

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Room-Temperature Evaluation of Quantum Control

Components in Cryo-CMOS System

低溫 CMOS 系統中量子控制元件的室溫評估研究

專題領域：電子領域

組別：B579

指導教授：張鑑元教授

組員姓名：蔡宇翔、陳柏謙、陳珮瑄

研究期間：114 年 2 月 1 日至 114 年 11 月 1 日，共 10 個月

報告摘要

本專題研究針對量子控制系統中之核心元件（Low Noise Amplifier, LNA 與 IQ Mixer）進行室溫電性分析與校正實驗，作為後續低溫量測（Cryogenic Measurement）與保真度分析（Fidelity Analysis）的前置步驟。研究內容分為兩大部分：實驗端與模擬端。

在實驗端，首先完成晶片打線（Wire Bonding）與電性量測（Electrical Characterization），建立穩定的偏壓條件與電流響應。對於 IQ Mixer 部分，初期先使用市售元件 MLIQ-0218 進行 IQ Calibration 演算法驗證，確認程式化校正方法可靠後，再套用於實驗室現成之 IQ Mixer 晶片，以提高影像抑制比（Image Rejection Ratio, IMRR）及本地振盪隔離度（LO Isolation），確保混頻信號輸出具高準確度與穩定性。

在模擬端，本研究利用 QuTiP（Quantum Toolbox in Python）建立 time-dependent Hamiltonian 模型，將實驗取得之電荷雜訊（charge noise）序列引入系統，以模擬量子位元（quantum qubit）在不同控制脈衝下的實際演化行為，並透過 Bloch sphere 的動態軌跡分析比較各脈衝的穩定性與控制精度。此結果驗證了本研究模型在重現實驗性噪聲效應及量子閘操作動態行為上的準確性，並為後續脈衝優化與抗雜訊設計提供了理論依據。

此外，本研究亦對 Varactor 進行模擬分析。使用 ADS（Advanced Design System）建立電路模型，並透過參數掃描方式改變 Varactor 電容值（分為四個範圍）與負載阻抗，進一步探討其於不同頻率下的阻抗匹配行為。結果顯示，隨著 Varactor 電容調變，系統共振頻率會相應偏移，而匹配程度亦受到電阻值與耦合條件的影響。此模擬流程有效驗證了電容調變對頻率響應之調控能力，並有助於評估 Varactor 作為可調元件應用於 SET（Single Electron Transistor）charge sensor 中的可行性與最佳操作條件。

綜合實驗與模擬結果，本研究為 Cryo-CMOS 系統之量子控制提供完整之室溫前端驗證，並為未來低溫環境下的整合量測奠定基礎。

1. Introduction

隨著量子運算(Quantum Computing)技術快速發展,量子控制電路(Quantum Control Circuits)在準確性與穩定性上的要求日益提高。Cryo-CMOS 技術(Cryogenic CMOS)可在接近液氦溫度操作,同時減少控制線數量,降低熱擾動與電磁干擾,實現高密度整合與量子運算規模化。

低雜訊放大器(LNA)與 IQ 混頻器(IQ Mixer)為控制模組之核心之一,其效能直接影響訊號保真度(Fidelity)與控制精確度。在進入低溫量測前,室溫晶片之電性驗證(Room-Temperature Electrical Characterization)是確保系統可行性的必要步驟。同時,為評估可調元件於量子系統讀取端之可行性,本研究亦進行 Varactor 的電路模擬,利用四組電容範圍與負載阻抗分析其頻率響應與阻抗匹配行為,作為後續應用於 SET charge sensor 的設計基礎。

此外,環境中的電荷雜訊(Charge Noise)會導致量子態去相干(Decoherence)與頻率漂移(Frequency Drift),降低量子控制的穩定性與可重現性。本研究結合實驗與模擬,從硬體電性驗證到軟體控制精度分析,完整探討量子控制在雜訊環境下的行為。

2. Method

2.1 晶片打線 (Wire Bonding Process)

研究首先針對兩種待測晶片之樣品進行打線,分別為低雜訊放大器(Low Noise Amplifier, LNA)與 IQ 混頻器(IQ Mixer)。先將待測晶片以低溫絕緣膠水 GE-Varish 固定於印刷電路板(PCB)上,待膠水硬化後再進行打線(鋁線,線徑為 0.7mil),完成後以光學顯微鏡檢查焊點品質與確認無短路之情形。

2.2 電性分析 (Electrical Characterization)

為確認晶片能在設計條件下正常運作,本研究依照其設計規格進行電性驗證。量測目的並非進行完整的特性掃描,而是檢查晶片於特定偏壓條件下是否能產生預期電流與 RF 輸出。

實驗使用 Qdevil QDAC-II (Ultra-low-noise 24-Channel DAC) 進行直流偏壓供應與電流讀取,並透過任意波形產生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)產生波形再搭配頻譜分析儀(Keysight N9020B, SA)進行高頻訊號測試。量測步

驟如下：

- (1) 依據設計規格，對 LNA 與 IQ Mixer 的輸入端施加指定的偏壓。
- (2) 觀察對應之電流值是否落在設計預期範圍內，確認晶片導通狀態正常。
- (3) 於 RF 測試端輸入射頻信號，量測輸出功率與增益，檢查其是否符合規格。

2.3 IQ 混頻器校正 (IQ Mixer Calibration)

由於實際電路中存在路徑不對稱與元件誤差，I 與 Q 通道的振幅與相位常會處於非理想的正交狀態，導致影像抑制比 (Image Rejection Ratio, IMRR) 下降與 LO 洩漏 (LO Leakage) 增加。

為了改善這些非理想效應，本研究套用了電腦程式控制的自動化 IQ 校正流程，並在初期使用市售元件 Marki Microwave MLIQ-0218L 驗證演算法的可靠性，確認可行性後再正式應用於待測 IQ Mixer 之校正上。校正主要透過控制軟體對 I/Q 通道的振幅比例 (Amplitude Ratio) 與相位偏差 (Phase Offset) 進行調整，並即時量測輸出頻譜以評估改善效果。整個校正過程的目標是提升 IMRR 與降低 LO Leakage，使輸出訊號更接近理想的正交狀態。

校正流程概述如下：

- (1) 基準量測：首先量測未校正狀態下的頻譜，以作為比較基準。
- (2) 相位調整：微調 I 與 Q 的相位差，尋找影像頻率功率最低的組合。
- (3) 振幅調整：接著依序改變 I/Q 通道的輸出比例，使輸出信號達到最佳正交條件。
- (4) 結果驗證：完成校正後重新量測頻譜，並記錄校正前後的 IMRR 與 LO Leakage 變化。

校正成果與頻譜比較將於第三章呈現與討論。

2.4 Hamiltonian 模型

考慮單一 qubit，Hamiltonian 分為 Zeeman drift 項與 drive 項兩部分：

$$H(t) = H_{drift} + H_{drive}$$

其中 drift 項為

$$H_{drift} = \frac{1}{2}(\omega_z + \delta E_z(t))\sigma_z$$

而 drive 項為

$$H_{drive} = \frac{1}{2}\Omega(t)\cos(\omega_d t)\sigma_z$$

因此 Hamiltonian 又寫為

$$H(t) = \frac{1}{2}(\omega_z + \delta E_z(t))\sigma_z + \frac{1}{2}\Omega(t)\cos(\omega_d t)\sigma_z$$

其中， $\delta E_z(t)$ 為 Zeeman detuning charge noise，代表因電荷環境波動造成的能量偏移。

2.5 脈衝輸入

透過 AWG 設計輸入脈衝。本實驗中理想脈衝的輸入設定如下：

(1) Gaussian pulse :

$$\Omega(t) = \Omega_0 e^{-(t-t_0)^2/2\sigma^2}$$

(2) Square pulse :

$$\Omega(t) = \Omega_0, 0 \leq t \leq T$$

(3) Sine pulse :

$$\Omega(t) = \Omega_0 \sin(\pi t/T)$$

2.6 Infidelity, J1 計算

設定初態 $|\psi_0\rangle = |0\rangle$ ，模擬目標為 X- π 旋轉。為評估實際操作與理想量子閘之間的一致性，我們定義保真度 F (fidelity) 與非保真度 J1 為 (infidelity)：

$$F = |\langle \psi_{ideal}(t_f) | \psi_{real}(t_f) \rangle|^2, \quad \text{infidelity } J_1 = 1 - F$$

作為量化量子閘誤差的主要指標，用以評估不同脈衝形狀及雜訊條件下的控制精度。

在實作過程中，我們會掃描（或最佳化）目標 Zeeman detuning，以尋找使 J_1 達到最小值的參數組合。當 J_1 為最小值時，Bloch sphere 上的量子位元會成功從北極精確翻轉至南極，對應於理想的 $X-\pi$ 旋轉操作，亦即在系統中實現 CNOT gate 所需的正確單量子位元子操作。

2.7 Charge Noise 建構與資料來源

研究所採用的電荷噪聲（charge noise）資料來源為論文“*Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon*”中的 Extended Data Fig. 5a。該圖呈現量子位元在實驗過程中所觀測到的頻率漂移行為，反映了由電荷噪聲所造成的頻率波動。為了將此實驗性噪聲準確地引入模擬中，我們依照原論文描述的方法，擷取並整理 qubit 0 的頻率漂移數據，將多次量測結果取平均後形成檔案 freqs_qubit0_avg.csv。此檔案中的時間序列資料即代表隨時間變化的頻率擾動（frequency fluctuation），並在本研究的模擬模型中作為 time-dependent Hamiltonian 內的 Zeeman detuning 項，以模擬真實系統中電荷噪聲對量子位元能階分裂的動態影響。

2.8 FFT 頻譜驗證

為確認 noise 特性，我們對 freqs_qubit0_avg.csv 進行快速傅立葉轉換(FFT)，並繪製單邊振幅譜。結果顯示在低頻區域能量明顯集中，隨頻率上升快速衰減，呈現 $1/f$ 型頻譜行為。該現象與文獻所述 charge noise 特徵一致。

因低頻 charge noise 不易平均，會隨時間累積相位與振幅偏移，最終顯著影響 gate 操作的最終保真度。

2.9 Varactor 模擬

使用 ADS (Advanced Design System) 建立電路模型，並透過參數掃描方式改變 varactor 的電容值(共四個範圍)與負載阻抗，進一步分析其在不同頻率下的阻抗匹配行為。隨著 varactor 電容調變，系統的共振頻率會隨之偏移，且其匹配程度受到電阻值與耦合狀態的影響。此過程能有效驗證電容控制對頻率響應的調節能力，並幫助評估 varactor 作為可調元件在 SET (Single Electron Transistor) charge sensor 應用中的可行性與最佳操作條件。

3. Experimental Results

3.1 LNA 電性分析 (Electrical Characterization of LNA)

為確認低雜訊放大器 (Low Noise Amplifier, LNA) 晶片之導通狀態與偏壓特性，本節首先於室溫下進行直流電性量測。

偏壓設定與量測條件 (Bias Setup and Measurement Condition) :此晶片一共有四個電壓輸入點，分別為 VDD，VDD1，VGS，與 VGS1。在偏壓之設定上，偏壓條件依照設計規格分別固定提供 0.5V 給 VGS，0.6V 給 VGS1，並分別針對 VDD 及 VDD1 從 0V 掃描至 2V，最後再讀取 1V 時兩個 PAD 流過之電流大小。

量測結果如下圖 (Fig.3.1.a) 所示，圖中之曲線為 LNA 晶片在不同偏壓下 VDD 與 VDD1 所對應之電流，分別為 IVDD 與 IVDD1。從結果可觀察出，兩條通路皆有電流通過，且在設計規格所訂定之偏壓下，測得 IVDD 約為 2mA 而 IVDD1 約為 6mA，確實符合此電路在設計階段時所模擬出來之結果。固可得知此 LNA 晶片能正常在室溫下運作。

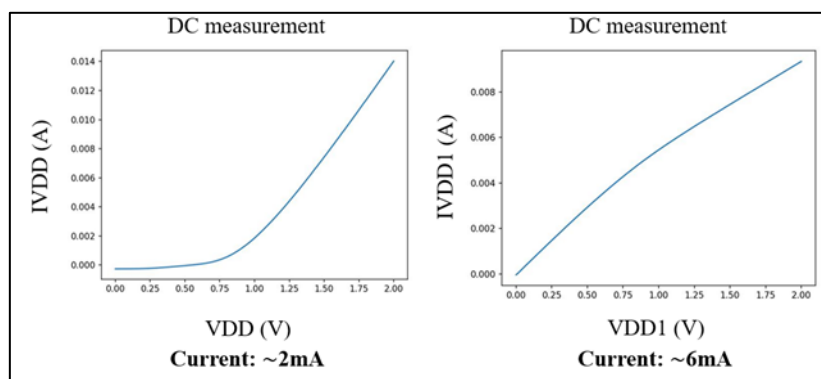


Fig.3.1.a DC measurement result for VDD and VDD1

3.2 LNA 射頻性能量測 (RF Performance of LNA)

確認 LNA 晶片在室溫能正常運作之後，接下來進行 RF 訊號的量測。本節實驗透過任意波形產生器產生 10MHz 之 Sine 波形，初始的輸入訊號其功率約為 10.927mV。經過 LNA 之放大效果後，讀出之輸出波形其輸出功率約為 156mV。

輸入功率	輸出功率	增益
10.927mV	156mV	23.0925dB

從結果得知，此放大器之放大效果約為 23.0925dB，與設計規格之標準及設計模擬結果相符。

3.3 使用市售元件進行校正演算法驗證

3.3.1 實驗架構

本實驗以市售 IQ 混頻器 (Marki Microwave MLIQ-0218L) 作為被測對象，並由電腦透過 Python - VISA 介面控制訊號源與頻譜分析儀。

3.3.2 校正與成果

接續進行自動化的 IQ Calibration 實驗。

此步驟由電腦程式控制訊號源 (同樣為 AWG)，依序調整 I/Q 通道振幅比 (Amplitude Ratio) 與相位差 (Phase Offset)，並透過頻譜分析儀即時量測影像訊號強度。校正目標為同時提升 IMRR 並降低 LO Leakage。

經程式自動化調整與迭代後，可明顯觀察到頻譜中影像頻率 (Image Tone) 功率下降，主信號對稱性改善。

以下是其中一次迭代之結果為例:初始 IQ Mixer 之想要的輸出頻率、image tone 與 LO leakage tone 可從圖中 (Fig.3.3.2.a) 的藍色曲線得知分別為 16.05GHz、15.59GHz 與 16.00GHz；輸出之功率約為-12.36dBm、-41.85dBm 與-33.27dBm，因此其 IMRR 為 24.48dB，LO Isolation 則為 20.90dB。

經過 123 次的迭代嘗試後，可以從圖中之橘色曲線得知校正後之輸出功率變為-12.26dBm、-44.54dBm 與-47.08dBm，明顯可以得出 IMRR 提高為 32.28dB，而 LO Isolation 則提高為 34.82dB。

	Wanted Signal (16.05GHz)	Image Tone (15.95GHz)	LO Leakage Tone (16.00GHz)	IMRR	LOISO
Before Calibration	-12.36 dBm	-41.85 dBm	-33.27 dBm	24.48 dB	20.90 dB
After Calibration	-12.26 dBm	-44.54 dBm	-47.08 dBm	32.28 dB	34.82 dB

可見經校正後，IQ Mixer 的影像抑制能力與本地振盪隔離度均明顯提升，整體訊號品質與對稱性改善顯著。

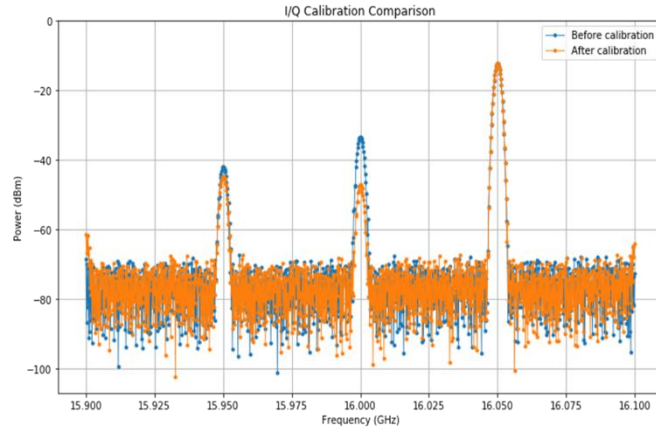


Fig.3.3.2.a IQ Calibration Comparison

3.4 Infidelity 之模擬結果

3.4.1 Zeeman detuning 下的 infidelity 變化

三種脈衝在 Zeeman detuning 的掃描下皆呈現典型的「V 型曲線」，並於 $E_z/2\pi \approx 16.3010 \text{ GHz}$ ，附近達到最低 infidelity。對應 Bloch sphere 上最準確實現 X-gate 的操作條件。

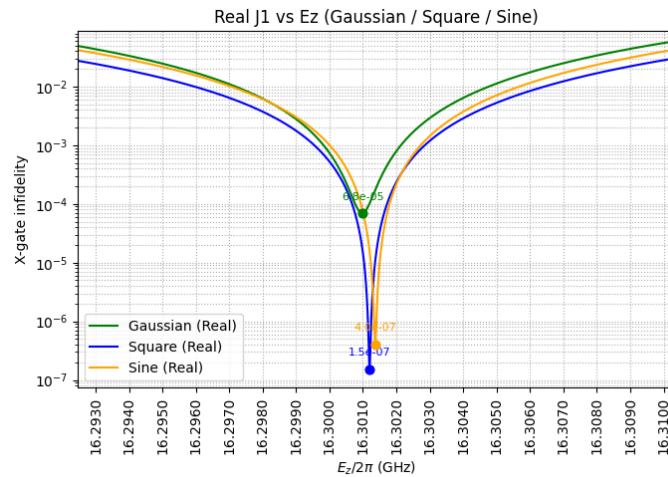


Fig.3.4.1 Zeeman detuning 下的 infidelity 變化

由圖可見：

- (1) Square pulse (藍色) 最低 infidelity 約 1.5×10^{-7}
- (2) Sine pulse (橙色) 最低 infidelity 約 4.0×10^{-7}
- (3) Gaussian pulse (綠色) 最低 infidelity 為 6.8×10^{-5}

此結果代表 Gaussian pulse 在 detuning noise 主導下明顯較不抗噪，而 Square 與 Sine pulse 皆在操作點附近保持接近理想的 gate 操作。

3.4.2 Sine 脈衝：平滑且具良好的抑制能力

Sine pulse 的最低 infidelity 約為 4.0×10^{-7} ，其 Zeeman detuning 曲線呈現極為平滑、對稱的形狀，說明：

- (1) 波形頻譜集中。
- (2) 邊界平順、不含突發高頻成分。
- (3) 能有效抑制低頻 detuning drift 所造成的相位積累誤差。

3.4.3 Square 脈衝：最低 infidelity，但頻譜較具高頻成分

Square pulse 在本次模擬中達到最小 infidelity: 1.5×10^{-7} ，原因在於 detuning 誤差在短時間內難造成明顯累積。然而其缺點也相對明確：Abrupt transition 會產生高頻頻譜、真實硬體的濾波器可能會削弱高頻成分、在含高頻噪聲的環境中，其抗噪表現可能並非最佳。

因此 Square pulse 在理想 detuning noise 環境中最佳，但真實系統可能受到硬體頻寬限制。

3.4.4 Gaussian 脈衝：最平滑但最容易受 detuning noise 影響

Gaussian pulse 的最佳 infidelity 為： 6.8×10^{-5} 。顯著高於 Sine 與 Square，原因如下：

- (1) Gaussian 波形平滑，導致較長有效作用時間
- (2) detuning drift 會在較長操作時間內累積更多 phase error
- (3) 使其對低頻或準靜態的 Ez noise 特別敏感。

因此在 detuning noise 主導的場景中，Gaussian pulse 是三者中最不 robust 的選項。

三種脈衝微調 Ez target 模擬結果對應之 Bloch sphere 如下所示：

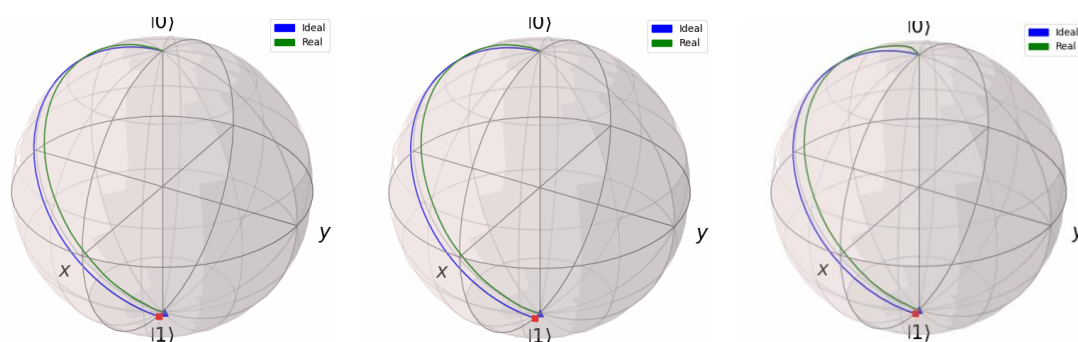


Fig.3.4. 由左至右分別為 Sine Pulse, Square Pulse, Gaussian Pulse

3.5 Varactor 之模擬結果

Varactor 模擬則顯示特定電容範圍內具有較佳的阻抗匹配，適合作為量子系統中 charge sensor 的調諧元件：

在本實驗中，比較了不同電阻($40 \pm 12.5 \text{ k}\Omega$ 、 $100 \pm 12.5 \text{ k}\Omega$ 、 $200 \pm 12.5 \text{ k}\Omega$) 對共振頻率響應的影響，計算的方法是將原本 S11 的單位(dB)轉換成百分比(%)的形式再將兩者相除(-/+)取其比值，觀察圖形變化。結果顯示，當電阻為 $40 \text{ k}\Omega$ 時，由於阻尼過強導致 Q 值過低，共振曲線變得過於平緩，難以清楚觀察電容改變所造成的頻率橫移；而在 $200 \text{ k}\Omega$ 的情況下，阻尼過小使系統處於 under-coupled 狀態，雖然共振頻率仍然隨電容增大而左移，但共振 dip 變淺，解析度不足。相比之下， $100 \text{ k}\Omega$ 時的阻尼與耦合最為適中，接近 critical coupling ($\beta \approx 1$)，共振 dip 清晰明顯，因此能有效觀察到電容增大時共振頻率往低頻方向移動的趨勢。

換句話說， $40 \text{ k}\Omega$ 與 $200 \text{ k}\Omega$ 的情況下，若要清楚觀察共振頻率隨電容的橫移，必須選擇更合適的電容變化範圍；而 $100 \text{ k}\Omega$ 則在現有的四個電容範圍下即可清楚顯現此現象。未來研究可參考 SET charge sensor 的實際電阻值作為模擬依據，以更貼近真實系統行為並驗證此趨勢。

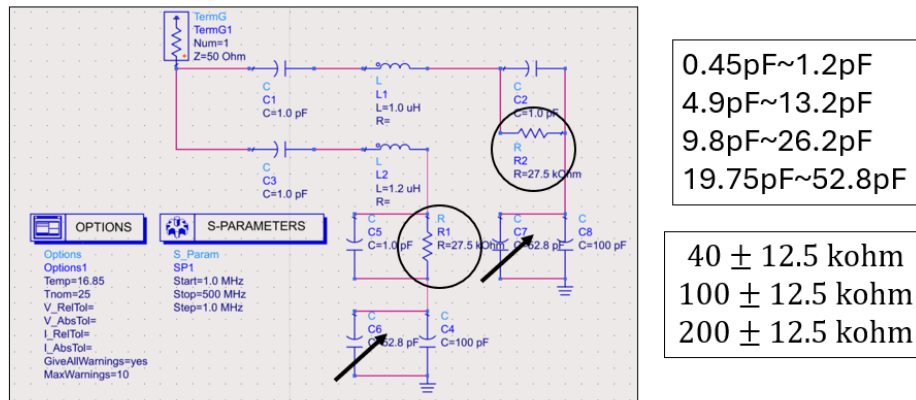


Fig.3.5.a Varactor 模擬之電路圖

4. Conclusion

本研究結合實驗與模擬兩個層面，完成了量子控制系統核心元件在室溫條件下的驗證流程，並為後續低溫量測提供重要的參考依據。

在實驗部分，成功完成低雜訊放大器 (LNA) 與 IQ 混頻器 (IQ Mixer) 的打線與電性量測。LNA 於設計偏壓條件下展現穩定導通行為，其直流電流與放大增益均符合模擬規格；IQ Mixer 經由自動化校正演算法 (IQ Calibration Algorithm) 後，影像抑制比 (IMRR) 由 24.48 dB 提升至 32.28 dB，本地振盪隔離度 (LO Isolation) 亦由 20.9 dB 提升至 34.82 dB，顯示演算法可有效改善實際電路中因路徑不對稱與相位偏差所造成的非理想效應。

在模擬部分，透過 QuTiP 建立 time-dependent Hamiltonian 模型，探討 Gaussian、Square 與 Sine 三種脈衝在含低頻電荷雜訊 ($1/f$ charge noise) 的條件下之量子閘操作保真度。結果顯示，Sine 脈衝對低頻雜訊最具 robustness，在相同噪聲條件下能維持較高的 fidelity 穩定度。此結果指出脈衝形狀與頻譜分布對抗 charge noise 的能力息息相關，提供後續量子控制波形設計的重要依據。

另外，針對量子讀取端可能採用的可調元件，使用 ADS 進行 Varactor 模擬，透過掃描不同電容範圍與負載阻抗，分析其在各頻率下的阻抗匹配與共振頻率偏移行為。結果驗證了 Varactor 於調控頻率響應上的可行性，並可作為 SET (Single Electron Transistor) charge sensor 端最佳化設計的重要參考。

綜合以上成果，本研究完成了 Cryo-CMOS 系統前端電路的室溫驗證與理論分析整合，建立一條從硬體偏壓量測、信號校正到量子保真度模擬的完整流程。此成果可作為未來低溫整合量測與高保真量子閘實現的重要基礎，亦為後續在 Cryogenic 環境下的系統設計與最佳化提供具體方向。

5. Thoughts and Reflections

這次專題讓我們在量子控制模擬與實驗操作兩個層面都獲得了寶貴經驗，並對量測的重要性與量子系統控制的複雜性有了更深刻的理解。在模擬部分，我們使用論文提供的 Zeeman detuning noise 作為唯一噪聲來源，探討了 Gaussian、Square 與 Sine 三種脈衝在 detuning 擾動下的 X-gate infidelity 表現。結果顯示，雖然三種脈衝在最佳 Ez 附近都能達到明顯的 infidelity minimum，但對 detuning noise 的敏感度差異很大：Square pulse 的 minimum 最低，但曲線最尖銳，稍有 detuning 偏移就容易造成性能惡化；Gaussian pulse 則雖然 minimum 較高，但曲線較平緩，對 detuning noise 最不敏感；Sine pulse 則介於兩者之間。這些結果清楚顯示脈衝形狀與頻譜特性對抗噪聲的能力密切相關，也為後續 pulse shaping 與參數最佳化提供了明確方向，使我們理解到在量子控制中，不僅要考慮理論上的最小誤差，還要兼顧操作的穩健性。

在實驗部分，我們對量測及前端作業的重要性有了更深刻的體會。實驗中，即便是一個微小的操作失誤，也可能導致晶片損壞，使整個系統無法正常運作。在量測 LNA 的過程中尤為明顯，例如一條連線若接錯，就必須重做整個連線，不僅會影響結果，還會延誤時間；線材的長短、儀器的設定也會直接影響測量結果，這讓我們意識到每個細節都不可忽視。因此，在實驗前的規劃、操作過程的確認，以及量測後的檢查都非常關鍵，必須謹慎且有條理地進行。這次經驗也讓我深刻體會到耐心與精確的重要性，明白成功的實驗不僅依賴理論知識，更需要實際操作的細心與嚴謹。尤其是在低溫環境下，系統的穩定性更容易受到微小誤差影響，因此每個步驟的確認都非常重要。

綜合模擬與實驗兩部分的經驗，我們不僅增強了對量子控制操作的理解，也提升了實驗技能、細節把握與計畫性。在模擬中，學會如何評估不同脈衝對噪聲的影響，並理解到設計脈衝不僅要追求最小誤差，更要兼顧實驗可行性與穩定性；在實驗中，則學會了如何規劃每個步驟、仔細確認每個操作，並體會到對細節的嚴謹態度對實驗成功的重要性。這些經驗讓我們更加明白，量子系統的研究是一個理論與實務密切結合的過程，無論是在模擬分析還是實際操作中，耐心、精確與細心都是不可或缺的素質。整體而言，這次專題不僅強化了我們在量測與控制方面的專業能力，也提升了對責任感、計畫性以及操作細節的重視，對我們未來在量子或相關研究中都具有很大的幫助與啟發。

6. Reference

- [1] J. P. G. van Dijk, E. Kawakami, R. N. Schouten, M. Veldhorst, L. M. K. Vandersypen, M. Babaie, E. Charbon, and F. Sebastiano, “Impact of Classical Control Electronics on Qubit Fidelity,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 12, no. 4, Art. no. 044054, 2019.
- [2] J. Herrmann, C. Hellings, S. Lazar, F. Pfäffli, F. Haupt, T. Thiele, D. C. Zanuz, G. J. Norris, F. Heer, C. Eichler, and A. Wallraff, “Frequency Up-Conversion Schemes for Controlling Superconducting Qubits,” arXiv preprint arXiv: 2210.02513, 2022.
- [3] A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, “Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon,” *Nature*, vol. 601, no. 7893, pp. 338 – 342, 2022.
- [4] Rafael S. Egli, Simon Svab, Taras Patlatiuk, Dominique A. Trüssel, Miguel J. Carballido, Pierre Chevalier Kwon, Simon Geyer, Ang Li, Erik P. A. M. Bakkers, Andreas V. Kuhlmann, and Dominik M. Zumbühl, “Cryogenic hyperabrupt strontium titanate varactors for sensitive reflectometry of quantum dots”, arXiv preprint arXiv: 2303.02933, 2023.
- [5] N. Ares, F.J. Schupp, A. Mavalankar, G. Rogers, J. Griffiths, G.A.C. Jones, I. Farrer, D.A. Ritchie, C.G. Smith, A. Cottet, G.A.D. Briggs, and E.A. Laird, “Sensitive radio-frequency measurements of a quantum dot by tuning to perfect impedance matching”, arXiv preprint arXiv:1510.06944, 2015.