

6G 太赫茲無線通訊系統

6G Terahertz Wireless Communication System

專題領域: 電子領域 組別: B140 指導教授: 楊尚樺 組員姓名: 盧東煜

一、摘要

通訊世代約每十年更迭一次。2020 年，5G 通訊成功推入人們的生活。為了預計在 2030 推行的下一世代的 6G 通訊，國外許多研究團隊投入 6G 通訊的研究。本專題基於實驗室學長之前的基礎，架設一個低成本，低複雜度的 6G 無線通訊系統，利用太赫茲光混合(photomixing)技術生成太赫茲光，並利用低成本太赫茲包絡檢波器(envelope detector)進行訊號接收。

在過去一年的專題實驗中，我架設並改良了台灣第一套 6G 通訊系統，完成在錯誤更正碼限制(位元錯誤率小於 10^{-3})下，得以在傳輸距離 60 公分的狀況下傳輸 10Gbps 的訊號，與實驗室學長先前之成果(50 公分，6Gbps)相比成長了不少，此部分之重要改變為提升了頻譜使用率，本專題對原有的 6G 通訊系統在訊號調變的方式進行了改良，由開關鍵控(On-off keying)改良為正交振幅調變-正交分頻多工(QAM-OFDM)，並量測在不同狀況下的位元錯誤率(Bit Error Rate, BER)，此部分改變由 Matlab 進行訊號的產生以及相關的數位訊號處理，相比過去的系統在相同傳輸速率下可以節省一半以上的頻寬，或是在相同頻寬下可以增加一倍以上的傳輸速率，使 6G 無線通訊系統往實際應用更往前一大步。

二、前言

太赫茲是位於微波和遠紅外光之間的電磁波頻段，頻率為 100GHz-10THz，在物體感知成像方面有廣泛的應用。近年來因為無線通訊網路的發展，太赫茲頻段在無線通訊領域也受到了許多學界與業界的關注。

5G 無線通訊系統的到來也伴隨著許多新科技的商業化，包括物聯網、大數據、人工智慧、以及虛擬實境。而 5G 系統擴展這些多樣化的技術與功能，使得網路覆蓋範圍和裝置數量也成指數性成長，因此需要更高數據速率及頻寬的無線通訊系統來支持未來科技的發展。而雖然低於 100GHz 的頻率可以是高速無線通訊系統的直接解決方案，但由於追求先進的數據速率，低於 100GHz 的大部分頻段大多已被占用，且此些頻段提供的傳輸速度也比預期需求低了兩個數量級。因此太赫茲頻段即是下一代通訊系統的最佳解。太赫茲頻段除了相比於微波波段有大量未被利用的頻段以外，相比於光學波段(optical links)大氣擾動、環境光害所造成的衰減也可忽略不計，更有匹敵有線網路傳輸速率的可能性，因此太赫茲成為了 6G 無線通訊主要被應用的波段。

有如大多數的無線通訊系統，決定系統性能的主要因素是訊號發射源(transmitter)和接收器(receiver)的特性。建立太赫茲無線通訊系統有三種主要的發射源技術。其一是基於一般傳統由電子來回震盪直接產生的太赫茲發射源，此種發射源可以產生毫瓦等級的輸出功率，提供較長距離的傳輸距離，但缺點是最大的載波頻率難以突破 sub-terahertz 的範圍，限制了訊號的頻寬。第二種則是

Quantum cascade laser emitters，也可以提供數毫瓦的輸出功率，但此種系統體積龐大且需要在低溫狀態下運作才能獲得最大輸出功率。最後則是我們楊尚樺老師所帶領的實驗室主要設計最有前瞻性的太赫茲光混頻器，使用超高速半導體材料由兩個頻率略有不同的雷射去激發出我們所需的太赫茲電磁波。此種方法雖然輸出的太赫茲功率尚無前兩種方法高，但由於覆蓋的太赫茲頻率廣且可以穩定地輸出所需的載波頻率，且最重要的是可以很簡單的融入到現有的光纖通訊系統，因此十分適合作為我們的發射源。接收端主要有兩種接收器，coherent detector 與 direct detector，雖然 coherent detector 的性能明顯優於 direct detector，但由於 coherent detector 的工作原理會大幅提升整體系統的複雜性，在未來6G 的時代通訊設備密度大約為 $10^7/\text{Km}^2$ ，過度複雜的系統會造成整體6G 普及化的困難。因此我們選擇使用太赫茲光混頻器與 direct detector (Fermi-level Managed Barrier Diode) 來契合我們低成本，低複雜度的 6G 無線通訊系統。

而先前實驗室學長的系統僅僅是藉由開關鍵控即可傳輸6Gbps 的訊號，換言之可以即時傳輸無壓縮的 UHD(4k 30fps)影像，此種調變方式雖簡單但實則非常浪費頻寬，因此本專題著重於改良調變方式，研究並使用 OFDM 訊號，提升頻譜使用率2~3倍，在未來電信業界實際應用時可以提供更多使用者6G 通訊的服務，並藉由量測不同狀態下之訊號傳輸效能，以了解整體系統之特性。

三、原理分析與系統設計

3.1 原理分析

3.1.1 正交分頻多工 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

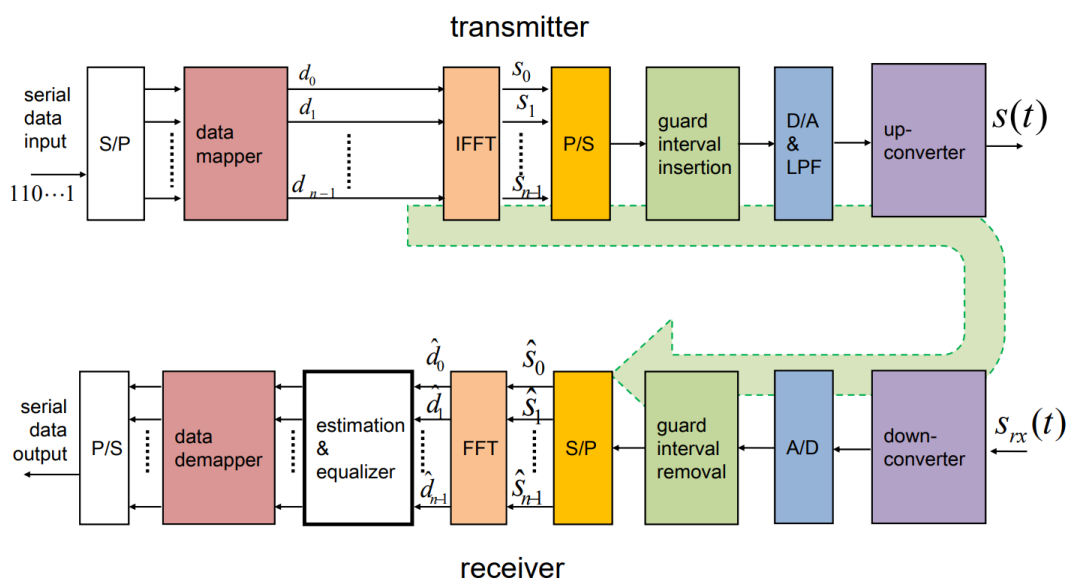


圖1 OFDM 方塊流程圖

圖1為正交分頻多工的方塊流程圖，正交分頻多工的每一個子載波彼此正

交，因此不會發生載波間干擾，解決了傳統分頻多工需要保護頻帶造成浪費頻寬的缺點。此外因 OFDM 訊號由許多子載波所構成，整體訊號頻譜呈現平坦的形狀，經過頻道如光纖和太赫茲光路時並不會像一般訊號遭遇振幅與相位的失真，每一個子載波只會受到振幅的失真，因此在接收端的等化器數位訊號處理設計上可以更加的簡單。但 OFDM 也有其缺點，因為將訊號分配到多個子載波上，會因為訊號頻譜在傳輸過程中因色散的問題造成符號間干擾 (inter symbol interference)，因此需要用到循環前綴技術(Cyclic Prefix,也稱 guard interval)來解決此問題，循環前綴技術原理運作如圖2，此種方法缺點是會略微降低傳輸之數據速率。

OFDM 訊號產生方式先將序列的二進制訊號平行排列並編碼為需要的正交振幅調變，本次實驗決定採用較為簡單的4QAM 與8QAM，分別將2bits 與3bits 數列轉換為一複數，而後進行反快速傅立葉轉換(IFFT)將不同子載波對應的訊號從頻域轉換到時域，再增加循環前綴，而後將訊號上載至中間頻率，變為可傳輸的訊號。而在接收端則是一個反向的步驟，先乘上相同的中間頻率並經過 LPF 使訊號回到基頻，再去除加入的循環前綴並將訊號平行排列進行快速傅立葉轉換回到頻域，之後經過一簡單的線性等化器，抽出若干子載波之訊號並將其與原本的訊號對照，找到振幅變化量，並與其他抓出的子載波線性近似出整體訊號的變化補償通道損失，再將等化後的訊號從 QAM 訊號進行還原即可得到訊號。

3.1.2 Mach-Zehnder Modulator (MZM)

MZM 是一種將電訊號轉換到光纖雷射中的裝置，其原理為雷射進入 MZM 後會分開為兩路，並通過一種有強烈電光效應的光電材料，例如：LiNbO₃, GaAs, InP 等材料，對此材料施加電壓並產生電光效應改變其折射率，即可製造兩光路中通過的光的相位差，製造建設性干涉或破壞性干涉。MZM 即是應用此特性使雷射可以帶有訊號。

3.1.3 太赫茲光混頻器(Terahertz Photomixing)

太赫茲光混頻器作為最有未來性的太赫茲發射源，它的運作原理為藉由兩個頻率些微不同的雷射，以下稱為 f_1 與 f_2 ，如圖4 兩雷射互相重合時會互相干涉，產生波包 $|f_1 - f_2|$ 與載波 $|f_1 + f_2|$ 。當此重合的雷射入射太赫茲混頻器時，光混頻器內的半導體材料會吸收雷射並產生光電流，而因為兩雷射的載波頻率 $|f_1 + f_2|$ 通常遠大於太赫茲光混頻器的截止頻率，因此只有與波包頻率相同的太赫茲光波會被太赫茲光混頻器發出。我們可以利用這個特點去產生出固定的太赫茲頻率當作太赫茲無線通訊系統的載波頻率以在空間中傳輸訊號。且此種利用雷射去激發出太赫茲光訊號的技術也可以十分容易融入到現有的光纖通訊系統中，對未來6G 無線通訊系統普及化帶來莫大的便利性。

3.1.4 Fermi-level Managed Barrier Diode (FMB)

FMB 由磷化銦(InP)和負摻雜的砷化銦鎵 (n-InGaAs) 製成，可以吸收太赫茲電磁波並轉化為光電流，並可透過控制負摻雜的砷化銦鎵的摻雜濃度來調控這兩

種材料的能帶差異到100meV 以下，阻抗差異小所帶來的效益為內部產生之噪音也會因此降低，可以更好的偵測寬頻的太赫茲訊號，因此我們選擇使用 FMB 在^{6G}無線通訊系統內作為太赫茲光的接收器。

3.2 系統設計

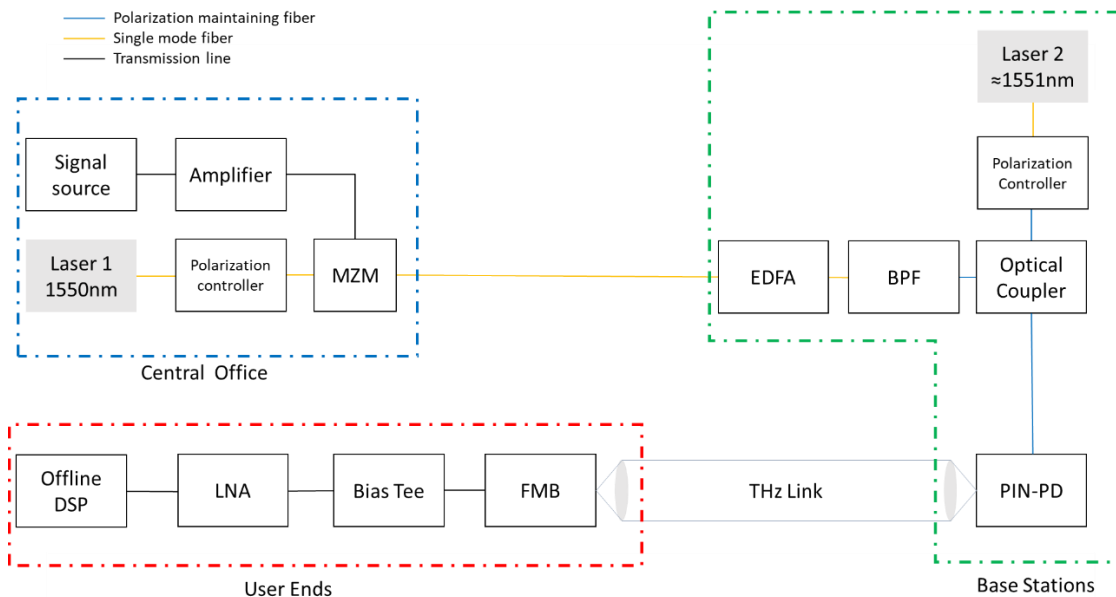


圖2 6G 系統方塊圖

本實驗系統依據通訊系統架設分為中心站、基地台與行動用戶端三個部分如圖6，OFDM 訊號由中心站處理、產生並發出，輸入 MZM 由電訊號轉換至雷射中並經由光纖傳輸至遠方的基地台，在基地台首先由摻鉕光纖放大器(EDFA)放大訊號，補償因傳輸造成的訊號損失，之後經過帶通濾波器(BPF)濾掉一同被摻鉕光纖放大器放大的白噪音並將訊號與另一不同頻率的雷射一同傳入光耦合器(coupler)再進入太赫茲光混頻器變成太赫茲訊號，無線的太赫茲訊號會將訊號從基地台發射至用戶端的 FMB，再經過 bias tee 剷除直流成分避免傷害到低噪放大器，最後就可以進行訊號的解碼與分析。

四、研究結果

4.1 實驗步驟

首先研究生成OFDM訊號的Matlab程式編碼，並生成我們所需的訊號，圖6即為生成的4QAM 6Gbps與8QAM 6Gbps訊號，在本次專題都使用3GHz作為intermediate frequency來讓所有頻寬的訊號得以在時域進行傳輸並擁有相同的標準。

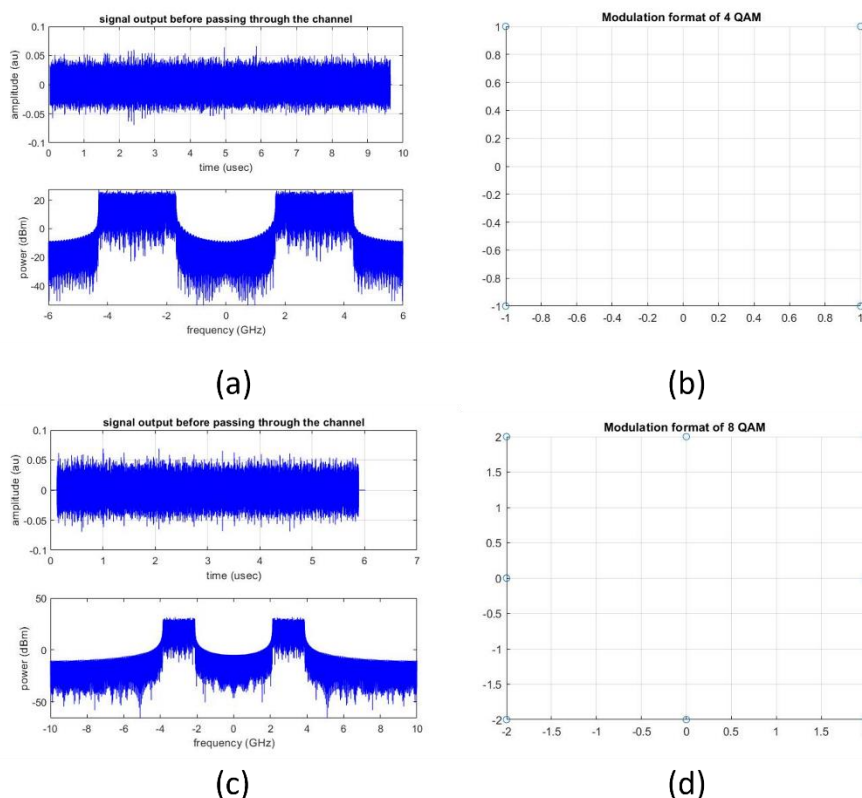


圖3 Matlab生成之 (a) 4QAM-OFDM時域與頻域訊號 (b) 4QAM星座圖
(c) 8QAM-OFDM時域與頻域訊號(d)8QAM星座圖

實驗首先架設可以傳輸開關鍵控訊號的系統，學習各元件、裝置的使用方式，調整各項參數，並先由開關鍵控訊號的眼圖(eye diagram)進行整體系統的校準，包括光路架設、偏振控制器(Polarization controller)的方向以及Mach-Zehnder Modulator偏壓的調整，藉由眼圖的數據可以判斷目前通訊系統的品質，如圖7。

待實驗整體儀器架設成功穩定之後，即可開始進行OFDM訊號的實驗，由Matlab產生訊號檔案，使用Arbitrary Waveform Generator(AWG70001A)週期性輸出訊號，並在最後由示波器擷取訊號，連接至電腦再由Matlab進行線下解碼並計算位元錯誤率，在本實驗中計算位元錯誤率的方式皆使用EVM(magnitude of error vector)計算而得，因為每一個周期訊號產生之長度約為96000 bits，如果使用一一對照計數的方式計算BER會使得BER在小於 10^{-5} 後無法完整呈現趨勢，因此我們皆使用以下公式由EVM推得BER之值，並藉此評估系統整體的效能。

$$BER = \text{erfc} \left[\sqrt{\frac{1}{(EVM)^2}} \right] \quad (1)$$

4.2 OFDM 6G無線通訊系統

本次專題實驗選擇了三種太赫茲載波頻率分別為125GHz, 175GHz, 225GHz，彼此間隔50GHz，總共覆蓋100GHz頻寬，並分別量測4QAM, 8QAM在不同頻寬、距離下的位元錯誤率趨勢。圖8為系統在125GHz的量測結果，圖8(a)與(b)明顯可見位元錯誤率隨著距離增加而上升，這大部分是因為太赫茲光束在空氣中散射造成接收到的訊雜比(SNR)下降造成。而透過比較圖8(a)與(b)可發現8QAM整體之位元錯誤率較4QAM為高，此部分是因為8QAM比4QAM擁有更高的頻譜使用率，在星座圖上的分布也更為密集，因此在相同的訊雜比下，位元錯誤率會明顯低了2~5個數量級。此外也可以發現在40公分時某些位元錯誤率跟在20公分時差不多

甚至更低，在做實驗時也發現了這個問題，應是由於校準光路時40公分的準度比20公分時好很多，造成了這個結果。

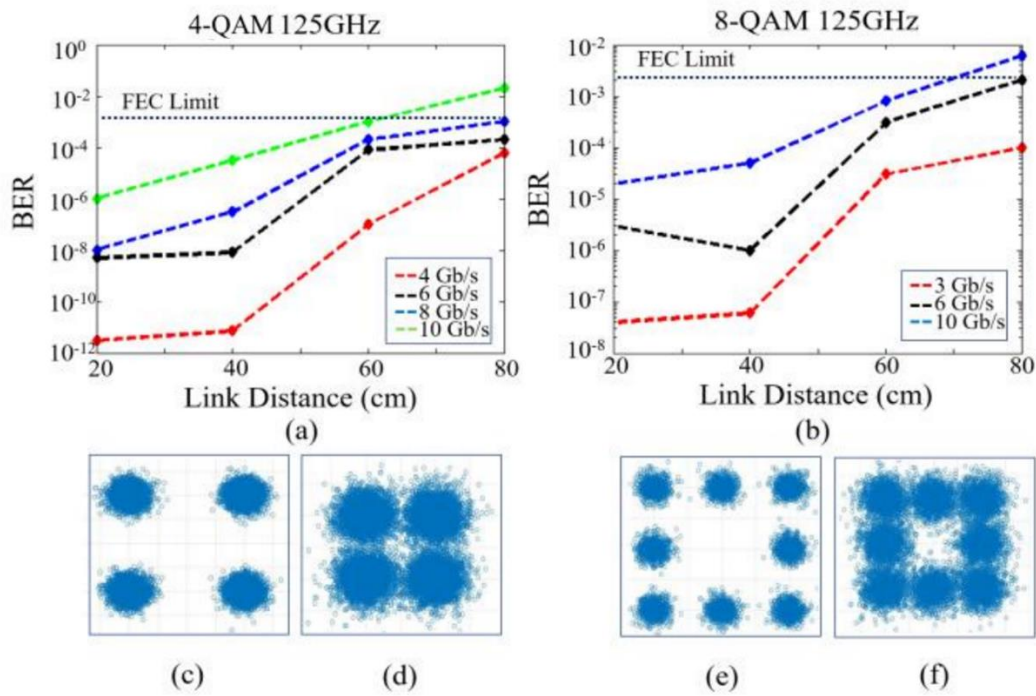


圖 4 125GHz 時 BER 與距離之關係在 (a)4QAM 傳輸格式 (b)8QAM 傳輸格式 (c)4Gbps-4QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (d)8Gbps-4QAM 傳輸距離80公分之星座圖 (e) 3Gbps-8QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (f) 6Gbps-8QAM 傳輸距離80公分之星座圖。

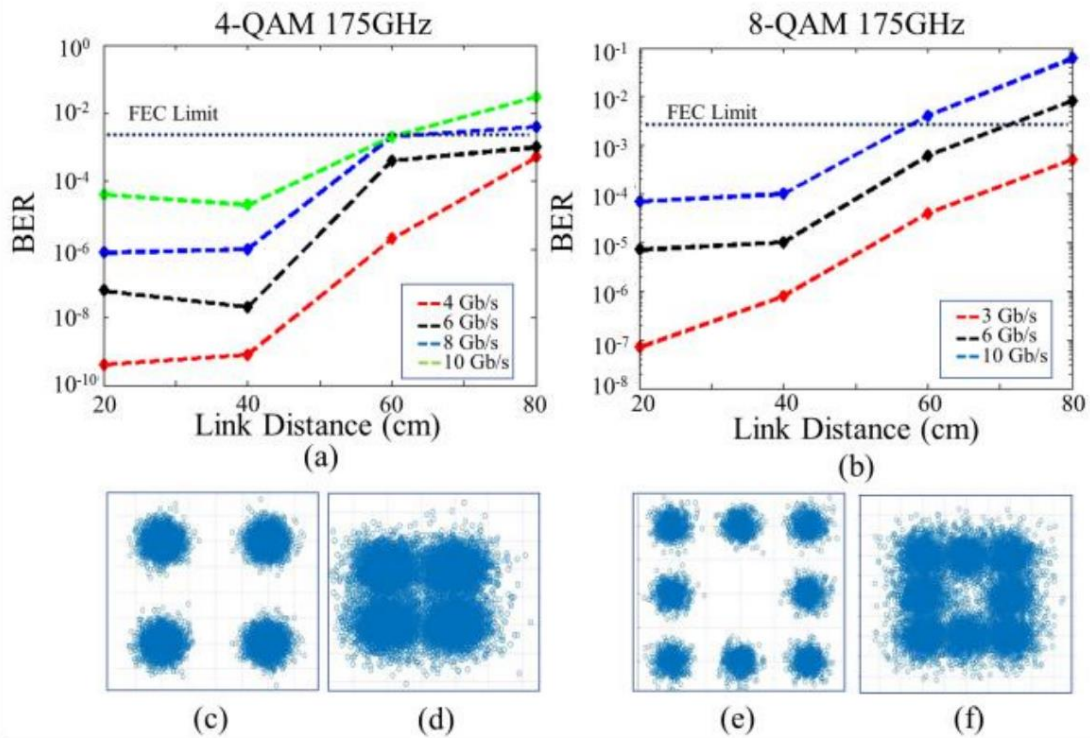


圖 5 175GHz 時 BER 與距離之關係在 (a)4QAM 傳輸格式 (b)8QAM 傳輸格式 (c)4Gbps-4QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (d)8Gbps-4QAM 傳輸距離80公分之星座圖 (e) 3Gbps-8QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (f) 6Gbps-8QAM 傳輸距離80公分之星座圖。

之星座圖。

圖9 為載波頻率在175GHz之量測結果，因太赫茲發射源在此頻率的功率與125GHz相比顯著下降，造成訊雜比下降，因此系統整體的效能也跟隨之下降。

圖10 為載波頻率為225GHz之量測結果，在此頻率太赫茲發射源的功率約為125GHz的 $\frac{1}{5}$ ，因此可以明顯觀察到系統整體的效能相較之下較為低下，位元錯誤率與前兩個載波頻率相比增加了一到兩個數量級，星座圖相比前面也是更加難以分辨各自的位置。綜合這些實驗可以得到一個結論為:隨著載波頻率的提高，位元錯誤率也會隨之上升。

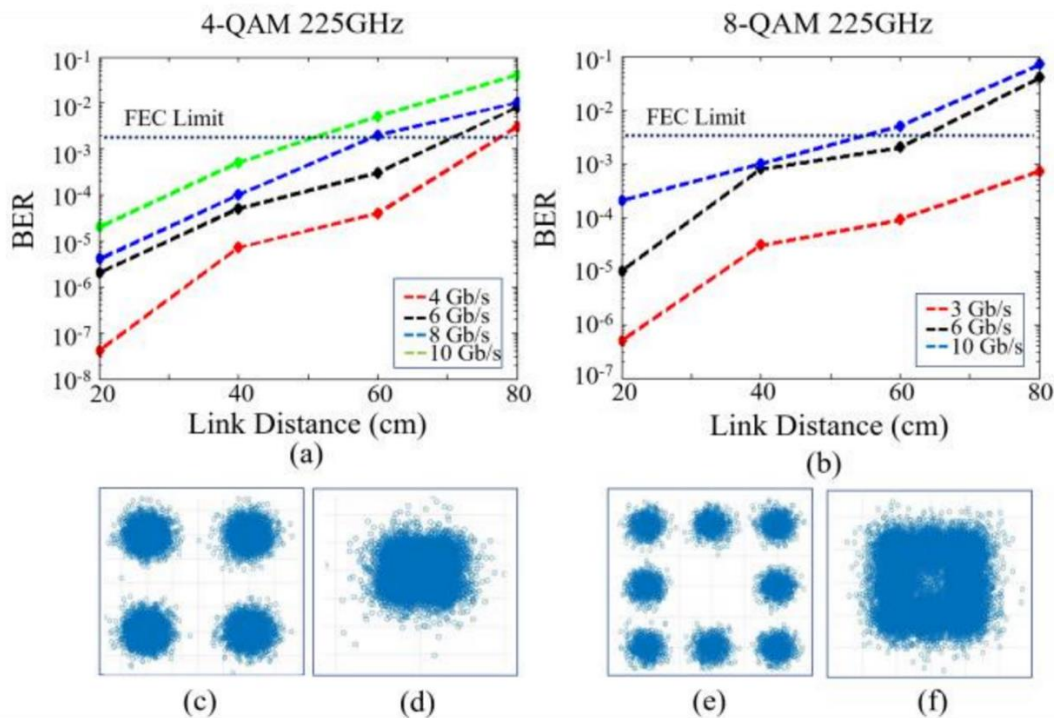


圖10 225GHz時BER與距離之關係在(a)4QAM傳輸格式 (b)8QAM傳輸格式 (c)4Gbps-4QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (d)8Gbps-4QAM 傳輸距離80公分之星座圖 (e) 3Gbps-8QAM 傳輸距離20公分之星座圖 (f) 6Gbps-8QAM 傳輸距離80公分之星座圖。

五、總結

在這一年的實作專題課程中，我完成了台灣第一個6G太赫茲無線通訊系統的架設，並在先前系統的基礎有效地提升了頻譜使用率，除了成功讓系統能在60公分的距離可以傳輸10Gbps的訊號以外，根據系統效能的推算，在較短的距離可以擁有更快的傳輸速率。雖然整體系統增加了數位訊號處理的部分但系統依然保持著低成本低複雜度的特質，更可以在數位訊號處理的解碼部分增加AI等化器，可以得到更低的位元錯誤率。本次專題的結果也有助於我們更了解整個系統在不同情況下的效能表現，對未來系統的分析與改良有很大的幫助。其中尤其因為emitter的功率不夠大以及長距離太赫茲光路的校準難以捉摸，無法有效率的建置傳輸距離超過1公尺的6G無線通訊。如何解決上述問題，是未來6G太赫茲無線通訊系統改良的首要目標。

六、心得感想

在這一年的專題實驗中，我一步步體驗到做研究的精神以及步驟，從剛進實驗室開始連太赫茲是如何產生的都不知道，甚至懷疑實驗室要做好許多雷射的保護措施那太赫茲到底要如何應用於下一個世代的無線通訊。到後來閱讀了許多論文以及跟教授、學長姐請教以後，才逐漸了解太赫茲的真面目以及為何它是如此的有未來發展性。

在做實驗的過程中我們按照先前的論文一步一步將系統架設起來，除了要注意不要把儀器用壞以外，也要清楚每個元件的脾氣，要如何將每個元件同時保持在最佳狀態也花了我們不少功夫，常常是牽一髮而動全身，要如何讓訊號變的穩定是我在實驗中遇到的第一個問題。再來就是取得所有的數據後要如何統整與分析，也是我在本次專題中下了很多工夫的地方，這部分也是跟博士班學長請教了不少，感謝實驗室的大家的幫忙，使我能夠順利的完成本次專題研究，專題的經驗讓我學會解決問題的能力，了解身為一位研究者、工程師所該有的態度，實在是獲益良多。