

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究摘要

Quantum Noise with Volterra Equalizer-Aided  
OFDM system to Address Privacy Issues  
in Terahertz communication

使用量子噪聲與 Volterra 等化器

輔助 OFDM 系統解決

太赫茲通信中的安全性問題

專題領域：通訊領域

組別：B472

指導教授：楊尚樺

組員姓名：陳俊翰、滕彥宜、邱啟巖

研究期間：2024 年 2 月 19 日 至 2024 年 11 月 25 日，共 9 個月

## 摘要

隨著無線通訊需求的持續增加，目前的 5G 技術已難以支撐未來 6G 所需的更高傳輸速率、更低延遲以及更大網路容量。因此，擁有更高頻寬的太赫茲 (THz) 頻段成為實現高速數據傳輸的核心技術之一，能夠在單位時間內傳遞更多數據，以應對龐大的傳輸需求。為了滿足未來 6G 網路對數據量與容量的要求，6G 技術的目標是實現高傳輸速率、低錯誤率、實時檢測、高度靈活性，並且能夠整合成更強大的高速通信系統。

然而，傳統光纖通訊傳輸時在高頻率下會面臨竊聽的風險，對個人隱私、交易甚至國家安全造成不安全。故隨著量子計算的發展，依賴計算複雜度的加密技術逐漸失效。本研究提出一種結合量子噪聲技術與 Volterra 等化器輔助的正交分頻多工 (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 系統，以提升太赫茲頻段 6G 通訊的數據安全性與抗干擾能力。

在修習實作專題的兩學期中，我們三個將原有的 OFDM 系統利用量子噪聲的隨機性特質，將隨機生成的噪聲信號加入傳輸信號中，以干擾竊聽者並保障數據安全；同時，Volterra 等化器應用於接收端，以補償在高頻傳輸中因非線性失真導致的信號劣化。模擬及實驗結果顯示，該系統於不同調變方式下 (16-PSK (Phase Shift Keying) 與 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)) 達成將位元錯誤率 (BER, Bit Error Rate) 降低至少一個數量級的結果，驗證了此架構在高頻太赫茲環境中的穩定性與安全性。

在這份報告中，我們將展示高傳輸速率、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。

# 1. Background and Motivation

隨著物聯網、智慧城市與無人駕駛技術的普及，現代社會對高速、低延遲且高度安全的數據傳輸需求日益增加。然而，當前的光纖傳輸系統面臨著嚴重的安全威脅，尤其是關鍵數據的洩露，對個人隱私、交易及國家安全造成威脅。此外，隨著量子計算技術的快速發展，依賴計算複雜度的傳統加密技術逐漸變得脆弱，無法有效應對新興的量子攻擊。

為了應對這些安全挑戰，量子密鑰分發（QKD）技術憑藉其依賴量子物理原理保障安全的特性，已成為一種高度安全的密鑰生成方式。QKD 利用量子態的不可克隆性和測量干擾原理，能夠有效檢測並防範潛在的竊聽行為。然而，QKD 的應用仍面臨諸多挑戰，如密鑰生成速率較低、需要昂貴的專用設備和高精度光學系統，這使得其在高頻需求的高速通信系統中難以滿足要求，並限制了其在成本敏感場景中的應用。

為了解決這些問題，本研究提出了量子噪聲技術方案。此技術基於光的多層次調制特性和隨機性，能夠通過引入量子噪聲來進一步增強通信系統的安全性。隨機生成的量子噪聲被加入到傳輸信號中，這使得竊聽者難以解碼或攔截信息，而合法用戶則可透過匹配的算法還原信息。此外，量子噪聲技術還能提升密鑰生成速率，滿足高速通信的需求。

在無線通信領域，非線性失真問題一直是提升傳輸品質的重大技術障礙，尤其在即將到來的 6G 通信和低軌道衛星通信等應用中尤為突出。為了解決非線性失真問題，本研究在通信接收端引入了 Volterra 等化器。該等化器能夠有效補償高階非線性失真，顯著提高信號準確度和穩定性，降低誤碼率，從而提升整體系統的通信品質。隨著通信技術的發展，Volterra 等化器在未來的 6G 高頻傳輸和低軌道衛星通信中將發揮關鍵作用，為新一代通信網絡提供穩定而高效的傳輸效能。

## 2. Purpose

本研究旨在提升太赫茲（THz）頻段 6G 無線通信系統的安全性與效率，並解決當前光纖和無線傳輸系統中的非線性失真問題。透過結合量子噪聲技術與 Volterra 等化器，本研究目標是增強通信過程中的抗竊聽能力，提升密鑰生成速率，並有效補償傳輸過程中的非線性失真，從而提高信號準確度與整體系統的穩定性。這些技術的應用有助於滿足未來 6G 通信系統對高速、低延遲、高容量的需求，並推動未來通信技術的發展。

### 3. Method

#### 3-1. 實驗架構

圖 1 是此次所設計的 OFDM 架構圖，上半部與下半部可分成傳送端與接收端，並透過顏色的區分來標註此次報告所重點研究的部分。

在傳送端的部分中，使用偽亂數二進位函數（PRBS, Pseudorandom binary sequence）來生成週期性的訊號來做模擬以便觀測不同參數下的結果，此訊號並根據調變係數（Modulation Level）、符號長度（Symbol length）及 NSC 的大小設定來傳輸訊號的數量。接下來，將一連串的訊號矩陣轉置為 QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）的形式，即每個符元有兩個 Bits，再來透過設計好的調變演算法來加入量子密鑰，把此訊息調變成 16-PSK 或是 16-QAM 的形式。再者，調變後的訊息根據起初設定的傅立葉轉換（FFTsize, Fast Fourier Transform Size）的尺寸大小以加入零填充（Zero-Padding）來增加傳輸訊息的長度。此外，透過逆快速傅利葉轉換（Inverse Fast Fourier Transform）轉換至時域（Time domain）上，而為了避免訊號在光纖通訊的傳遞中互相的干擾，故將訊息的尾端複製並插入到開頭的部分，增加循環前綴（CP, Cyclic Prefix）。最後，再將此訊號升頻並傳送出去。

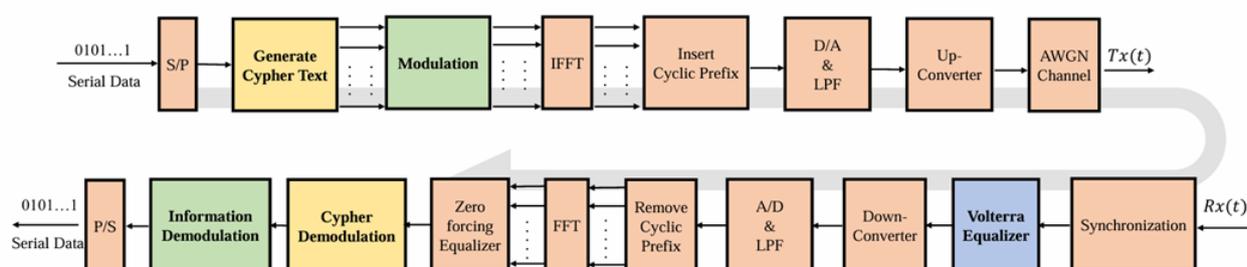


圖 1、OFDM 架構圖

而在接收端的部分，目標是將經過可加性高斯白雜訊（AWGN, Additive White Gaussian Noise）的訊號能夠順利解調成最初想傳送的訊息。故先將接收到的訊號做同步，重新取樣並確保與傳送端的取樣速率匹配且不會失真。接著，此處我們加入了二階 Volterra 等化器來優化濾波器的性能，並解決非線性干擾的問題。再者，將訊號降頻之後會經由低通濾波器（LPF, Low-pass filter），接著去除在傳送時增加的 CP，再將時域訊號透過快速傅利葉轉換（Discrete Fast Fourier Transform）把資料轉回頻域上，運用強制歸零等化器（Zero-Forcing Equalizer）來消除在多路徑環境中的 ISI。最後，透過我們設計的解調演算法來將過濾的訊號能夠解調成原本的訊息，觀察此接收到的訊

息與起初傳送的訊息來比較並觀測其傳輸的能力及整體錯誤率，是否能提高整體通訊傳輸的安全性。

### 3-2. 太赫茲光纖通訊通道

圖 2 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 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。

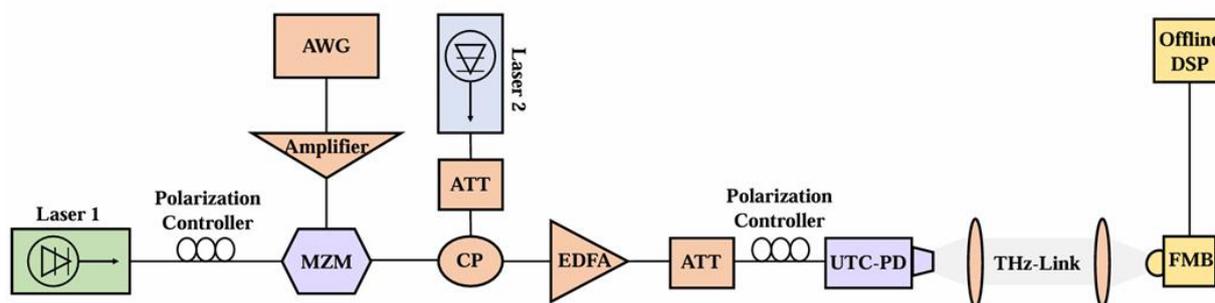


圖 2、太赫茲光纖通訊架構圖

### 3-3. 量子噪聲實現

而下面我們對如何調變量子噪聲訊號具有清楚的說明，從 QPSK 的通訊

資料進行 PSK 調變，調變方程式表示為：

$$m_i = (x_{i_{LAW}} \oplus u_{i_{LSB}}) \cdot 2^t + (x_{i_{upper}} \oplus u_{i_{LSB}}) \cdot 2^{t+1} + u_i, 1 \leq i \leq n$$

其中  $n$  表示明文的長度， $m_i$  表示  $\log_2(M)$  位元高階 M-PSK 密文， $M$  表示擴散映射階數， $t$  表示量子密碼基礎的位數，表示最低有效位(LSB)的密碼基礎， $x_{i_{LAW}}$  和  $x_{i_{upper}}$  並分別代表 QPSK 資料的低位和高位。

從 QPSK 的 QAM 擴散映射可視為 QPSK 的低位和高位的擴散，表示如下：

$$m_{iI} = (x_{i_{upper}} \oplus u_{i_{LSB}}) \cdot 2^{tI} + u_{iI}, 1 \leq i \leq n$$

$$m_{iQ} = (x_{i_{low}} \oplus u_{i_{QLSB}}) \cdot 2^{tQ} + u_{iQ}, 1 \leq i \leq n$$

其中， $n$  表示明文的長度， $m_{iI}$  和  $m_{iQ}$  表示  $(\log_2 M)/2$  位元的 I 和 Q 路徑的 M-QAM 密文， $M$  表示加密映射的階數， $t_I$  和  $t_Q$  表示 I 和 Q 路徑中密鑰基礎的位元數， $u_{i_{LSB}}$  和  $u_{i_{QLSB}}$  表示密鑰基礎  $u_{iI}$  和  $u_{iQ}$  的最低有效位元， $x_{i_{low}}$  和  $x_{i_{upper}}$  分別表示 QPSK 數據的低位元和高位元。

### 3-4. Volterra 等化器

在此系統中，二階 Volterra 方程描述了輸入  $x(n)$  和輸出  $y(n)$  之間的關係。該方程的具體形式為：

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N1} w_i x(n-i) + \sum_{i=0}^{N2} \sum_{j=i}^{N2} w_{i,j} x(n-i)x(n-j)$$

其中， $w_i$  和  $w_{i,j}$  分別表示一階和二階 Volterra 等化器係數， $N1$  和  $N2$  則為相應的記憶長度。為了優化等化器的性能，系統採用 LMS (最小均方) 算法來更新等化器係數。通過迭代更新，LMS 算法使等化器係數逐漸收斂，從而最終實現最佳的等化性能。

## 4. Results and discussion

在 OFDM 架構下，透過 PSK 和 QAM 調變的量子密鑰技術，本研究實現了多層次的物理加密。以 QPSK 為基礎，結合量子密鑰進行 16-PSK 和 16-QAM 調變，達到訊號的擴散映射效果。

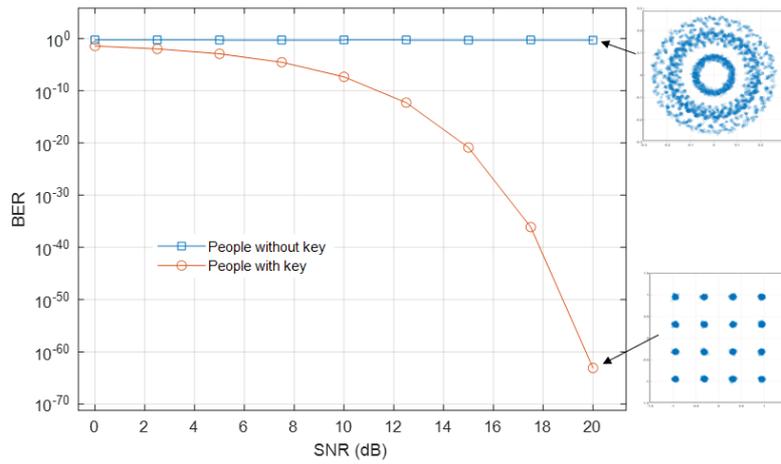


圖 3、16-QAM，偵測通道的 SNR（信噪比）和 BER（誤碼率）之間的關係

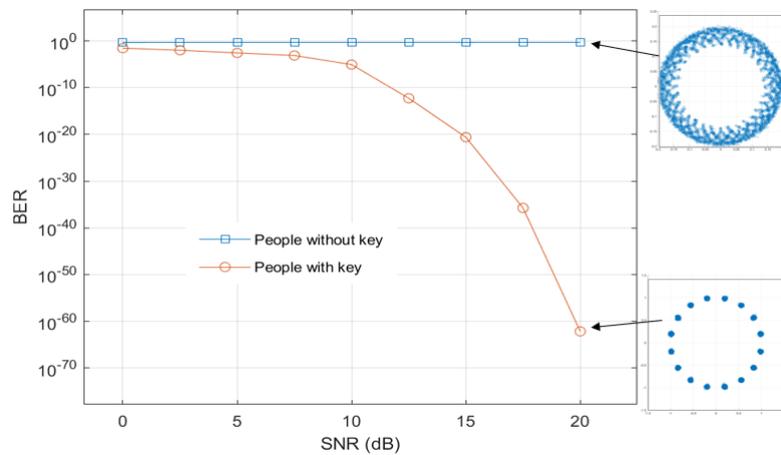


圖 4、16-PSK，偵測通道的 SNR（信噪比）和 BER（誤碼率）之間的關係

實驗成果的進一步分析顯示，擁有密鑰的合法用戶能夠成功解密加入量子噪聲的信號，而沒有密鑰的攔截者則無法還原原始訊號，顯示出量子噪聲在保護太赫茲無線通訊中安全方面的優異效果。在有攔截訊息的情況下，無密鑰的違規者其位元誤碼率達到 0.5，表示解密結果完全隨機，無法獲取並解調出任何有用訊息。

而在 16-QAM 與 16-PSK 的加密比較中，從 SNR(Signal to Noise Ratio) : 0 ~10 dB 的這個階段可以看出 16-QAM 略佔優勢，這是因為 16-QAM 可以充分利用信號空間，來達到更佳的抗干擾能力，使其在相同的信噪比 (SNR) 條件下，誤碼率 (BER) 較低。此外，當 SNR 達到 12.5 dB 時，整個太赫茲通訊系統的 BER 可達到  $10^{-10}$  以下，表現出極高的可靠性。

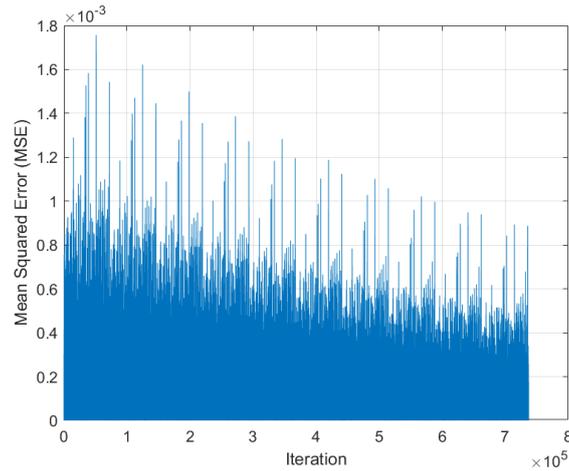


圖 5、MSE 隨著迭代次數的增加而減少

而在解決非線性失真的部分，從圖 5 中可以看出，MSE (Mean Square Error) 會隨著迭代的次數下降，說明 Volterra 等化器經過迭帶來補償訊號傳輸的失真。圖 5 是透過 30% ~ 50% 原本的數據做為訓練，用以補償傳輸過程中的訊號失真，並且經過對平方項，交叉項的調整，在 16-QAM 的調變方式下，可以將位元錯誤率 (BER) 再降低將近 30%；另外，根據不同的通訊系統架設，可能會造成不同的通道響應，因此可以透過調整迭帶次數、Step size (訓練步長) 以及 Tap delay (抽頭延遲) 項目的數量，來獲得此系統使用 Volterra 等化器的最佳位元錯誤率。

## 5. Conclusion

我們從此模擬以及實驗後的結果驗證了量子噪聲在 OFDM 太赫茲通訊系統中的出色加密效果，並說明即便在不同的調變情形下，量子噪聲與 Volterra 等化器的結合可維持高穩定性和高安全性，低錯誤率的表現可為未來的太赫茲加密通訊傳輸提供了可靠的基礎技術。

## 6. Review and reflections

在此約 9 個月的實作專題的學習過程中，我們三個共同成功模擬及實驗出使用量子噪聲與 Volterra 等化器應用於正交分頻多工系統中解決太赫茲通訊中的安全性問題。量子噪聲技術通過增加傳輸信號的隨機性，顯著提升系統的抗竊聽能力，有效防止在傳輸過程中數據洩露的風險。另一方面，Volterra 等化器克服了 6G 通訊中的非線性失真問題，提升信號接收的精確度與穩定性，顯著降低誤碼率。

我們在製作專題的過程中，學會了如何找尋並篩選合適的文獻、軟硬體的架設與操作，也提升了對於光纖通訊及通訊系統的實際應用。透過此次的研究，也了解到太赫茲通訊在未來 6G 通訊中扮演非常重要的角色，我們在

此次專題中也針對通訊安全性上的問題有了成果，模擬及實驗的操作都讓我們對於太赫茲通訊系統有了全面的認識。最重要的是在此次專題中，團隊合作扮演了很重要的角色，透過分工、討論、修改及分析，才能讓我們建立的系統能夠順利的進行。未來，希望有機會可以在此系統中導入單光子源收發技術，以實現更高效且更安全的量子通訊，並為 6G 太赫茲通訊奠定一個重要的里程碑。

## 7. Reference

- [1] Nan Feng et al 2023 J. Phys.: Conf. Ser. 2440 012013
- [2] Shao Yu Lu, “Reduced Complexity of Volterra Equalizer in Long Reach PON system employing LASSO and QR decomposition,” National Chiao Tung University (2017).
- [3] L. Zhang et al., "Quantum Noise Secured Terahertz Communications," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 29, no. 5: Terahertz Photonics, pp. 1-10, Sept.-Oct. 2023, Art no. 8400110
- [4] K. Tanizawa and F. Futami, “Ultra-long-haul digital coherent PSK Y-00 quantum stream cipher transmission system,” Opt. Exp., vol. 29, no. 7, pp. 10451–10464, 2021.
- [5] Masataka Nakazawa, “QAM quantum stream cipher using digital coherent optical transmission”, Optics Express Vol. 22, Issue 4, pp. 4098-4107 (2014)
- [6] Raymond Moberly, “Multi-Qubit Size-Hopping Deutsch-Jozsa Algorithm with Qubit Reordering for Secure Quantum Key Distribution”, in: 2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), 17-22 October 2021
- [7] Eric Corndorf, “Quantum-noise randomized data encryption for wavelength-division-multiplexed fiber-optic networks”, Phys. Rev. A 71, 062326 – Published 21 June 2005