

Design of 16.5GHz Low-Power Up-Conversion Ring Mixer with 0.18 um CMOS Technology Using for Quantum computers

適用於 0.18 um CMOS 技術，應用
在量子電腦的 16.5GHz 低功耗上變
頻環形混頻器

專題領域：電子領域

組 別：B434

指導教授：徐碩鴻

組員姓名：謝廷冠、吳柏諺

研究期間：2024 年 2 月 1 日至 2024 年 12 月 1 日止，共 10 個月

摘要

本報告介紹了用於量子計算應用的使用 $0.18\mu\text{m}$ CMOS 技術的 16.5 GHz 低功耗上變頻環形混頻器的設計。該混頻器由主動 balun 和 Marchand balun 組成，以實現差分訊號轉換並能夠最大程度地降低功耗。經過 ADS 模擬後，結果顯示在 16.5GHz 和 8.7GHz 頻寬下的轉換增益為 -16dB，功耗低至 2.448mW。此混頻器設計還具有很強的隔離性 ($> 70\text{dB}$) 和低雜訊，使其適用於低溫環境。這些特性凸顯了其在高效能量子運算系統設計的潛力。

1. 研究背景與目的：

隨著 5G 技術的發展，通訊系統對於兼具高速資料傳輸與低功耗的需求日益加劇，進一步要求訊號傳輸的精確度。在這樣的架構下，混頻器 (mixer) 透過平衡器 (Balun) 將 LO 訊號轉換為差動訊號，讓 IF 訊號升頻為 RF 訊號輸出；同時，RF 端則將差動訊號轉換為單端訊號，以供應給後端的功率放大器。

本專題針對混頻器中的 balun 設計與分析，balun 在單端與差動訊號之間的轉換中扮演著轉換的角色。本研究的平衡器需要支援 Ku 頻段 (LO: 15.5GHz 至 17.5GHz; RF: 16GHz 至 18GHz) 操作，並具備阻抗匹配功能，將混頻器的 LO 端與 RF 端轉換至 50 歐姆系統，並且要讓功率損失越小越好。此外，平衡器需具備高增益平衡與相位平衡的特性，來減少混頻器中的訊號洩漏 (如: LO-RF Leakage、LO Rejection Ratio)。

為了實現上述目標，本研究結合 ADS 模擬，並透過 SONNET 進行電磁模擬，以優化 balun 設計參數。在多層金屬架構中，設計符合最佳化結果的平衡器，並結合 TSMC 的實際元件模型 (例如: MIM 電容、抽頭電感)，最終提供一個整合混頻器的最佳設計方案。此研究的目的是在於為高性能射頻系統，特別是 5G 與量子計算應用，提供高效且精確的混頻器設計基礎。

2. 研究方法：

2-1. Design Flow:

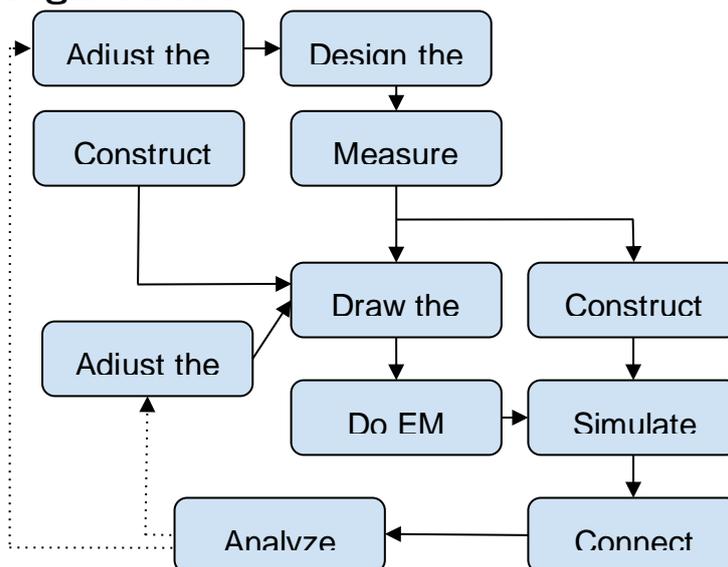


Figure2-1. Design flow of the whole mixer system

2-2. Balun Design

I. Active Balun Design (IF port)

為了適配混頻器的單端輸入，需要使用平衡器（Balun）將其轉換為差分信號。儘管會增加功耗，為了縮小電路面積並提升匹配效果，選擇以主動元件取代被動元件。M5 和 M6 負責差分輸出，M7 負責尾電流控制，確保三顆電晶體皆處於操作飽和區。輸入信號送入差分對中的一個電晶體，理想情況下信號將均勻分配，且具有 180° 的相位差。

避免輸入信號失真，需考慮反射係數，通過添加電阻來改善輸入匹配。測量 S 參數時，輸入阻抗設定為 50 歐姆，輸出阻抗設為與混頻器輸入阻抗相同。S 參數分析顯示，在 500MHz 的中頻端口，S21 為 -2.93dB，功率增益為 0.07dB，功耗為 2.448mW。相位不平衡和增益不平衡分別為 178.46° 和 0.388dB，鏡像抑制比（Image Rejection Ratio）為 31.7dB。

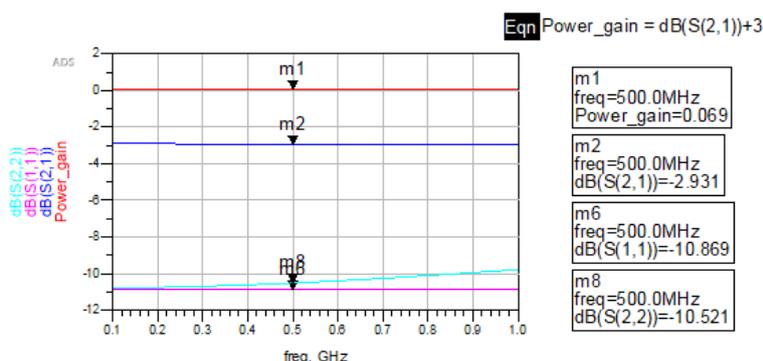


Figure 2-2. Schematic of the active balun in ADS

II. Marchand Balun Design (LO port/RF port)

Marchand Balun 是一種由兩組耦合線構成的裝置，這些耦合線由兩條金屬傳輸線組成。每條線在中心頻率下的長度為四分之一波長 ($\lambda/4$)，並且相互靠近以實現耦合。這種設計利用平面結構來實現緊湊且高效的實現方式。

耦合器設計特徵為：傳輸線的線寬為 $4 \mu\text{m}$ ，兩條傳輸線之間間距為 $2 \mu\text{m}$ ，整體面積為 $0.14 \mu\text{m} \times 0.256 \mu\text{m}$ 。這種配置在保持緊湊布局的同時，確保了寬頻應用的最佳性能。

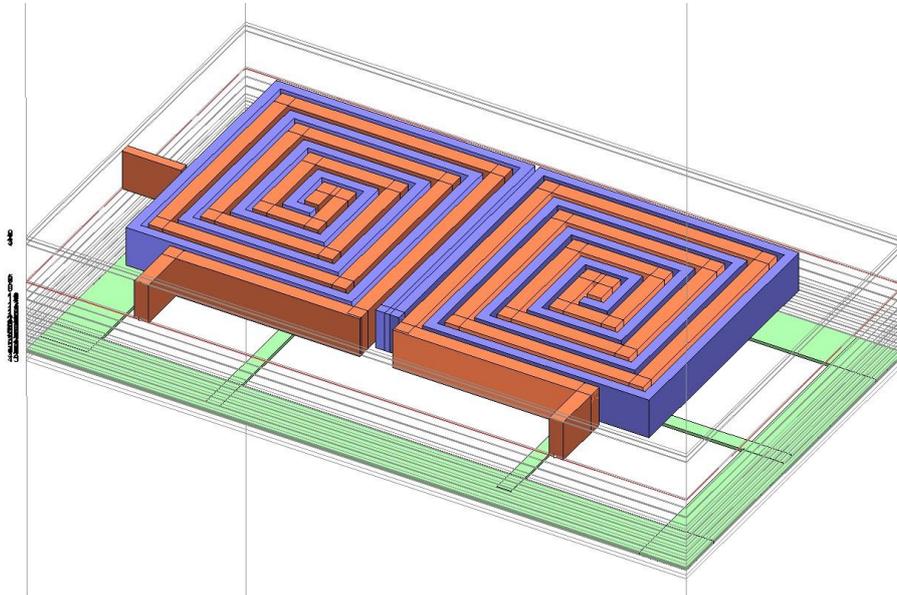


Figure 2-3. Schematic of the Marchand balun in ADS

我們進行了全面的 S 參數分析，將輸入和輸出阻抗均設定為 50 歐姆。然而，實際的輸出阻抗是在混頻器處觀察到的。

量測結果顯示，在 LO 端工作頻率為 16 GHz 時，測得 S11 為 -16.2 dB，S22 為 -5.5 dB，S21 為 -4.5 dB。對於工作頻率為 16.5 GHz 的 RF 端，結果類似。

相位不平衡和增益不平衡分別為 179° 和 0.09 dB。此外，測得的鏡像抑制比為 39.9 dB，這突顯了系統在抑制不需要的信號成分方面的有效性。

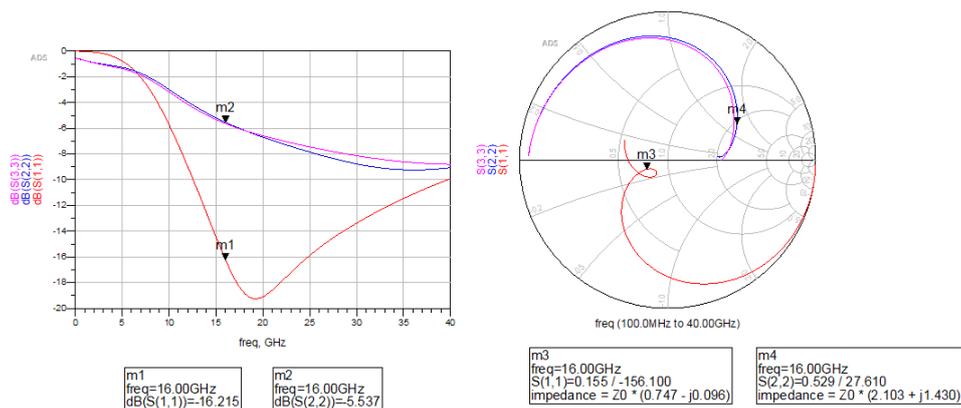
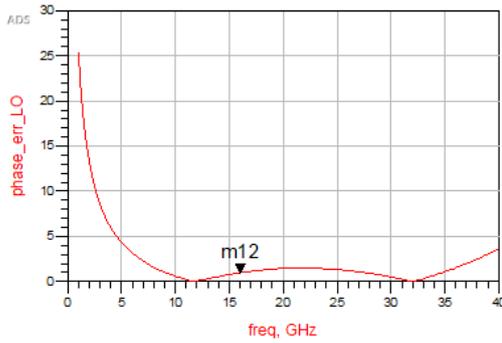


Figure 2-4. Measured S-parameters(S11 S22 S33) and Smith chart of the

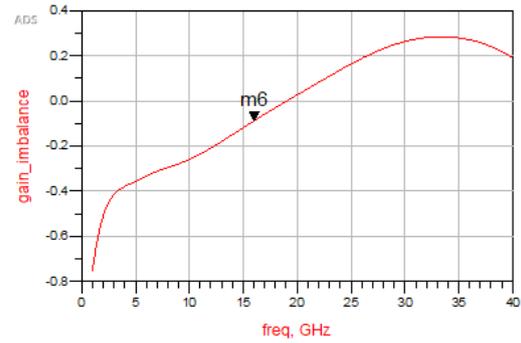
Marchand balun

$$\text{Eqn } \text{phase_err_LO} = \text{abs}(180 - \text{abs}(\text{phase}(S(2,1)) - \text{phase}(S(3,1))))$$

$$\text{Eqn } \text{gain_imbalance} = \text{dB}(S(2,1)) - \text{dB}(S(3,1))$$



m12
freq=16.00GHz
phase_err_LO=0.990



m6
freq=16.00GHz
gain_imbalance=-0.087

Figure 2-5. Measured phase and gain imbalance of the Marchand balun

2-3. mixer design

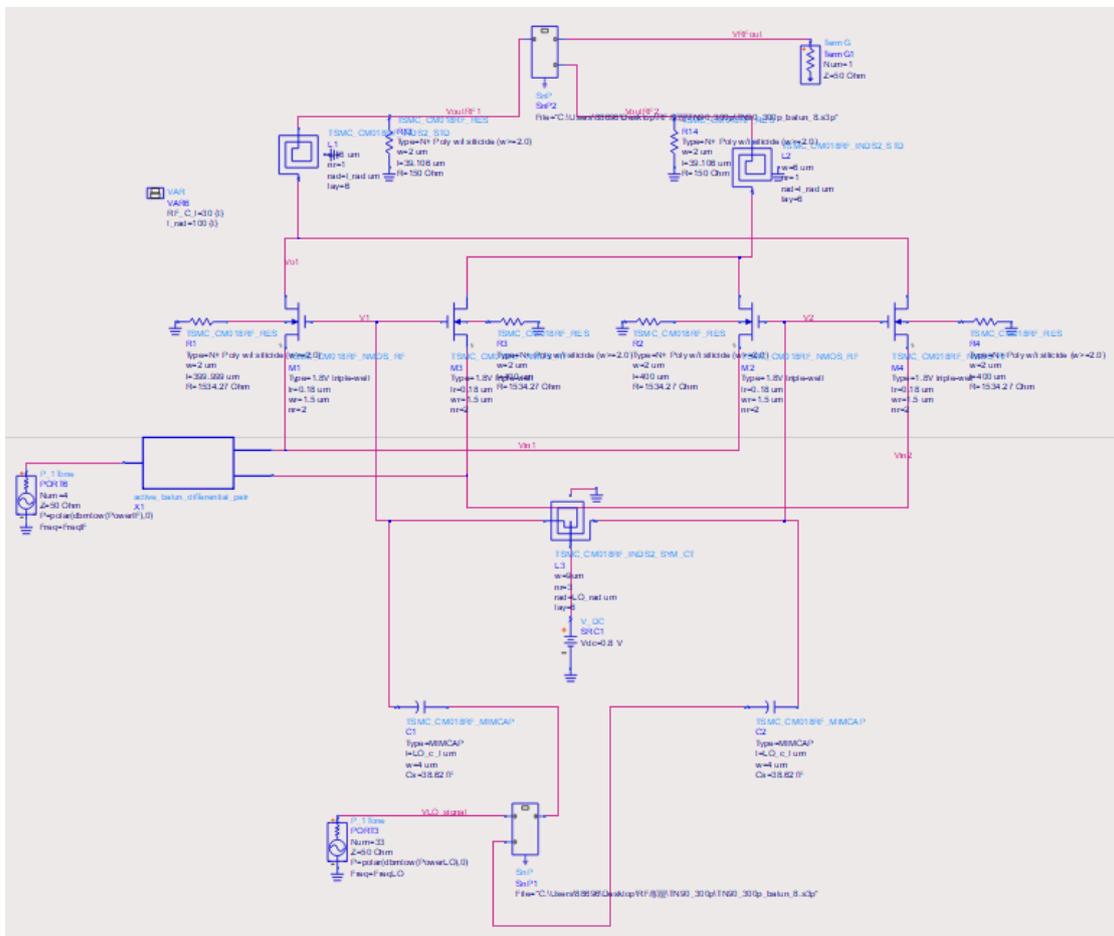


Figure 2-6. Schematic of the whole mixer in ADS

Figure 2-6 展示升頻環形混頻器的完整電路圖。為了確保良好的隔離性並最小化 LO 的洩漏，採用了雙平衡結構。混頻器由環形 LO 核心、LO 平衡器以及 IF 主動平衡器組成。LO 核心由四個電晶體 (M1-M4) 構成，這些電晶體偏壓於弱反轉

區域，作為開關，將 IF 信號導向 RF 端。

LO Marchand Balun 用於生成雙平衡混頻器運行所需的差分 LO 驅動信號。而 RF Marchand Balun 則用於將差分 RF 輸出轉換為單端 RF 輸出，並將信號傳遞到下一級電路。整個混頻器電路通過 Keysight Advanced Design System (ADS) 進行了評估，且整個電路採用了 $0.18\ \mu\text{m}$ 製程技術。

該電路的設計考量如下：為了在主動平衡器中實現更高的增益，混頻器中 NMOS_RF 元件的 finger 數量設為 2，這雖然增加了負載，但僅在可接受範圍內略微降低了混頻器的內在增益。針對 LO 端匹配，採用了 MIM 電容以及對稱的中心抽頭電感，偏壓設定為 0.8V 。針對 RF 端匹配，則使用電感和電阻來將輸出負載匹配至 $50\ \Omega$ 。

3. 研究結果：

Figure 3-1 顯示了 IF 功率為 -20dBm 時的轉換增益結果。當 LO 功率為 5dBm 時，轉換增益為 -16dB 。此外，升頻混頻器在 $5\ \text{dBm}$ LO 驅動下在約 8.7GHz 處表現出 -3dB 頻寬。在 16.5GHz 、 5dBm LO 驅動下測得的輸出的 OP1dB 為 $-28\ \text{dBm}$ ，如 Figure 3-3 所示，其中該混頻器的 OIP3 為 -28dBm 。

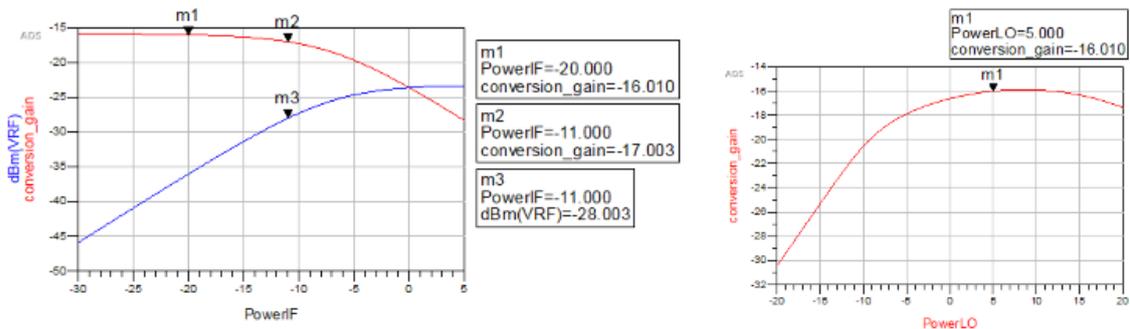


Figure 3-1. Simulated conversion gain versus IF and LO power at 16.5GHz

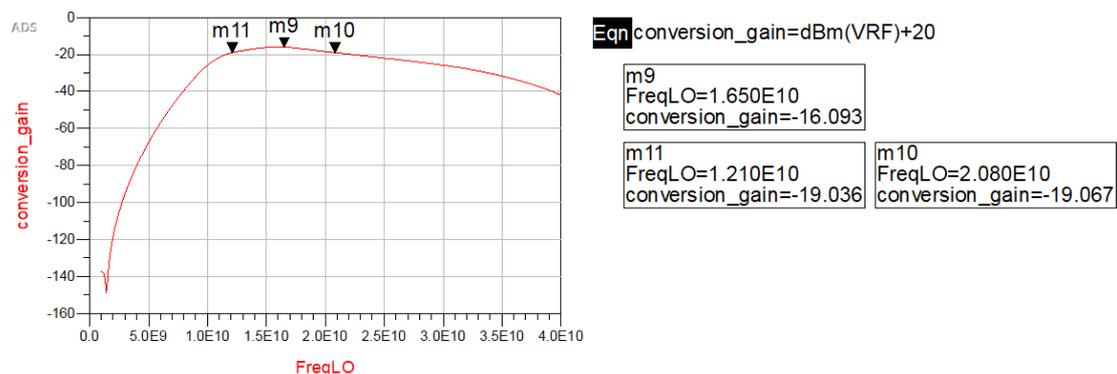


Figure 3-2. Simulated bandwidth versus LO/RF frequency

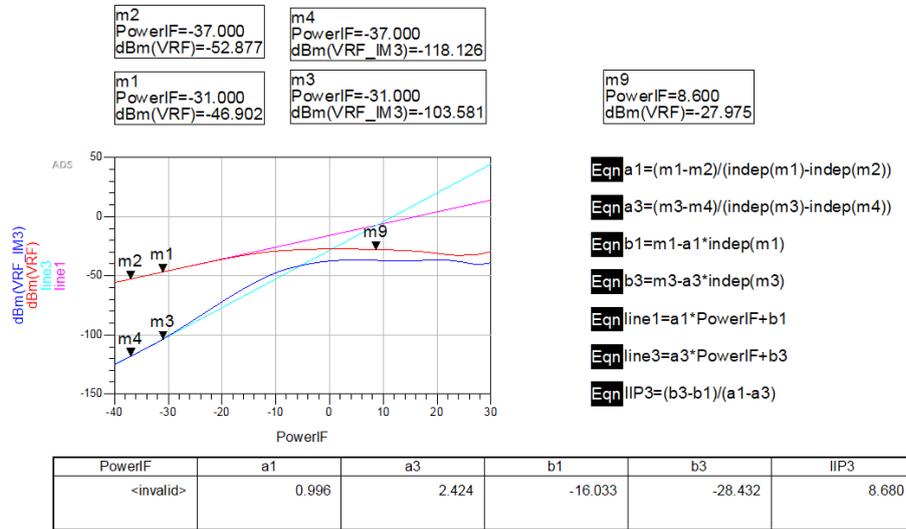


Figure 3-3. Simulated third-order intercept point at 16.5GHz by two tone test

隔離度是另一個關鍵參數，特別是 LO 到 RF 的隔離度。可以透過以下公式計算隔離度和 LO 抑制比：

$$Isolation = 5 \text{ dBm} - (-67 \text{ dBm}) = 72 \text{ dB}$$

$$LORR = (-33 \text{ dBm}) - (-67 \text{ dBm}) = 34 \text{ dB}$$

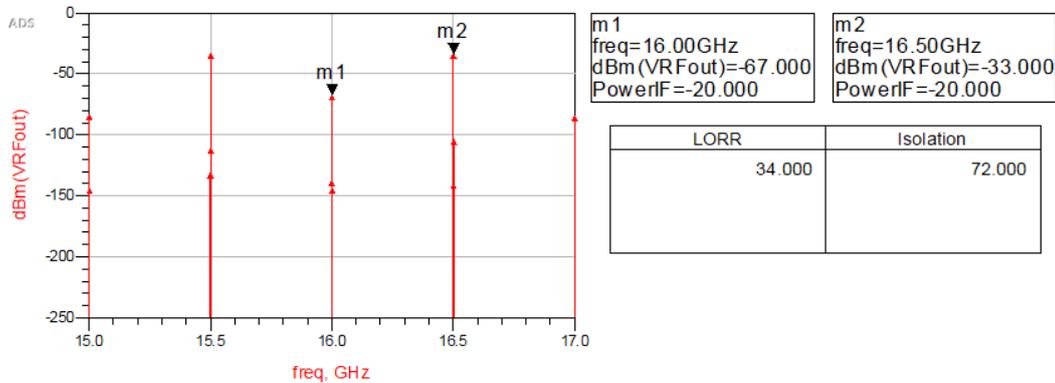


Figure 3-4. Measured differential output signal in frequency domain

混頻器在兩個頻率之間運作，因此我們不使用 S 參數，而是使用回波損耗來評估其反射係數。我們使用四埠耦合器進行模擬，模擬出 LO、IF 和 RF 端的回波損耗值，分別為 -25.6 dB、-10.9 dB 和 -14.1 dB，三端皆達成良好的阻抗匹配。

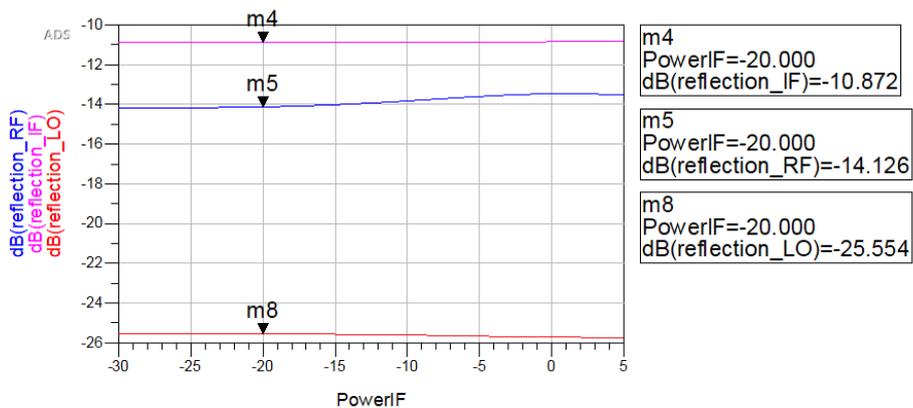


Figure 3-5. Measured return loss at LO port, IF port, and RF port

LO power	5dBm	IF power	-20dBm
LO frequency	16GHz	IF frequency	0.5GHz
RF Bandwidth	8.7GHz		
Peak conversion gain	-16dB	DC power	2.448mW
OP1dB@16.5GHz	-28dBm	IP1dB@16.5GHz	-11dBm
OOP3dB@16.5GHz	-28dBm	IIP3dB@16.5GHz	8.68dBm
LO isolation	>70dB	LORR	>30dB
FOM	-28.3dB		

表 3.

4. 總結：

本專題參考論文[1][2]作為主動和被動巴倫的設計理論基礎。此外，本專題也參考至論文[3][4]提供的環形混頻器架構，分別在三個接口(IF、LO、RF)接上巴倫，設計差分混頻器達成LO訊號在出口端去除。

以上結果表明混頻器具有良好的頻率響應、隔離性能和較低的功耗，適合應用於高性能的射頻電路設計

Reference :

- [1] ISSN: 2321 - 2462, Volume 07 - Issue 01, February 2019, Design and Simulation Study of Active Balun Circuits for WiMAX Applications
- [2] IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 54, NO.12, DECEMBER 2006 Monolithic Broadband Gilbert Micromixer with an Integrated Marchand Balun Using Standard Silicon IC Process
- [3] A Ka-band High Linearity Up-Conversion Mixer with LO Boosting Linearization Technique, 2018 48th European Microwave Conference (EuMC)
- [4] Design of 15-34 GHz Low-Power Up-Conversion Ring Mixer Using 0.18 μm CMOS Technology, 2016 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)

6. 心得：

非常感謝徐碩鴻教授與學長提供的研究機會，以及他們在專題過程中的指導。從基礎學習到實作，讓我們對微波電路設計有了全方位的了解與實踐經驗。

由於專題一時大學部尚未開設射頻相關課程，我們透過觀看教授過往授課影片和線上資源，自主學習微波電路設計的基本理論與實作技術。同時，寒假期間，教授特別安排了一位具豐富實作經驗的碩士班學長指導我們，幫助我們建立初步的實務操作能力。在此期間，我們熟悉了 ADS 軟體，並藉由完成指定作業掌握了其模擬與分析功能。學長不僅熱心解答我們在群組中提出的問題，也分享了許多關於電路實作的寶貴經驗。

進入暑假，我們展開了密集的技术訓練，參考交大蔡作敏老師的教學內容，完成了主動式混頻器的實作。在此過程中，我們學習了阻抗匹配與轉換增益的測量方法，逐步提升了實作能力。此外，學長進一步指導我們模仿論文中的設計，完成了一些進階電路的實作，藉此累積經驗並加深對各項設計規格的理解决。暑假結束後，我們正式投入專題的電路設計，學長耐心指出我們的設計錯誤，並提供改進建議，幫助我們穩步前進。

在專題二階段，我們進行了多種混頻器架構的模擬研究，專注於 ADS 的應用以及電路系統設計的實作。同時，我們開始使用 Sonnet 軟體進行電磁模擬，學長詳細講解了正確的設計流程，特別是在設計 Marchand balun 的過程中，我們共同討論並完成了最適合的 layout。

整個專題研究過程不僅深化了我們對射頻電路的理論認知與實作技能，也培養了我們團隊合作與問題解決的能力。在此，我們要特別感謝指導教授徐碩鴻教授提供的學習機會與指導，以及學長們在實作與研究上的協助。他們的專業與耐心，讓我們能在專題中穩健前行，並取得豐碩的成果。