**Noise Fundamentals experiment**

**一、實驗目的 ：**

了解**Johnson noise**產生的原由，學習將其量化、了解其與Boltzmann's constant、Avogadro number以及溫度的關聯性、利用量化的shot noise量測電子電量、探討雜訊對量測造成的誤差，並利用Ch5校正方法修正此誤差量。

**二、實驗原理：**

請參考NTU COOL或原廠講義的CH1,CH2,CH3,CH5，有興趣者可自主增加CH4,CH6,CH8的部分, 欲熟悉實驗儀器可做CH7。

<https://youtu.be/VE3nuu8u6w4>

**三、實驗章節簡介**

**1.0 The reasons for Johnson noise, and its predicted size**

- 介紹 Johnson noise 的原因和預測的大小

- 解釋 Johnson noise 是由於電子在電阻中的熱運動所產生的

**1.1 The mean-square voltage of Johnson noise**

- 介紹 Johnson noise 的均方電壓

- 解釋如何使用示波器測量 Johnson noise

**1.2 Quantifying Johnson noise**

- 介紹如何量化 Johnson noise

- 解釋如何使用模擬電路直接執行均方定義的雜訊操作

**1.3 Observing and Correcting for Amplifier Noise**

- 介紹Amplifier Noise，並利用截距法分離Amplifier Noise及Johnson noise.

**1.4 The resistance dependence of Johnson noise**

- 介紹 Johnson noise 的電阻依賴性

- 解釋 Johnson noise 的大小如何隨著電阻值的變化而變化

**1.5 The bandwidth of Johnson noise**

- 介紹 Johnson noise 的頻寬

- 解釋如何測量 Johnson noise 的頻寬

**1.6 Johnson noise density, and Boltzmann's constant**

- 介紹 Johnson noise 密度和玻茲曼常數

- 解釋如何通過 Nyquist 公式將測量值與玻茲曼常數相關聯

**2.0 Setting up to see a bandwidth**

介紹如何設置系統以查看Gain的頻率響應G(f)。

**2.1 Summary of how to measure a noise density**

介紹如何從微小、波動、平均值為零的雜訊信號Vn(t)到幾乎穩定的直流值，並與<Vn2(t)>有可追溯的關係。

**2.2 How the 'equivalent noise bandwidth' is defined**

介紹如何定義濾波器的帶寬。

**2.3 Bandpass filters and 'spot' noise-density measurements(Optional)**

不同於1.5節以f1 f2定義帶寬，本節以1.3節之方法去除電阻雜訊，然後用Bandpass filter抽測每個點，以證實範圍內的雜訊為white。

**3. Shot noise：**

**3.0 The reason for shot noise, and its predicted size**

介紹shot noise產生的原因，以及它的預測大小。

**3.1 Shot noise in a resistor**

介紹在電阻中產生shot noise的原理。

**3.2 Shot noise in a photodiode**

介紹在光二極體中產生shot noise的原理。

**3.3 Shot-noise measurement using a transimpedance amplifier**

介紹一種用於測量shot noise的電路，並說明如何將光電流轉換為電壓。

**3.4 Diagnosing proper high-frequency behavior**

利用LED閃爍的方波，觀察光二極體及preamp電容得出的頻率響應造成的震盪訊號的，並調整電容值補償以消除該震盪訊號。

**3.5 Sub-shot-noise currents**

討論shot-noise與電流雜訊的獨立性(電流雜訊來自具庫倫相互作用力的電子雲，藉由碰撞及擴散通過電阻，與shot-noise假設的彼此獨立且隨機運動的電子不同。

**3.6 Photodiodes and photocurrent**

介紹光電二極體的光電流於不同偏壓及光照底下的反應。

**3.7 Photodiodes' current-voltage curves**

承接前一節，量測光電二極體的IV curve。

**4. Noise as a function of temperature (Optional)**

**4.1 設備、方法和問題**

- 介紹“熱探針”和杜瓦容器

- 解釋如何測量隨溫度變化的約翰遜雜訊

- 討論測量過程中的問題和挑戰

**4.2 約翰遜雜訊和溫度**

**-** 描述約翰遜雜訊和溫度之間的關係

- 推導約翰遜雜訊電壓的理論方程式

**4.3 溫度測量和建模**

**-** 討論實驗裝置中的溫度控制和測量方法

- 介紹使用熱電偶測量溫度的方法

- 描述探針中溫度分布的建模方法

**4.4 溫度控制**

**-** 介紹功率限制加熱器及其控制電路

- 描述使用PID控制器調節加熱器功率的方法

- 討論溫度控制中的問題和挑戰

**5. 校準**

**5.0 指定精度**

本節將跟隨雜訊信號通過雜訊基礎設備的模塊，並給出影響雜訊測量的不確定性的估計值。不確定性估計值旨在表達一個標準差。請注意，如果需要，5.1-5.4節提供了可以減少這些不確定性的校準方法。

**5.1 校準放大器增益**

雜訊測量需要知道前級放大器增益G1和主放大器增益G2。本節描述了如果需要校準，如何測量這些增益。每個放大器都有“部分”。前級有一個輸入級，其出廠時設置為增益為6.00（儘管可以更改此增益-請參見附錄A.4）。然後是增益為100的另一個增益級。主放大器也可以進行模塊化測試，因為它可以排列為G2 =（1或10）x（1或10）x（10或15或...

**5.2 校準濾波器增益及帶寬**

本節介紹了G(f)的量測及建模，以得到修正過後的△f。

**5.3 校準平方器**

本節介紹了如何校準並修正平方器的公式模型。

**5.4 雜訊校正器(Optional)**

本節利用一已知的雜訊源，來對前幾章雜訊量測的結果進行檢查驗證。

**5.5. 正確的雜訊量測單位是什麼?** **(Optional)**

討論使用雜訊單位的時機

**6. Further projects (Optional)**

**6.1** Time-domain characterization of the filter sections step-response data, and models for it

介紹一種新的方法來測量濾波器的時域特性，並使用時間和頻率響應之間的關係來計算等效雜訊帶寬。它還提到了在第2.2節中使用“紙模型”來計算增益函數G（f）的方法，以及在第5.2節中測量G（f）值的方法。此外，它還提到了低通濾波器和2極狀態變量響應的情況。

**6.2** Narrow-band measurement of noise -- the 'lock-in' method using the multiplier, for very narrow-band results

介紹一種稱為“lock-in”方法的窄帶雜訊密度測量方法。它解釋了如何使用鎖相放大器來測量雜訊密度，並提供了一個基於濾波器和鎖相放大器的實驗室設置示例。它還提到了如何使用鎖相放大器來測量雜訊密度的優點，例如可以測量非常小的信號和減少背景雜訊的影響。

**6.3** Noise from pn-junctions getting shot noise with*out* the use of photons

介紹如何從p-n結裝置中產生雜訊。它解釋了如何使用p-n結裝置來產生雜訊，並提供了一些示例電路，這些電路可以產生顯示雜訊的電流。它還討論了如何使用鎖相放大器來測量從p-n結裝置中產生的雜訊，以及如何校正放大器雜訊和零偏差。最後，它提到了如何從這些電路中獲得完整的shot noise，並討論了p-n結裝置的動態阻抗對雜訊產生的影響。

**6.4** Johnson noise vs. temperature: noise thermometry a version of noise thermometry feasible with this apparatus

介紹雜訊熱計量學，這是一種利用熱雜訊測量溫度的技術。它解釋了如何使用約翰遜雜訊來建立絕對溫度標度，並提供了一些示例電路，這些電路可以產生顯示雜訊的電壓。它還討論了如何使用鎖相放大器來測量從電阻器中產生的雜訊，以及如何校正放大器雜訊和零偏差。最後，它提到了如何使用雜訊熱計量學來建立絕對溫度標度，並討論了如何使用三相點水來定義開爾文溫度標度。

**7. Practical guide to Johnson-noise measurements(Optional)**

**7.1 簡介**

本節旨在幫助您開始進行真實的雜訊測量，並提供了一些基本的背景知識。

**7.2 實驗室設置**

本節提供了有關如何設置實驗室以進行雜訊測量的詳細指示。

**7.3 雜訊密度的樣本計算**

本節提供了有關如何計算雜訊密度的詳細指示，並提供了一個表格，其中包含了測量雜訊密度所需的原始數據。

**8. Practical diagnostics(Optional)**

是一章關於提供實驗技巧，以診斷實驗設置特性的章節：

**8.1. 三個實驗參數**

本節介紹測量雜訊的三個參數：1）輸出電壓，2）放大器增益，3）放大器帶寬。

**8.2 The qACF and the qFFT**

本節（8.2）討論了qACF（準自相關函數）和qFFT（準快速傅立葉變換）技術，用於診斷放大器鏈的帶寬特性。最後還討論了其他一些qACF和相應的qFFT信號，讓讀者一瞥可以使用所述技術觀察到的各種時間和頻率域光譜。

**8.3. Full-bandwidth signals**

本節討論了使用qACF和qFFT技術研究所謂的“全頻信號”，即未經任何濾波器處理的信號。

，使用特定參數的RC濾波器觀察噪聲信號的變化。通過對比不同情況下的qACF和qFFT信號，深入了解噪聲信號的帶寬和頻譜特性。

**8.4. Observing Interference**

使用一段裸露的電線接到示波器上，觀察電場變化，探討熒光燈產生的電場干擾和不同設置下的FFT圖譜；探索可能的電場泄漏路徑，以及注入受控干擾信號的方法；研究干擾信號對噪聲測量的影響，通過測量不同內部電阻下的qACF和qFFT。

**8.5. Magnetic-field interference**

創建一個大線圈，利用法拉第電磁感應定律產生人造磁場干擾qACF。

**四、方法步驟概要 ：**

**五、注意事項：**

**實驗開始注意事項**

1. 請確認Pre Amplifier、Gain、及Bi-polar Power supply的旋鈕有調至最小。
2. 將Low level Box面板翻過來時，請小心勿將線材扭曲，並確認螺絲有插在盒子中，以免面板自身重量施力於元件或電路板上。
3. Low level Box在做任何改變之前，一定要將內面的電力開關關上。
4. 在翻轉Low level Box回到正面之前，請先檢查內面的電力開關有打開。
5. 養成良好的收納習慣，請隨手把解下來的元件收到盒子標籤上，屬於它的位子。
6. 第三章燈泡放入座子固定時，用手旋緊，切勿用螺絲起子旋緊，那容易導致燈泡損毀，並提供的燈泡規格不一，目前供應的大都是5V為主，可兩人拿起LLE面板，試調整感覺燈泡亮度，不確定者請找助教詢問。
7. Photodiode相關實驗燈源(燈泡、LED)光強度不可太強，會導致非線性效應而有巨大誤差。
8. Multiplier有一初始偏壓 **-**3.5mV建議剛開始時用超過1Vpp以上的輸入來運作，可分接至示波器看拋物線，確認平方器有作用，值的調整這可透過前面的GAIN調整成適當檔位。
9. 若有做第四章，安置Dewar瓶時請將彈力繩鬆鬆的鉤在背後的螺絲柱上，確保該瓶不會有意外傾倒的可能性就好。
10. 【重要!】浸過液態氮的勺子、Probe 該結霜的區域短時間內切勿接觸到皮膚，那可能導致皮膚結凍，被結霜表面黏住，而隨之被撕下來，(請勿置於活動區域中)
11. 用過的液態氮要回收，請穿著抽屜中的棉布手套，將剩餘液態氮倒回大的Dewar瓶中。
12. Amplify有偏壓上限，輸出會達飽和，並非無限制放大(原理請複習OP Amplify基本運作原理)。

**實驗結束注意事項**

1. 請將電路回復原廠Fig7.2c的設定，將Pre Amplifier及 Gain的旋鈕，轉到最小。
2. 若有做第四章，請將Dewar瓶及Thermal Probe放在桌上晾乾，下面墊抽屜中的海綿保護。
3. 清點各元件數量後，將各個元件收回原本的盒子裡，將控制器背板與Function generator的開關關閉、關機、關電、關power後，將實驗區域(桌面、抽屜及附近地面)整理乾淨 (同組同學請互相double check)。
4. 請助教檢查後方能簽退，記得上傳當日數據。

**六、回答問題(擇五題)：**

1. 為何在高電阻值時，Johnson Noise的偏差變大了?
2. Squarer-and-Averager也會有雜訊嗎?試解釋其影響。
3. 請找尋Photodiode受光強照射的資料。
4. 為何科學領域常使用reverse bias區域來進行量測，forward bias不是訊號大，很容易偵測到不用再額外放大，又reverse bias的diode反應速度，快於forward bias 狀態時的反應速度，這是為什麼?又會快上多少是否可以嘗試建模。
5. 請用自己的話描述一遍voltage follower的功用，並在實驗中的角色。
6. 請推導RG174 及RG58線材之最小彎曲半徑，實驗中有無遵守該曲律半徑。
7. 請問鎖相放大器可以避開雜訊影響的原因為何，並閱讀6.2簡述心得。
8. Fig.A.11c 可透過示波器同時看到兩種雜訊的疊加，請問這是如何辦到的。