

一、報告摘要

基於無線通訊傳輸需求的增加，目前已逐漸商業化的 5G 仍有資料輸出率不足，網路容量不足的問題。而太赫茲 6G 無線通訊系統，因頻率越高，可分配的頻寬範圍也隨之增大，單位時間內所能傳遞的資料量也隨之增大。而為因應龐大的數據傳輸量以及為建立足夠網路容量，高傳輸速率、低錯誤率、實時直接檢測、高度可調以及在未來能夠整合成高速通訊系統的需求成為下一代 6G 通訊的目標。

在修習實作專題三學期中，我與學長共同完成了**全台灣第一套太赫茲無線通訊系統，並就非對齊通道以神經網路機器學習之方式的非線性等化器修正錯誤**。我架設完成符合前向錯誤更正(Forward Error Correction)的限制，以載波頻率(Carrier Frequency) 125GHz 至 225GHz 的條件下，傳輸距離 0.6 公尺的狀況下傳輸 10Gbps 的訊號之太赫茲無線通訊系統。並在前向錯誤更正的限制下，以載波頻率 125GHz 的條件下，使用 4Gbuad 4QAM-OFDM (相當於 8Gbps) 的訊號完成 0.6 公尺非對齊通道之無線傳輸。其中，我使用神經網路機器學習之方式修正非對齊通道之錯誤，將位元錯誤率(Bit Error Rate)降低至少一個數量級(Order)。在研究進展中，我利用該太赫茲無線通訊系統獲得由亞洲太赫茲產業發展協會舉辦的 2021 第三屆全國太赫茲及毫米波創新技術應用專題實作競賽特優的佳績。

在這份報告中，我將展示高傳輸速率、低錯誤率、實時直接檢測、高度可調以及在未來能夠整合成超高速的太赫茲 6G 無線通訊系統。

二、報告內容

1. 基於過去研究成果提出系統設計

基於文獻回顧，考量光電混合的高太赫茲無線通道的產生方式，具有設置容易攜帶、亦可提供足夠大的頻寬的特性，且接收端高解析度的優點較容易實現調變深度高的訊號傳輸。本報告將使用光電混合的方式產生實時高速太赫茲無線通道，以 PIN-PD 作為發射器，因其高功率及寬頻的效果。而接收器則使用直接檢測(Intensity Modulation / Direct Detection)的太赫茲包絡檢波器(Fermi-level Managed Barrier, FMB)，因其在 300GHz 的時候具有很低的等效雜訊產生，雜訊為 $5\text{pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，故將以直接偵測的方式進行訊號的接收。本報告進行之實驗，以載波頻率(Carrier Frequency) 125GHz、175GHz、225GHz 的條件下，傳輸距離 0.2、0.4、0.6、0.8 公尺的狀況下傳輸 4、6、8、10Gbps 的訊號之太赫茲無線通訊系統。並以載波頻率 125GHz 的條件下，使用 3Gbuad 及 4Gbuad 4QAM-OFDM 的訊號完成 0.6 公尺非對齊通道之無線傳輸。

2. 太赫茲無線通訊通道

設計原理及方法：

本報告為模擬無線通訊實際應用，將本報告太赫茲無線通訊系統分成交換中心(Center Office 接收，將接收到的訊號轉換電訊號輸出。而此設計中，交換中心可改變載波頻率以及訊號輸入，基地台則負責訊號發送，交換中心及基地台作為固定儀器。用戶端作為訊號接收者，可改變距離，作為非固定儀器。

太赫茲無線通訊系統

圖 1 為本報告所提出的為太赫茲無線通訊系統。本報告交換中心由訊號源、一台雷射、馬赫任德調變器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)、極化控制器(Polarization Controller, PC)以及調變器驅動器作為訊號放大器(Amplifier)組成。一開始先將由 QAM-OFDM 調變後產生的電訊號源利用 MZM 將電訊號乘載在經過 PC 後波長為 1550 nm 的雷射 Laser 1 上，使其成為載有資訊的「光訊號」。

本報告基地台則由摻鉕光纖放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)，帶通濾波器(Band Pass Filter, BPF)、光學耦合器(Optical

、基地台(Base Station)以及用戶端(User End)。交換中心的作用是為資料交換以及作為資料源的提供，會將帶有資料的訊號通過光纖以光訊號的形式提供至基地台。而基地台負責將訊號升頻至太赫茲波段，並通過無線的方式將訊號傳遞至用戶端。而用戶端則負責訊號

l Coupler)、另一台雷射、光混合器(Photomixer)組成。而為達到本實驗太赫茲無線通訊的需求，本報告使用的光混合器意即太赫茲發射器為 PIN-PD。而來自交換中心的訊號經過 EDFA 將光訊號放大，使其有足夠的能量輸入發射器。由於 EDFA 會同時放大雜訊的帶寬以及在系統中本身存在的雜訊，故利用再 BPF 將 1550 nm 以外波長的光濾除。由光學耦合器將 Laser 1 與另一雷射 Laser 2 作 Beating，將光波頻率升頻(up-conversion)

至太赫茲波段，以達到本實驗太赫茲無線通訊的需求。透過太赫茲發射器(PIN-PD)將太赫茲波段的雷射光發射在空氣中。

本報告用戶端則由 FMB 以及經過 MATLAB 的 DSP 過程組成。在接收端方面，使用的太赫茲接收器(FMB)，能將在空氣中的太赫茲光波直接接收，並將來自基地台的訊號轉換成電訊號輸出，接下來便使用 MATLAB 做解調以及計算誤碼率。

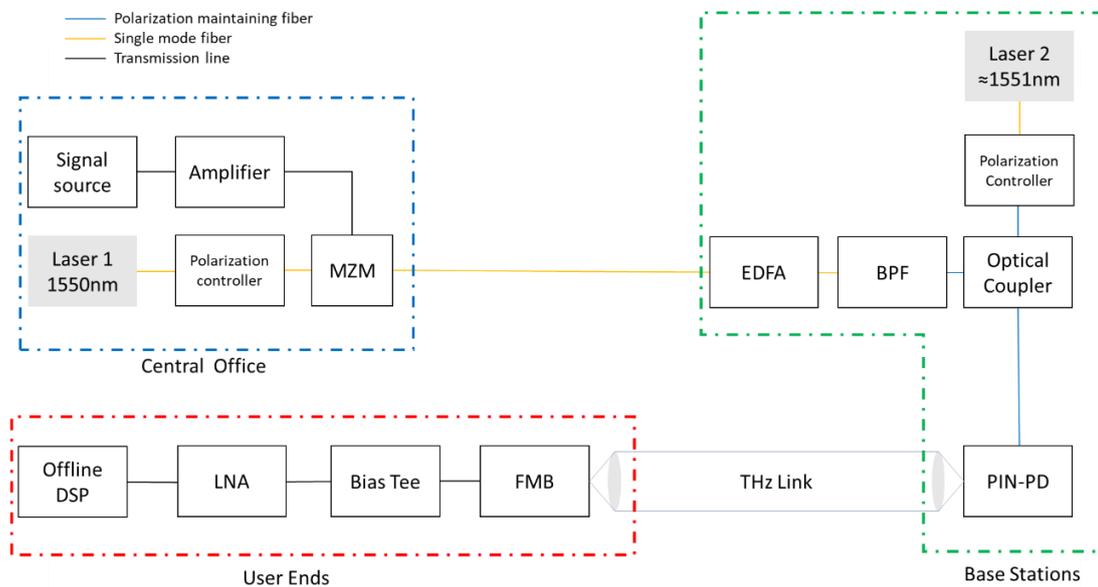


圖 1、太赫茲無線通訊系統架構圖

3. 非對齊太赫茲無線通道

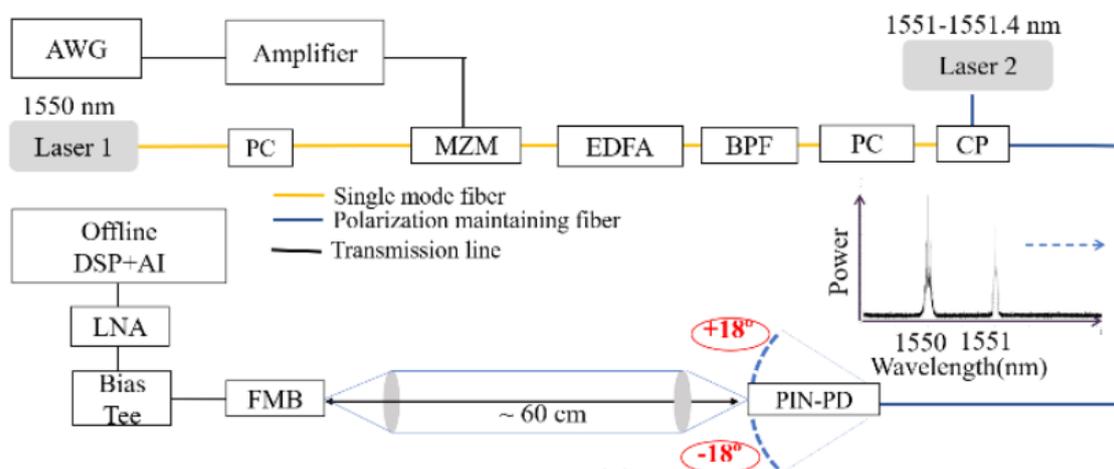


圖 2、非對齊太赫茲無線通訊系統架構圖

非對齊太赫茲通道之模擬是以現有太赫茲無線通訊系統作為架構，將發射器 PIN-PD 放置與旋轉台上，通過馬達控制水平旋轉旋轉盤，進而使得發射器隨之改變入射角度。此設計在用戶端進行非實時 DSP 及 AI 處理。

此報告通過實驗獲取足夠多的數據集(Data set)，並將其隨機分成訓練集(Training Data)、驗證集(Validation Data)、測試集(Test Data)。在輸入層，將訓練的訊號會被表示成為 $X = [x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, \dots, x_{N(1)}^{(1)}]$ 而 $N(1)$ 代表樣本的数量。在接下來一層，每一筆輸入的訊號會乘以一個加權係數(Weight Coefficient) w_{rn}^l ， l 代表第 l 個隱藏層(Hidden Layers)， r 代表第 r 個現在一層的節點， n 代表第 n 個下一層的節點。最後形成輸出。通過訓練集訓練模型，並使用驗證集進行驗證，最後再將數據輸入通過訓練的模型，即可得訓練後的結果。

三、實驗結果

本研究報告的執行期限為 17 個月，此報告可分為兩項研究階段：太赫茲無線通訊系統設立及訊號產生、非對齊通訊通道之非線性等化器。

第一階段(2021.01-2021.12)

此階段將建立太赫茲無線通訊系統，以 PIN-PD 為發射器及 FMB 為接收器，使用現有實驗室的器材達成此系統的設置。並使用 MATLAB 產生 QAM-OFDM。此階段目標是以建立直接發射、實時的太赫茲無線通訊系統。並可產生試驗所需之訊號。本專題以三種太赫茲頻率 125GHz, 175GHz, 225GHz 作為載波頻率，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 6、7、8 分別為系統在 125GHz、175GHz、225GHz 的量測結果。

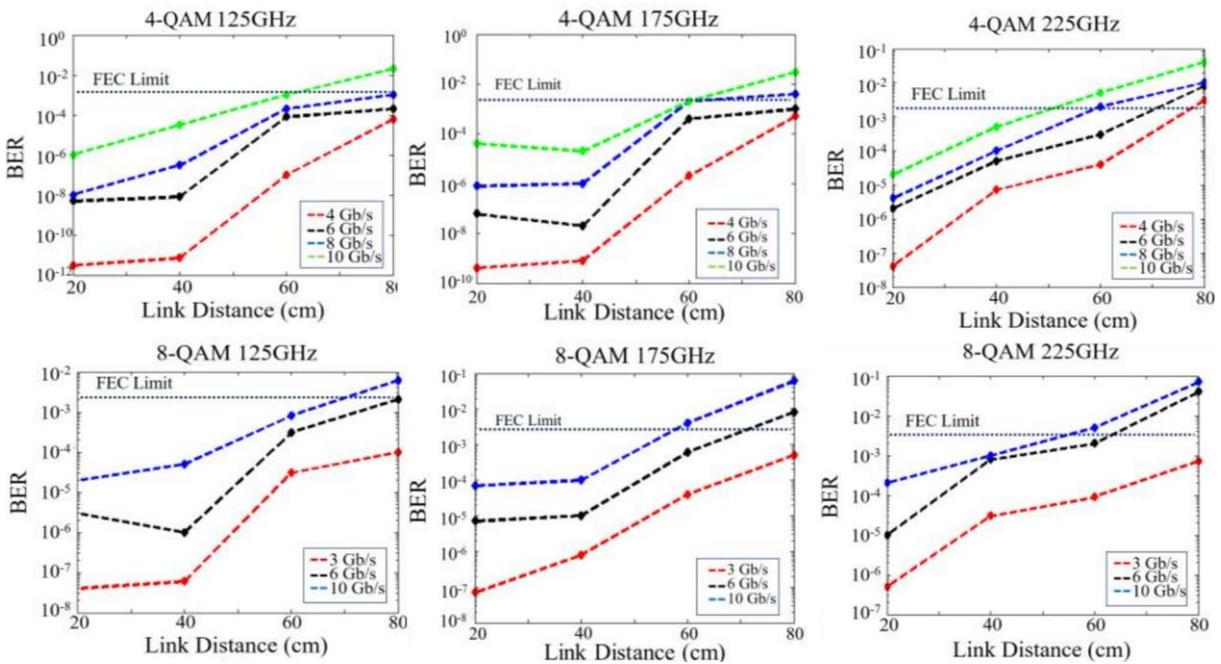


圖3 為載波頻率 125GHz、175GHz、225GHz 時輸距離與 BER 之關係在 (a)4QAM 調變 (b)8QAM 調變

從圖4可觀察出，BER隨著傳輸距離的變長而提高，而同樣資料傳輸量的增加也會造成BER的提高，而以增加調變級數，如QPSK增加為8QAM，也會造成BER的增加。而在80公分時大部分訊號都無法符合前向錯誤更正的限制，推測是因為發射器的能量大小不夠大，如提高發射器的光學能量或是電壓有機會得到更加好的結果。而因QAM的調變方式易受到相位的影響，推測大部分雜訊的來源是相位的因素，可能空氣粉塵的折射或是水分子的吸收。在增加資料傳輸量的部分，因為器材本身頻寬的限制，會產生非線性的衰減，推測部分的雜訊來源與此。

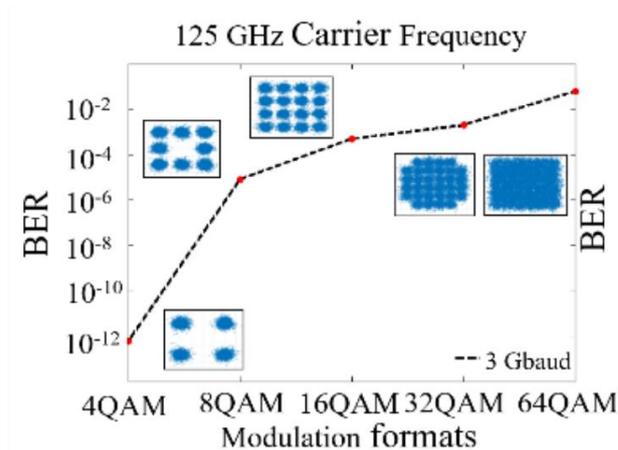


圖 4 為不同調變方式(4-QAM、8-QAM、16-QAM、32-QAM、64-QAM)在 3Gbaud Rate)以傳輸距離 60 公分，載波頻率 125GHz 傳輸，調變級數與 BER 的關係圖。

第二階段(2022.01-2022.06)

此階段將著重於非對齊無線通訊通道之等化器。利用上一階段所設立的太赫茲無線通訊系統，進行非對齊無限通道之修正。

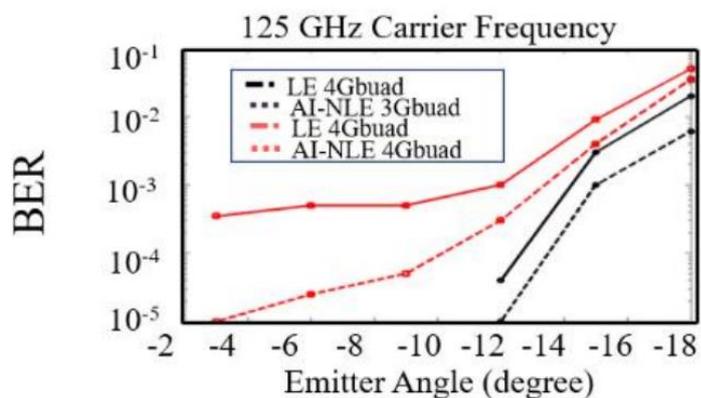


圖 5 為載波頻率 125GHz，傳輸距離為 60 公分，發射器旋轉角度與 BER 的關係圖

黑線是為 3Gbaud QPSK 訊號，紅線是為 4Gbaud QPSK 訊號。虛線是為經過神經網路機器學習之方式的非線性等化器修正的發射器旋轉角度與 BER 的關係圖，實線是為未經修正的發射器旋轉角度與 BER 的關係圖。可以觀察到虛線和實線的 BER 差了至少一個數量級，足以證明該非線性等化器的成功。

四、結論

在這一年半的實作專題學習中，我與學長共同完成了全台灣第一套太赫茲無線通訊系統，並就非對齊通道以神經網路機器學習之方式的非線性等化器修正錯誤。我在專題中，負責系統架設、系統量測、無線通道估測及研究。在修習專題的過程讓我對光通訊系統更加了解，也更加了解通訊系統在實際的應用。讓我知道實際通訊系統中，交換中心、基地台及用戶端的角色。除了知識的獲取，本次專題也因為大量的手做實驗讓我得以操作，並和學長學習如何使用各種儀器去檢查或量測所需要的訊號。而在實作以外，也讓我學到團隊合作的重要性，通過分工才能架設完成整套系統。未來，希望有機會，可以在此系統上更加精進，以求達成更為快速的太赫茲無線通訊系統，並能成為未來商用太赫茲無線通訊系統的基礎。

本報告利用清華大學電子所楊尚樺助理教授實驗室及通訊所馮開明教授的實驗設備完成實驗，並通過實驗室軟體及硬體的支援，完成本報告的系統架構及實驗分析。

本報告通過指導教授，得以了解太赫茲元件的雜訊來源以及太赫茲通道特性。本報告通過指導教授的直接幫助，並通過一對一會議輔助以完成計畫。實行專題間，參與每週至少二次的會議，分別是實驗室群體會議與實驗室通訊組會議。在群體會議中，每月至少上台報告一次，以訓練個人報告能力；在其餘會議時間則能學習到不同學長姐的報告方法與研究內容，藉不同方法優化原系統；在實驗室通訊組會議中，則更深入討論系統的細節，藉由討論溝通，共同設計實驗步驟。本報告主要負責無線通訊系統中系統架設及系統量測，通道系統的評估。