 $f_{LO}$ 信號是不希望混附發射的信號，所以在其後再加一濾波器，用以選擇出正確的載波頻率。



圖六 發射機架構圖。



圖七 理想狀態混波器工作圖。

混波器基本原理是將兩信號做乘法運算，因此係使用非線性之元件，一般來說可用二極體 (diode) 或場效電晶體 (FET) 設計混波器，但是這些元件的特性通常並非簡單的二次方關係可描述。比如說，二極體電壓—電流關係可表示如下

$$I(V) = I_0 + v \left( \frac{dI}{dV} \right)_{V_0} + \frac{1}{2} v^2 \left( \frac{d^2 I}{dV^2} \right)_{V_0} + \dots \quad (2)$$

其中

$$V = V_0 + v \quad (3)$$

上式的 $v$ 為小信號。因此當 $v$ 為本地振盪信號與中頻信號相加，即

$$v = A_{IF} \cos(\omega_{IF} t) + A_{LO} \cos(\omega_{LO} t) \quad (4)$$

可以預期輸出的信號將會有 $v$ 、 $v^2$ 、 $v^3$ 、.....等項，因此並非理想上的相乘關係，而是會有許多項的弦波成份，例如，其中 $v^3$ 項可產生以下這些成份的弦波

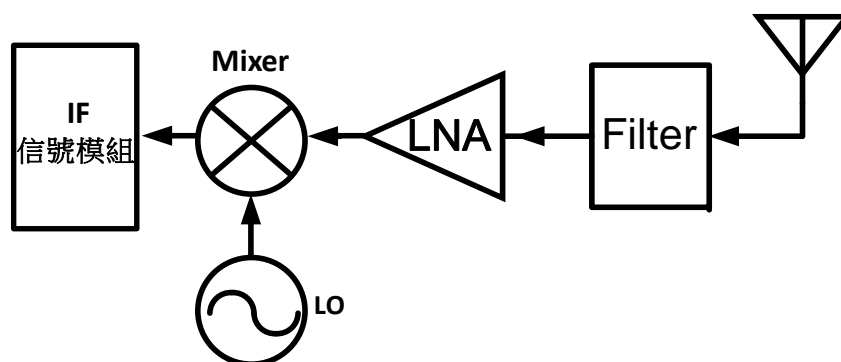
$$\cos((2\omega_{LO} - \omega_{IF})t) \text{、} \cos((2\omega_{LO} + \omega_{IF})t) \text{、} \cos(3\omega_{LO}t) \text{、} \cos(3\omega_{IF}t)$$

因此在混波器的射頻輸出，我們可以觀察到除了 $f_{LO}$ 、 $f_{LO} + f_{IF}$ 、 $f_{LO} - f_{IF}$ 信號以外，還有許多其他的頻率成份存在。

$f_{LO} + f_{IF}$  和  $f_{LO} - f_{IF}$  因二信號頻率相差 $2f_{IF}$ ，一般的濾波器較易將另一個不需要的頻率（稱為image 頻率）以較佳的效果濾除。但是 $f_{LO}$  因為和 $f_{LO} + f_{IF}$  及  $f_{LO} - f_{IF}$  都只相差 $f_{IF}$  頻率，相較於image 頻率較難去除。為避免 $f_{LO}$  隨發射載波發射到空中，造成干擾其它通訊頻段內之正常通信，因此發射用的升頻器元件應儘量避免讓 $f_{LO}$  信號傳到射頻端。

當混波器在接收端當降頻器使用時（如圖八），若 $f_{RF} > f_{LO}$ ，則 $f_{IF} = f_{RF} - f_{LO}$ ，但由射頻端進入接收機之信若為 $f_{LO} - f_{IF}$ ，則經過混波器後仍會產生相同的 $f_{IF}$  信號，此干擾信號為接收機的image 信號。所以一般會在接收機的降頻器前加一個濾波器，用以阻隔此一image 信號，以避免接收機被干擾，此濾波器稱為image rejection filter。

另一考量則是若 $f_{LO}$  信號經由此混波器傳到射頻端，則易由接收端經由天線造成不必要的 $f_{LO}$  輻射。因此，混波器中本地振盪端到射頻端的隔離度參數，和濾波器中對image頻率的阻隔度參數，均為判斷元件優劣之重要參數之一。



圖八 接收機架構圖。

一般來說，當我們拿到一份混波器的規格文件時，通常都會看到以下幾個描述一顆混波器的重要參數。

1. 使用頻段（RF/LO/IF frequency range）
2. 各埠電壓駐波比（RF/LO/IF VSWR）
3. 混波器本地振盪埠與中頻埠之間的隔離度（LO-to-IF isolation）以及混波器本地振盪埠與射頻埠之間的隔離度（LO-to-RF isolation）
4. 轉換損失（conversion loss）或轉換增益（conversion gain）
5. IP<sub>3</sub>（third-order intercept point）或P<sub>1dB</sub>（1 dB compression）

第一項和第二項主要是描述可用頻段及其各埠反射係數，在其它元件也都常見。比較特別的是第三、四、五項。第三項描述本地振盪信號漏到中頻埠與射頻埠的大小，本地振盪信號漏至射頻/中頻埠的壞處已在前面提及。第五項為描述元件非線性的特性。

第四項則是描述信號從中頻頻段轉換到射頻頻段後，功率的損失或增加量，比如說，若有一中頻頻段500 MHz 且其功率為 0 dBm 的信號輸入至混波器的中頻端，在混波器的本地振盪端有5 GHz且功率為5 dBm 的信號輸入，混頻後射頻端輸出的信號為5.5 GHz，經量測後發現此5.5 GHz信號的功率大小為-2 dBm， 0 dBm 的中頻信號轉換後變成-2 dBm 的射頻信號，我們就可以說此混波器在 +5 dBm 本地振盪輸入時，其轉換損失為2 dB。其中要注意的是，轉換損失會隨著本地振盪信號功率大小的不同而改變，我們可以調整本地振盪信號的功率大小，使混波器操作在轉換損失最小的狀況，以降低整個系統的功率損耗。一般來說，在一份混波器的規格文件也會看到廠商建議的本地振盪輸入功率範圍，或是轉換損失對不同本地振盪輸入功率所作的曲線。本節實驗將量測混波器降頻損耗特性，以便3-3節實驗時可利用。

### 實驗器材：

1. 微波信號源(Agilent N5183A)。
2. 頻譜分析儀(Agilent E4408B)。
3. 壓控振盪器(MiniCircuit ZX95-5400+ VCO)。
4. 混波器(Mini-circuits ZX05-153-S+)。
5. N-SMA 轉接頭。
6. 同軸線(SMA coaxial cable)。
7. 網路分析儀(Agilent N5230A、E5071C)。
8. 50Ω負載。

### 實驗目的：

學習量測混波器元件，以獲得基本特性與相關參數。

### 實驗步驟：

#### 混頻器降頻轉換損失量測

1. 微波信號源(AgilentN5183A)的輸出端接至混波器的射頻端，頻率調整為5.1 GHz，然後將混波器的中頻端以同軸線接至頻譜分析儀。
2. 將微波信號源的輸出功率，從 -5 dBm 每隔 5 dBm 慢慢增加到 5 dBm，並記錄每一次混波器的中頻端於0.1GHz 輸出信號的大小。

### 3-3 非接觸生理性感測雷達

#### 實驗原理：

圖九所示為一非接觸生理性感測雷達工作原理示意圖。其中雷達發射訊號  $T(t)$  為

$$T(t) = \cos(2\pi f_1 t) \quad (5)$$

而經過一段距離為  $d_0$  遇到人體心跳後而反射，其訊號  $R(t)$  可表示為

$$R(t) = \cos\left(2\pi f_1 t + \frac{d_0 + x(t)}{\lambda} 2\pi \times 2\right) \quad (6)$$

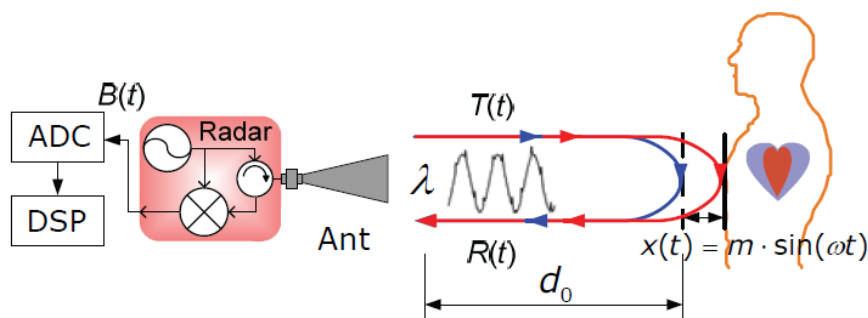
其中  $\lambda$  為雷達發射頻率在空氣中之波長。將  $T(t)$  及  $R(t)$  混頻後之基頻訊號  $B(t)$  為

$$B(t) = \cos\left(\frac{d_0 + x(t)}{\lambda} 2\pi \times 2\right) \quad (7)$$

而人體心跳的移動  $x(t)$  可表示為  $m \cdot \sin(\omega_m t)$ ，則

$$B(t) = \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} m \sin(\omega_m t) + \phi\right) \quad (8)$$

若係數  $\frac{4\pi}{\lambda} m$  甚小，透過傅立葉級數展開後，其中  $B(t)$  之頻率成份便為  $\omega_m$  亦即心跳頻率。



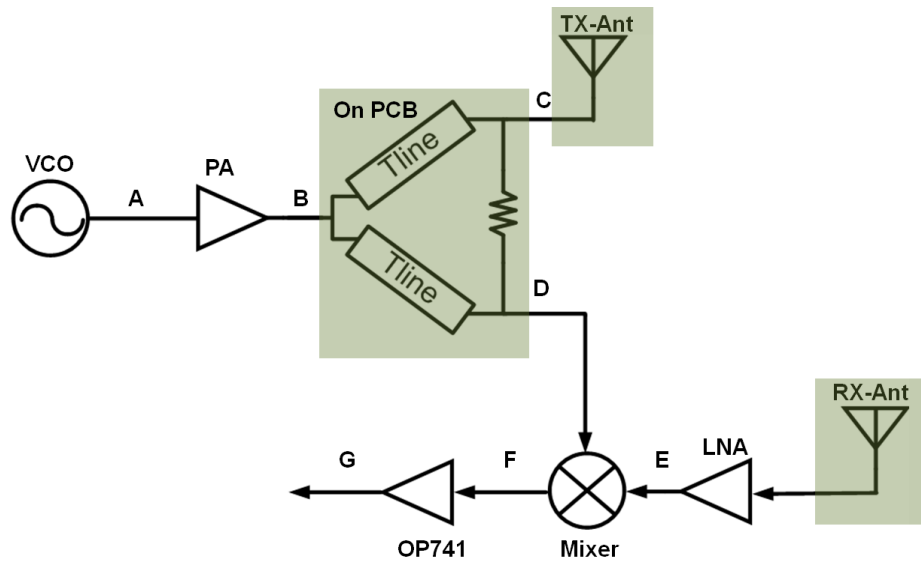
圖九、感測生理性雷達示意圖。

而雷達接收到的能量大小可由雷達公式估算如下

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 d_0^2} \quad (9)$$

其中  $P_r$  為接收功率大小、 $P_t$  為發射功率大小、 $G$  為天線之增益、 $\sigma$  為雷達截面積(胸口約  $0.09 \text{ m}^2$ )。

圖十所示為此次實驗之生理性感測雷達架構圖。壓控振盪器(VCO)之輸出訊號透過功率放大器放大，經由威金森功率分離器(Wilkinson power divider)，可分離成兩個同相位且振幅大小相同的訊號，其輸出一端饋入天線發射，另一端則饋入混波器(Mixer)，作為本地振盪源(LO)。發射信號偵測到生物體後反射之訊號，經由接收天線，透過低雜訊放大器放大，饋入至混頻器射頻端(RF)。降頻後之基頻訊號(IF)藉由運算放大器 OP741 放大後，可由示波器觀察，在時域上即可觀察到生物體之呼吸或心跳的週期性，進而計算出呼吸及心跳之頻率。此次實驗須記錄各元件之增益或損耗，並且記錄每個節點之功率大小。



圖十、感測生理性雷達架構圖。

### 實驗器材：

1. 微波信號源(Agilent N5183A)。
2. 頻譜分析儀(Agilent E4408B)。
3. 網路分析儀(Agilent N5230A、E5071C)。
4. Agilent 85052D 50Ω 3.5mm 校準器 (calibration kit)。
5. 壓控振盪器(MiniCircuit ZX95-5400+ VCO)。
6. 混波器(Mini-circuits ZX05-153-S+)。
7. MiniCircuit ZX60-6013E+。
8. MiniCircuit ZX60-5916M+。
9. 威金森功率分離器。
10. 平板天線。
11. N-SMA 轉接頭。
12. DC block (BLK-89+)。
13. 同軸線(SMA coaxial cable)。
14. 皮尺。
15. 示波器。
16. 電源供應器。

### 實驗目的：

了解雷達之鏈路計算，並且使用雷達量測人體之呼吸以及心跳。

### 實驗步驟：

1. 對網路分析儀進行雙埠校準。
2. 將威金森功率分離器之輸出接上 50Ω 負載，用網路分析儀量測威金森功率分離器之 S 參數。



3. 根據實驗紀錄表確認各個元件之偏壓及設定電源供應器之限流。
4. 根據第二節，將壓控振盪器之輸出頻率為 5GHz，並將之輸出接連接至放大器 (ZX60-5916M+)。
5. 使用功率計量測結點 B 之功率大小，並且計算增益於實驗二是否一致。
6. 將功率放大器之輸出端接至威金森功率分離器，節點 D 接至 50Ω，使用功率計量測節點 C 之功率，並且計算威金森功率分離器之損耗於步驟 2 之 S 參數是否一致。
7. 將節點 C 接至天線，節點 D 接至混頻器之 LO 端。
8. 將天線接至微波放大器(ZX60-6013E+)輸入，輸出接至混頻器之 RF 端。
9. 測量 OP741 之 DC 增益，並將混頻器之 IF 端輸入至 OP741，OP741 輸出端接示波器。
10. 上述步驟組合完雷達，可量測節拍器之週期性，並且將示波器觀察到之波形存檔。
11. 量測藍芽喇叭頻率，並且將示波器觀察到之波形存檔，請測量雷達偵測之最遠距離。
12. 測量人體之呼吸以及心跳，並且將示波器觀察到之波形存檔。

## 實驗三 感測生理性雷達實驗報告

1. 根據 Radar equation，估計 5GHz 雷達在空氣中的損耗，並與量測結果比較。
2. 根據實驗 1 所計算之天線增益，假如偵測距離長達 1m，請設計雷達鏈路表。
3. 如何增加雷達之可偵測距離？請列出 3 個方法。
4. 如果人體心跳之位移太小，如何增加雷達偵測能力？
5. 請附上雷達量測結果(頻域及時域皆附上)
6. 此雷達可偵測到心跳嗎？如果不行，請說明原因？
7. 使用傅立葉級數展開接收訊號混頻後的基頻訊號，令  $\Phi=0^\circ$ 、 $f_1=5\text{GHz}$ 、心跳 1.2Hz 以及距離 0.02m，計算  $\cos(\omega_m t)$  和  $\cos(2\omega_m t)$  的係數。
8. 使用傅立葉級數展開接收訊號混頻後的基頻訊號，令  $\Phi=90^\circ$ 、 $f_1=5\text{GHz}$ 、心跳 1.2Hz 以及距離 0.02m，計算  $\cos(\omega_m t)$  和  $\cos(2\omega_m t)$  的係數。
9. 附上實驗紀錄表。

# 實驗三 實驗紀錄表

組別：

\*本實驗之元件之直流電壓及限流(請務必請助教檢查後，再輸出電源供應器)。

	$V_{DC}$	$I_{lim}$
VCO	5 V	30 mA
PA(5916M+)	5 V	150 mA
LNA(6013E+)	12 V	100 mA
OP741	$\pm 15$ V	30 mA

## 3-1 壓控振盪器特性量測

(1) 將訊號產生器的輸出頻率設定在5 GHz，分別利用功率計和頻譜分析儀量測功率，

訊號產生器設定功率	功率計量測	同軸電纜線損耗
dBm	dBm	dB
訊號產生器輸出大小	頻譜分析儀量測	同軸電纜線損耗
dBm	dBm	dB

(2) 壓控振盪器(VCO)實驗記錄表

$V_{DC} = 5$  V,  $I_{DC} =$  \_\_\_\_\_ mA; 根據下表，輸出5GHz振盪頻率之電壓大小= \_\_\_\_\_ V

$V_{tune}$	振盪頻率 (GHz)	頻譜分析儀量測大小 (dBm)	cable 損耗 (dB)	壓控振盪器功率 (dBm)
0 V				
1 V				
2 V				
3 V				
4 V				
5 V				
6 V				
7 V				
8 V				
9 V				
10 V				
11 V				

### 3-2混頻器特性量測

1. 根據3-1節，調整壓控振盪器輸出為5 GHz，並將壓控振盪器串接PA，利用頻譜分析儀量測此時PA之輸出信號功率為\_\_\_\_\_ dBm，接著將PA的輸出接至混頻器LO輸入端。

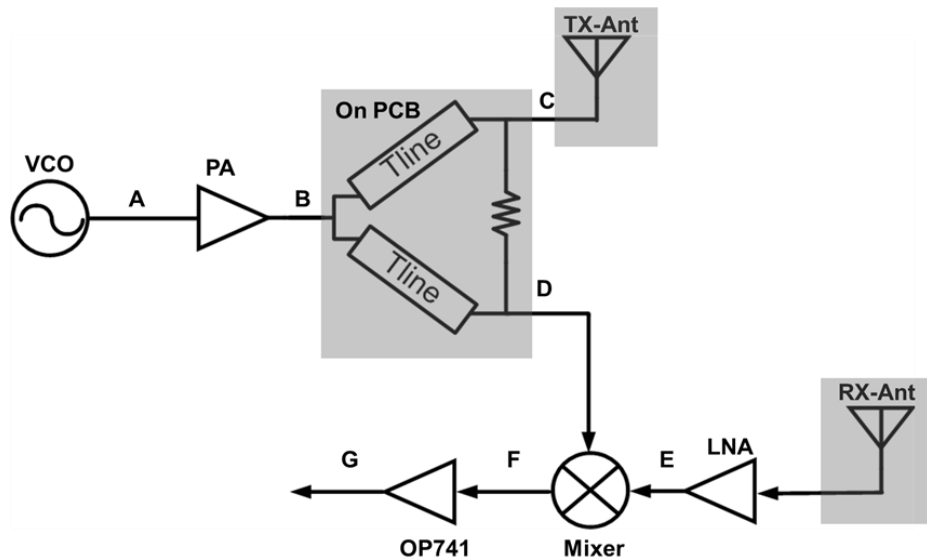
#### 混頻器降頻轉換損失

\*微波信號源的輸出端接至混波器的射頻端，頻率調整為5.1 GHz，然後將混波器的中頻端以同軸線接至頻譜分析儀。調整微波信號源的輸出功率，記錄混頻器的降頻轉換損失。

$P_{RF}$ (dBm)	$P_{IF}$ @5.1GHz- 5GHz (dBm)	Conversion Loss
-5		
0		
5		

### 3-3 雷達特性量測

雷達架構圖



1. 將威金森功率分離器之一輸出埠接上  $50\Omega$  負載，用網路分析儀量測威金森功率分離器之  $S$  參數，存 CSV 檔或 sNp 檔。  
@ 5 GHz,  $S_{11} = \underline{\hspace{2cm}}$  dB,  $S_{21} = \underline{\hspace{2cm}}$  dB,  $S_{22} = \underline{\hspace{2cm}}$  dB
2. 請確認各個元件之偏壓及設定電源供應器之限流
3. 壓控振盪器之輸出頻率為 5GHz，記錄節點 A 之功率為  $\underline{\hspace{2cm}}$  dBm
4. 測量功率放大器(ZX60-5916M+)之輸出，記錄節點 B 之功率為  $\underline{\hspace{2cm}}$  dBm
5. 將功率放大器之輸出接至功率分離器，功率分離器節點 D 接至  $50\Omega$ ，記錄節點 C 之功率為  $\underline{\hspace{2cm}}$  dBm。接著將節點 C 接至天線，此天線將作為傳輸天線。
6. 節點 D 接至混頻器之 LO 端
7. 將另一做為接收之天線接至微波放大器(ZX60-6013E+)輸入端，節點 E 輸出接至混頻器之 RF 端。
8. 測量 OP741 之 DC 增益

OP741 (V+)	OP741 (Vout)	Gain
0.01V	V	dB

9. 將混頻器之 IF 端接至 OP741 之輸入，OP741 之輸出接至示波器，使用此雷達測量節拍器之頻率。

節拍器頻率(Hz)				
距離(m)				

\* 請將示波器觀察到的波形存檔，擇一即可。

11. 測量藍芽喇叭振動頻率

喇叭頻率(Hz)				
距離(m)				

\* 請將示波器觀察到的波形存檔，擇一即可。

12. 測量呼吸以及心跳

\* 請將示波器觀察到的波形存檔。

TA's signature: \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_