

國立高雄科技大學
電腦與通訊工程系

無線通訊元件設計實習



NKUST
國立高雄科技大學

專案名稱：

射頻發射模組QPSK調變與線性度模擬

學 號：C111110123

姓 名：趙柏堯

指導老師：彭康峻 教授

實驗日期：114/11/6

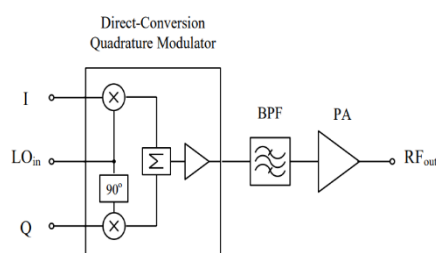
一、專案簡介

本專案以「射頻發射模組 QPSK 調變與線性度模擬」為主題，利用 Keysight ADS 建立即可作為第五代行動通訊(5G) 射頻前端雛形的直接升頻發射機模型。系統包含90°相移器、I/Q 混波器、功率合成器、功率放大器以及本地振盪升頻架構，並在基頻端加入Raised Cosine濾波器與任意序列產生的I/Q資料流，完成一個可調式的QPSK發射鏈路。透過包絡模擬(Envelope Simulation) 觀察時域波形、星座圖與輸出頻譜，進一步分析功率放大器線性度對調變品質與頻譜特性的影響。

二、專案動機

隨著第五代行動通訊(5G)與寬頻行動通訊系統的普及，基地台與終端的射頻發射機必須在大頻寬條件下，同時兼顧高輸出功率、高效率與高線性度。然而，高 PAPR 的調變訊號（如 QPSK、QAM 等）一旦通過為提高效率而操作在接近非線性區的功率放大器(PA)，往往會產生明顯的頻譜擴展與調變失真，對系統的 EVM、ACPR 以及頻譜合規性造成影響。課堂上雖然介紹過 PAPR、EVM、ACPR 等相關指標與理論方塊圖，較難真正建立對 PA 非線性行為及其對頻譜與調變品質實際影響的直觀認識。因此，本專案選擇以射頻發射模組 QPSK 調變與線性度模擬為主題，利用業界常用之 Keysight ADS 自行從系統層級搭建完整的直接升頻發射機模型，並在其中調整功率放大器的輸出飽和功率與增益壓縮點等線性度參數，實際觀察頻譜增長、星座圖劣化以及 EVM、ACPR 等指標的變化。透過這樣由理論走向系統模擬與結果分析的過程，加深我對射頻發射機設計中「效率與線性度取捨」的理解。

三、專案設計流程



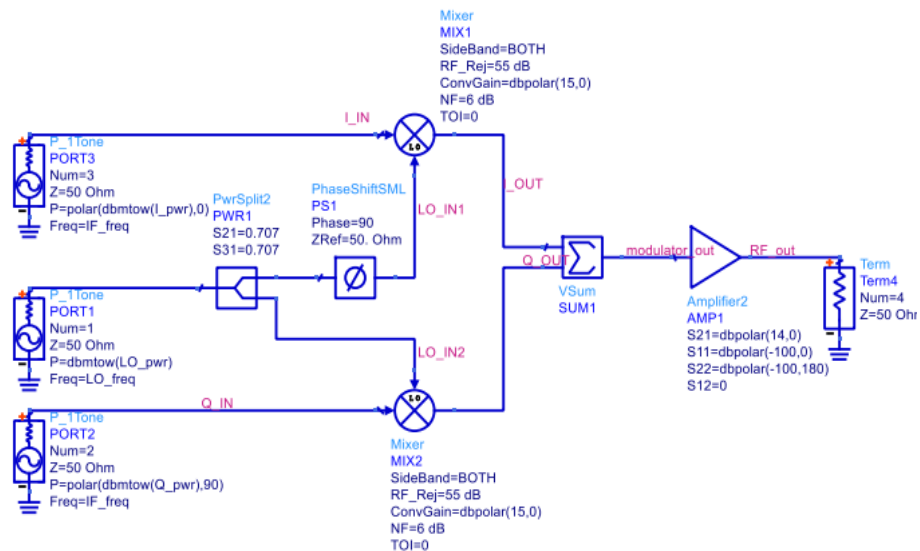
圖一：5G直接升頻發射機方塊圖

Parameter	Specification	Unit
LO Input		
Frequency	3.5	GHz
Power Level	-5	dBm
Input VSWR	< 1.5	
Baseband Input		
Frequency	10	MHz
Voltage Level	0.4	V _{p-p}
Input Impedance	10	KΩ
RF Output		
Frequency	3.51	GHz
Output power	> 23	dBm
Image Rejection	> 50	dB
Carrier Leakage	< -30	dBc
Output VSWR	< 1.5	
Power Consumption	1.8	W

圖二：5G直接升頻發射機設計規格

Stage	Direct-Conversion Quadrature Modulator	BPF	PA
Power Gain (dB)	28	-4	28
Cascaded Power Gain (dB)	28	24	52

圖三：5G直接升頻發射機各級與串級元件功率增益規劃

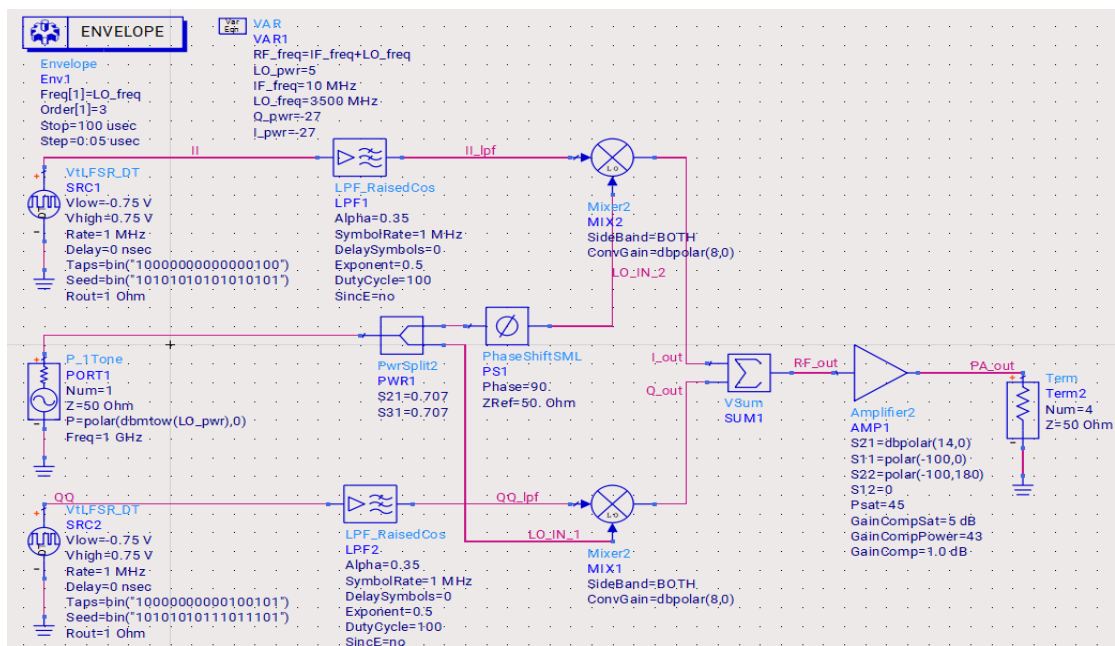


圖四:5G直接升頻發射機電路架構圖

利用所模擬之第五代行動通訊系統(5G)技術之直接升頻發射機電路架構圖為基底，進一步模擬直接升頻QPSK正交調制器，圖一為應用於 5G技術之直接升頻發射機設計方塊圖，包括直接升頻正交調制器、帶通濾波器與功率放大器。5G直接升頻發射機之設計規格如圖二所示。其中，IQ 輸入訊號之 0.4 V 峰對峰值電壓在輸入阻抗等於 1 k Ω 時的功率值約為-27 dBm。5G直接升頻發射機規劃其功率增益為 52 dB，使輸出功率達到 25 dBm 以符合圖一對發射機輸出功率大於 23 dBm 的要求。圖三整理5G直接升頻發射機各級與串級元件之功率增益，圖四為5G直接升頻發射機電路架構圖。

1. 建立直接升頻架構雛形

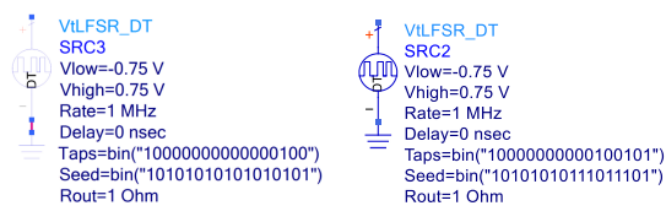
- 在 Keysight ADS 模擬中先用一對 I/Q 正弦訊號源、功率分配器、90°相移器、兩個混波器(MIX1/MIX2)、功率合成器及功率放大器搭成基本的「直接升頻正交調變器」。



圖五：直接升頻QPSK正交調制器電路模擬圖

2. 加入QPSK基頻訊號產生與成形

- 以兩個VtLFSR_DT元件分別產生 I、Q 路的隨機 0/1 位元序列，輸出振幅在 -0.75 V 與 $+0.75\text{ V}$ 之間。



- 每一路經由 LPF_RaisedCos 低通濾波器進行成形($SR=1\text{ MHz}$)，得到平滑的基頻 $I(t)$ 、 $Q(t)$ 波形，降低旁瓣與帶外輻射。

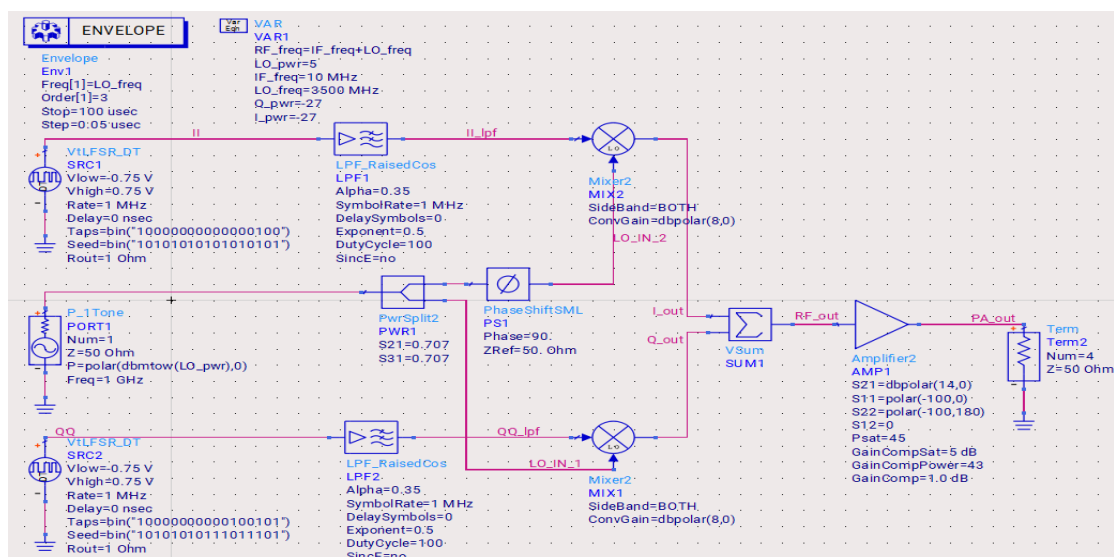
3. I/Q 正交混頻與功率合成

- LO 先經功率分配器分成兩路，再由 90° 相移器產生互差 90° 的 LO_IN1 與 LO_IN2。
- I 路基頻與 LO_IN1 進入上方混波器(MIX1)產生 RF I 分量；Q 路基頻與 LO_IN2 進入下方混波器(MIX2)產生 RF Q 分量。
- 兩路 RF 分量在功率結合器中向量相加，形成完整的 QPSK RF 訊號 RF_out。

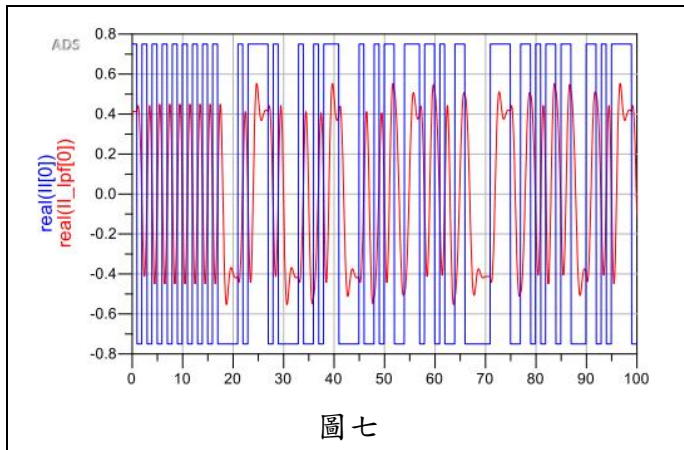
4. 功率放大與頻譜/星座分析

- RF_out 再送入 Amp 元件，設定不同的 Psat、GainCompPower、GainComp 等參數，模擬不同線性度的功率放大器。
- 透過 Envelope Simulation 觀察：
 - 時域波形與 PAPR
 - 頻譜與 ACPR (放大前後比較)
 - 星座圖與 EVM 變化
- 由此評估 PA 線性度對 QPSK 調變品質與頻譜增長的影響。

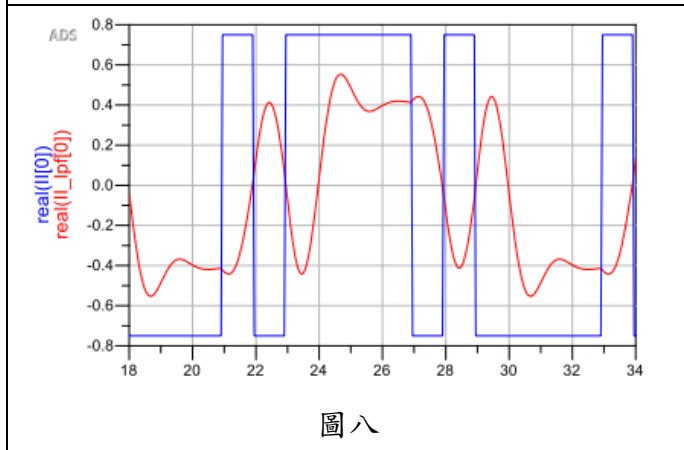
四、專案成果



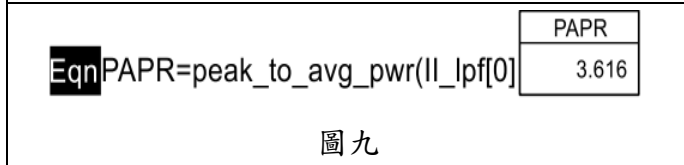
圖六：直接升頻QPSK正交調制器電路模擬圖



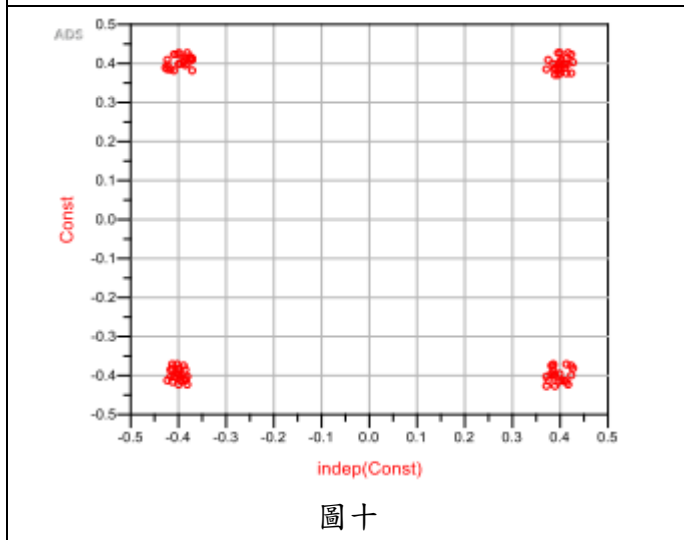
圖七:藍色波形為原始數位訊號，紅色波形為經過Raise Cosine濾波器過濾過後之訊號。



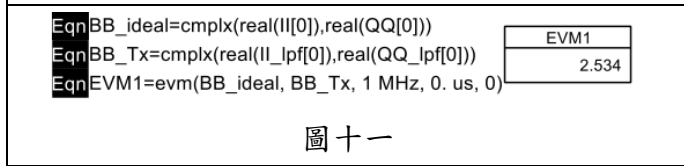
圖八為圖七 Zoom in 的波形，可觀察出過濾後之訊號較為平滑，但是相較於原始訊號會有一個由於濾波所造成之時間延遲(群延遲效應)。



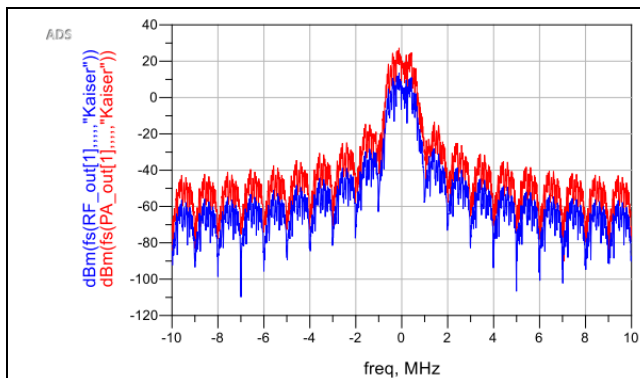
計算濾波器輸出訊號之峰均功比，(Peak-to-Average Power Ratio)。圖九:模擬訊號之PAPR為3.616。



圖十:模擬訊號之QPSK星座圖。由星座圖可觀察到四個星座點集中分佈於四個象限角落，點群緊密且對稱，顯示I/Q正交關係正確，系統雜訊與非線性失真皆不明顯，調變品質良好。



圖十一:計算QPSK訊號在星座圖當中的EVM，模擬訊號之EVM為2.534。



圖十二

圖十二:輸出頻譜。頻譜顯示經過放大器過後訊號並無明顯之頻譜增長，意味著放大器並未造成發射訊號嚴重失真。由頻譜圖可見主通道頻帶能量集中，鄰頻帶僅有少量頻譜延伸；ACPR 數值顯示鄰頻功率相對主通道已明顯被抑制，代表在目前操作功率下，功率放大器仍維持良好的線性度，未產生嚴重的頻譜再生。

```
Eqn mainCH={-1MHz,1MHz}
Eqn UpCh={1MHz,3MHz}
Eqn LoCh={-3MHz,-1MHz}
Eqn ACPR_RF=acpr_vr(RF_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
Eqn ACPR_PA=acpr_vr(PA_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
```

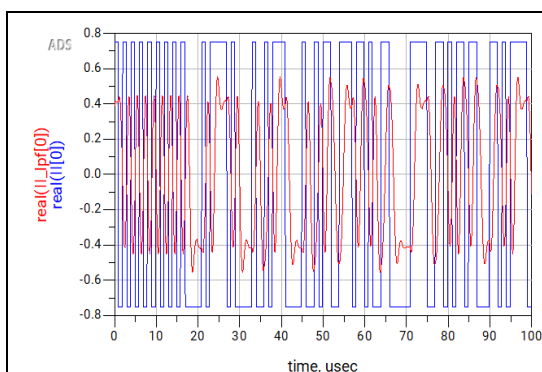
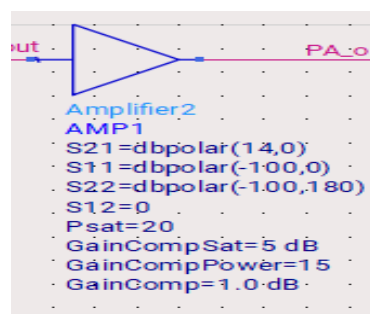
ACPR_RF		ACPR_PA	
ACPR_RF(1)	ACPR_RF(2)	ACPR_PA(1)	ACPR_PA(2)
-42.397	-43.187	-42.598	-43.094

圖十三

圖十三:計算發射訊號經過放大器前以及經過放大器後之 ACPR。模擬顯示出訊號尚未放大前的 ACPR 約 -42~43dB，經過放大器後的 ACPR 約 -42~43dB，意味著放大器並未造成發射訊號嚴重失真。

1. 改變功率放大器的參數，觀察功率放大器線性度對於訊號調變品質之影響為何？

變更功率放大器Psat為20，GainCompPower為15，重新進行模擬。觀察功率放大器輸入訊號以及輸出訊號之頻譜變化、ACPR、星座圖以及EVM，調整功率放大器之飽和功率或增益壓縮點，觀察輸出訊號之頻譜增長情形。

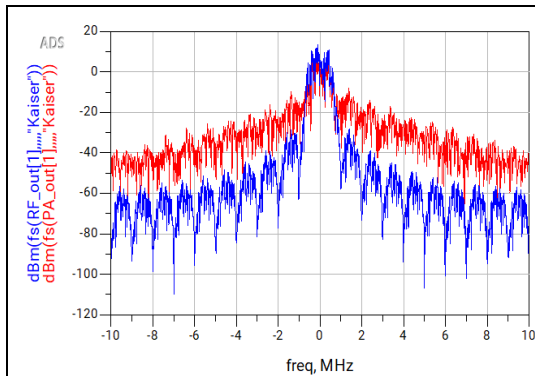


圖十四 藍色為原始訊號，紅色為經過濾波器過濾之後的訊號。

```
Eqn PAPR=peak_to_avg_pwr(I1_lp1f[0])
```

PAPR
3.616

圖十五 計算濾波器輸出訊號之峰均功率比。

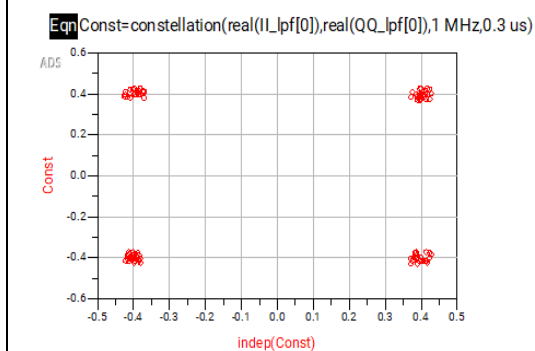


圖十六 直接升頻QPSK正交調制器之輸出頻譜。

```
Eqn mainCH={-1MHz,1MHz}
Eqn UpCh={1MHz,3MHz}
Eqn LoCh={-3MHz,-1MHz}
Eqn ACPR_RF=acpr_vr(RF_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
Eqn ACPR_PA=acpr_vr(PA_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
```

ACPR_RF		ACPR_PA	
ACPR_RF(1)	ACPR_RF(2)	ACPR_PA(1)	ACPR_PA(2)
-42.397	-43.187	-18.770	-16.757

圖十七 經過功率放大器之前與之後ACPR。



圖十八 模擬訊號之QPSK星座圖。

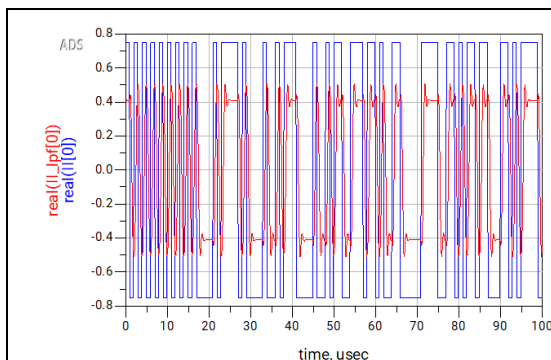
```
Eqn BB_ideal=cmplx(real(I_lpf[0]),real(QQ_lpf[0]))
Eqn BB_Tx=cmplx(real(I_lpf[0]),real(QQ_lpf[0]))
Eqn EVM1=evm(BB_ideal, BB_Tx, 1 MHz, 0. us, 0)
```

EVM1
2.534

圖十九 QPSK訊號在星座圖當中的EVM。

答：當改變功率放大器的Psat與GainCompPower後，可以觀察到放大器較容易進入非線性區，使調變後的QPSK訊號產生明顯失真。頻譜旁帶也增加，使ACPR變差。功率放大器線性度降低時，會使調變品質惡化，包含星座圖變形、誤差變大及鄰頻干擾增加，顯示線性度對QPSK發射品質具有關鍵影響。

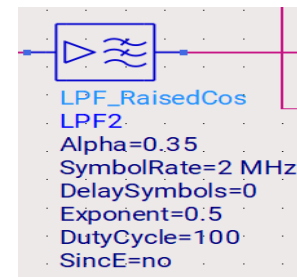
2. 改變Symbol rate為2MHz，觀察訊號頻譜、ACPR以及功率放大器線性度對於訊號調變品質之影響為何？



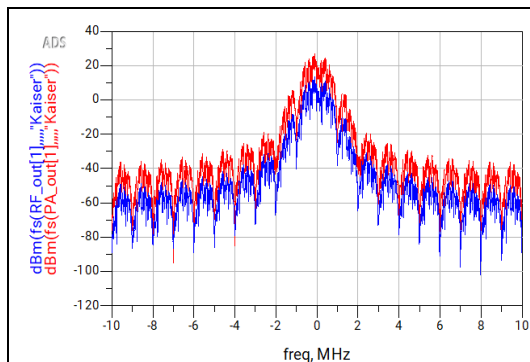
圖二十 藍色為原始訊號,紅色為經過濾波器過濾之後的訊號。

```
Eqn PAPR=peak_to_avg_pwr(I_lpf[0])
```

PAPR
2.307



圖二十一 計算濾波器輸出訊號之峰均功率比。

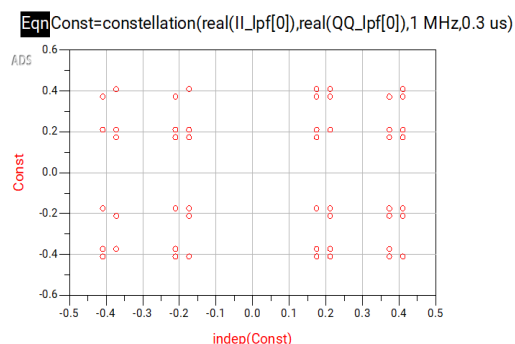


圖二十二 直接升頻QPSK正交調制器之輸出頻譜。

```
Eqn mainCH={-1MHz,1MHz}
Eqn UpCh={1MHz,3MHz}
Eqn LoCh={-3MHz,-1MHz}
Eqn ACPR_RF=acpr_vr(RF_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
Eqn ACPR_PA=acpr_vr(PA_out[1],50,mainCH,LoCh,UpCh,"Kaiser")
```

ACPR_RF		ACPR_PA	
ACPR_RF(1)	ACPR_RF(2)	ACPR_PA(1)	ACPR_PA(2)
-24.270	-26.438	-23.770	-25.926

圖二十三 經過功率放大器之前與之後 ACPR。



圖二十四 模擬訊號之QPSK星座圖。

```
Eqn BB_ideal=cplx(real(II_lp[0]),real(QQ_lp[0]))
Eqn BB_Tx=cplx(real(II_lp[0]),real(QQ_lp[0]))
Eqn EVM=evm(BB_ideal,BB_Tx,1 MHz,0. us, 0)
```

EVM
27.230

圖二十五 QPSK訊號在星座圖當中的 EVM。

答:將Symbol rate提升至2MHz後，訊號所需的頻寬變大，因此在頻譜中可以看到主瓣與旁瓣明顯拓寬，同時ACPR也因頻寬增加而變差。更高的Symbol rate使訊號變化更快，對功率放大器的線性度更加敏感，只要放大器略有非線性，就會使星座圖點位偏移和EVM上升並產生更明顯的旁帶增長；提高Symbol rate會使頻譜擴展並增加對放大器線性度的要求，若放大器性能不足，調變品質將顯著下降。

五、專案心得

在實驗中，我以系統性方式掃描功率放大器的操作點：由輸出飽和功率、增益壓縮點到輸入 back-off，一一觀察星座圖、頻譜、EVM、PAPR 與 ACPR 的聯動關係。例如，當 PA 逐漸進入壓縮區時，我學會從星座圖上判斷幅度壓縮與相位旋轉所造成的「向心收縮」與「扭轉」現象，並將這些幾何失真量化為 EVM 的惡化；在頻譜域，則能將主載波旁邊裙帶抬升與鄰頻分量增加，直接連結到非線性AM/AM、AM/PM特性與 Spectrum Regrowth 的程度。進一步地，我嘗試在不同 back-off 條件下比較頻譜遮罩與調變品質，體會到如何在「輸出功率、線性度與效率」三者之間尋找工程上可接受的折衷。這個專案讓我提升到能主動設計模擬條件、並從星座圖與頻譜的變化中解讀背後的物理意義。