

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Dynamic Index Pilots for Enhanced  
Efficiency and Channel Estimation in  
OFDM-IM

用於增強效率與通道估計的動態領航  
員訊號在 OFDM 索引調變中的應用

專題領域：通訊領域

組 別：B483

指導教授：馮開明 教授

組員姓名：陳霏、張綺真

研究期間：113 年 2 月 20 日至 113 年 11 月 30 日止，共 9 個月

## 摘要

隨著行動通訊技術的迅速發展，毫米波(Millimeter Wave, MMW)已成為5G 通訊中關鍵的一環。然而，由於 MMW 的傳輸距離較短，需佈建大量小型基地台以克服其限制。而正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是5G 通訊系統的核心技術之一，特別是在綠能通訊與物聯網(Internet of Things, IoT)的推動下，低功耗通訊技術的需求日益增加。同時，索引調變(Index Modulation, IM)因其能有效降低功率消耗，成為應對此需求的優良選擇，然而，傳統 IM 技術在頻譜效益上與表現上存在許多挑戰。

本專題從一般 OFDM 系統著手，針對不同訊噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)下 OFDM 系統的誤差向量幅度(Error Vector Magnitude, EVM)與位元錯誤率(Bit Error Rate, BER)進行比較與分析。接著，延伸至傳統的 OFDM-IM 機制，探討不同子載波配置策略對訊號效能與頻譜效益的影響。最後，基於實驗室楊允璿學長提出的動態索引領航員訊號配置方法，我們利用 OFDM-IM 機制，將原本關閉的子載波替換為具適當功率大小的領航員訊號，並透過 Matlab 軟體進行模擬，根據不同通道條件找出最佳功率比或峰值比，以實現系統效能最佳化。此方法相比傳統的領航員配置方式(如 block 型、comb 型、lattice 型等)，不僅在不同通道條件下提升了通道估計效能，還能顯著增進頻譜效益，使 IM 技術得以進一步支援更高傳輸容量的16-QAM 調變，從而大幅提升系統的靈活性。

# 1. 研究背景與動機

第五代行動通訊系統 (5G) 是 4G 通訊的進一步發展與升級，毫米波 (MMW) 頻段的應用使通訊技術進一步提升。為克服毫米波傳輸距離短的問題，5G 通訊引入了波束成型技術與 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術來提升通訊效能和品質。然而由於毫米波的物理特性，需要大量部署小型基地台。為提升容量，非正交多重存取 (NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access) 技術被廣泛採用。而在低功耗需求驅動下，索引調變 (IM, Index Modulation) 技術通過控制子載波的開啟與關閉，降低功耗並提高效率。

本專題透過重現「透過利用索引調變於正交分頻多工機制的動態索引領航員訊號協助增強通道估計性能並提升頻譜效益」(楊允璿, 2023) 的架構，從一般的 OFDM 系統開始，分析其在不同訊噪比 (SNR) 條件下的位元錯誤率 (BER) 和誤差向量幅度 (EVM)。接著，針對 OFDM-IM 技術，探討不同子載波配置策略對系統效能和頻譜效率的影響，並採用動態索引領航員訊號配置方法，利用 MATLAB 模擬，測試此方法在多種通道條件下的表現，找出最佳功率分配比和領航員訊號配置方案。通過替換原本關閉的子載波為具適當功率的領航員訊號，進一步優化通道估計效能和頻譜效率。

## 2. 研究方法

### 2-1. 正交分頻多工 (OFDM)

正交分頻多工 (OFDM) 是一種將高速數據分割成多個低速數據流，並利用正交子載波進行傳輸的多載波調變技術。它可以有效克服無線通道中的頻率選擇性衰減，提升頻譜效率，並透過循環前綴 (CP) 抵抗多路徑干擾。在發送端，數據經序列轉並列處理後，分配到不同子載波進行調變 (如 QPSK 或 16-QAM)，再通過反快速傅立葉轉換 (IFFT) 將頻域信號轉為時域信號，並添加 CP 抵抗干擾。最後，信號經過升頻處理進行無線傳輸。接收端則透過降頻和類比數位轉換，移除 CP，並使用快速傅立葉轉換 (FFT) 將時域信號轉為頻域信號。接收端利用插入的領航員信號進行通道估計和等化處理，還原數據。OFDM 的正交性使子載波可頻譜重疊而不互相干擾，進一步提高頻譜利用率，並簡化等化器設計。這些特性讓 OFDM 成為現代無線通訊的核心技術。

EVM (Error Vector Magnitude) 量化了實際接收訊號與理想參考訊號之間的差異，是一個用來衡量數位通訊系統中調變信號品質的指標。EVM 通常以百分比或分貝 (dB) 表示，EVM 越小，表示接收信號越接近理想參考訊號，通訊品質越好。EVM 的計算公式如下，其中， $E_i$  是第  $i$  個符號的誤差向量，表示實際接收信號與理想信號之間的差異； $S_i$  是理想信號的幅度； $N$  是符號總數：

$$EVM = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N |E_i|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |S_i|^2}} \times 100\%$$

BER (Bit Error Rate) 則是衡量數據通信中錯誤位元數量的指標，代表每單位傳輸的位元數中發生錯誤的位元數比例。BER 越低，代表通信的正確率越高，可靠性也就越高。EVM 和 BER 之間的數學關係可以用以下公式來描述，其中 M 是系統的調變階數：

$$BER = F \cdot \frac{(1 - M^{-1/2})}{\frac{1}{2} \log_2 M} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3/2}{(M-1) EVM_{rms}^2}} \right]$$

其中：

$$F = 1 + \frac{\log_2(M)}{2(\sqrt{M}-1)}$$

透過此公式可看出 EVM 決定了系統的位元錯誤率，即當 EVM 增大時，位元錯誤率會相應增加。接著，我們透過 Matlab 模擬 OFDM 系統中 BER 對應 SNR 的表現。在我們使用的 Matlab 程式指令中，有兩種求得 BER 的方式。一種是利用上述公式 (by EVM)，而另一種則是直接累計總單位傳輸位元數與錯誤位元數(counting bits)，再去進行相除。

## 2-2. OFDM-IM 系統

在 OFDM-IM (OFDM index modulation) 系統中，子載波可以被選擇性地部分開啟，當這些子載波被開啟時，系統不僅透過開啟的子載波來傳遞資訊，也會透過子載波的開啟、關閉「狀態本身」來攜帶額外的訊息。因此，這種方法融合了 OFDM 的抗多路徑衰減能力與索引調變的優勢，也提升了系統的數據傳輸速率。以下將介紹本專題中所使用的索引查找表機制。

查找表機制本質上是一種預先設定的映射關係，將輸入位元串流映射到特定的子載波開關組合，實現資料的編碼和解碼。基於組合數學原理，查找表中列出了所有可能的子載波開關組合，並為每個組合分配一個獨特的索引值。以 N4K3 (N=4, K=3) 為例，表示在四個子載波中開啟三個。這樣的組合共有  $C_3^4 = 4$  種，正好對應於兩個索引位元 ( $\lceil \log_2 C_3^4 \rceil = 2$  bits) 所能表示的排列組合數量 ( $2^2=4$ )。因此，N4K3 的查找表可以清晰地定義每個兩位元索引值對應的子載波開關狀態。

在 OFDM-IM 系統中，BER 性能會受到索引值 K 的影響。根據此專題的模擬結果 (Fig. 2-2-1)，在固定 N=4 的情況下，隨著每組內開啟的子載波數量 K 的增加，BER 性能會逐漸下降。這是由於當 K 值較大時，被開啟的子載波總數增加，因此接收端需要更精確地判斷子載波的開關狀態以正確解碼索引位元，進而導致 BER 變大。然而，當 K 值較小時，可傳送的訊息較少，接收端判斷索引的複雜度下降，使得 BER 的表

現提升，但是同時由於關閉的子載波數量變多，會降低系統的頻譜使用效率。因此，設計者需要在 BER 性能和頻譜效率之間找到平衡，選擇合適的 K 值以達到最佳的系統性能。

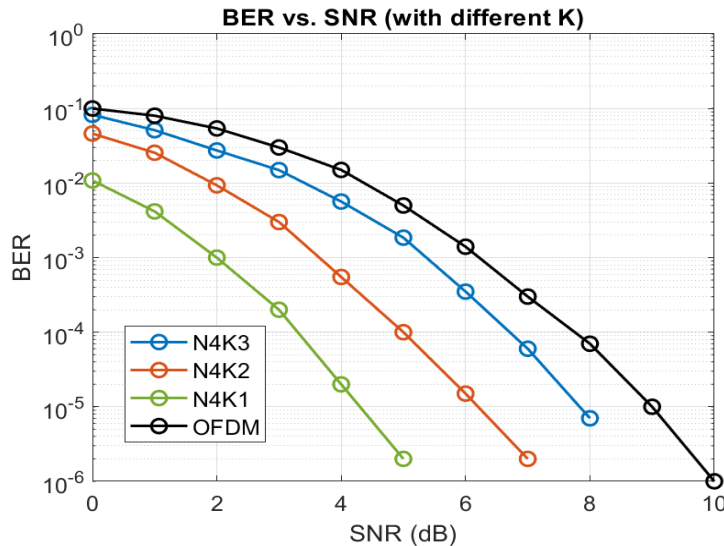


Fig. 2-2-1 OFDM-IM 系統中不同 K 值下 BER 對應 SNR 的表

在傳統的 OFDM-IM 系統中，子載波的開啟與關閉組合會用來傳輸額外的索引資訊，然而這些關閉 (功率=0) 的子載波無法承載任何資料，從而降低了頻譜利用效率。為了解決這一問題，我們參考楊允璿學長的想法生成動態領航員訊號[1]。其生成方式與傳統 OFDM-IM 系統類似，同樣將子載波分組並使用查找表決定個別子載波的功率狀態。不同之處在於，未開啟的子載波不再完全關閉，而是被賦予適當功率的領航員訊號。舉例來說，在 N4K3 的組合中，當某一子載波未被選中用於資料傳輸時，它會被設定為發送領航員訊號，而不是像傳統 OFDM-IM 系統那樣完全關閉 (詳細可參考圖三)。這樣的動態機制增加了頻譜的利用率，即使子載波未開啟數據傳輸，也可以透過功率不為 0 的領航員訊號幫助接收端進行正確的索引判斷。

然而，調變階數等於常見的 16-QAM 或 4-QAM 情形下，領航員訊號的功率過大或過小都可能導致系統性能下降。如果對應星座圖進行分析，領航員訊號功率過大，會使星座圖中領航員訊號和實際資料 (被開啟的子載波) 的星座點之間的距離過近，在訊雜比 (SNR) 較低的情況下，容易產生干擾，降低通道估計的準確性，並導致位元錯誤率上升。相反地，若領航員訊號功率過小，則會使星座圖中領航員訊號與實際資料的星座點差異過大，這也會使接收端難以正確辨識，從而導致估計不準確。

### 3. 研究結果

我們分別在可加性高斯白雜訊通道(Additive white Gaussian noise, AWGN)、時變通道(Time-varying channel)、雷利衰落通道(Rayleigh Fading channel)及時變且頻率選擇性

衰減通道(Time-varying and Frequency-selective fading channel)分析所有可能的領航員訊號星座點，並找出位元錯誤率表現最佳的星座點，以及其對應的功率比即為最佳功率比。下圖為4QAM時不同 SNR 與功率比的情況下，在 AWGN 通道時 BER 的表現，可以看出每條曲線的最低點對應到的即為 BER 表現最佳的領航員星座點位置。以 SNR=5 的情況為例，當領航員訊號星座點位置在  $\pm 0.2 \pm 0.2i$  時有最佳的 BER 表現，此時功率的 peak ratio = 25 : 1。

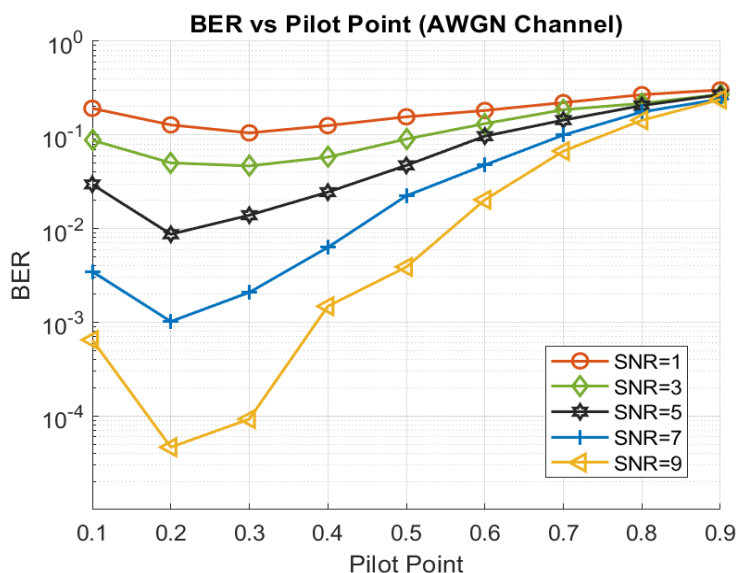


Fig. 3-1 不同 SNR 之下星座點位置對應 BER 之分析

最後，我們根據 Table3-1 參數表，在上表四種通道條件下，比較傳統 OFDM、OFDM-IM 與 OFDM-IM-pilot (領航員訊號)的位元錯誤率表現，模擬結果如下：

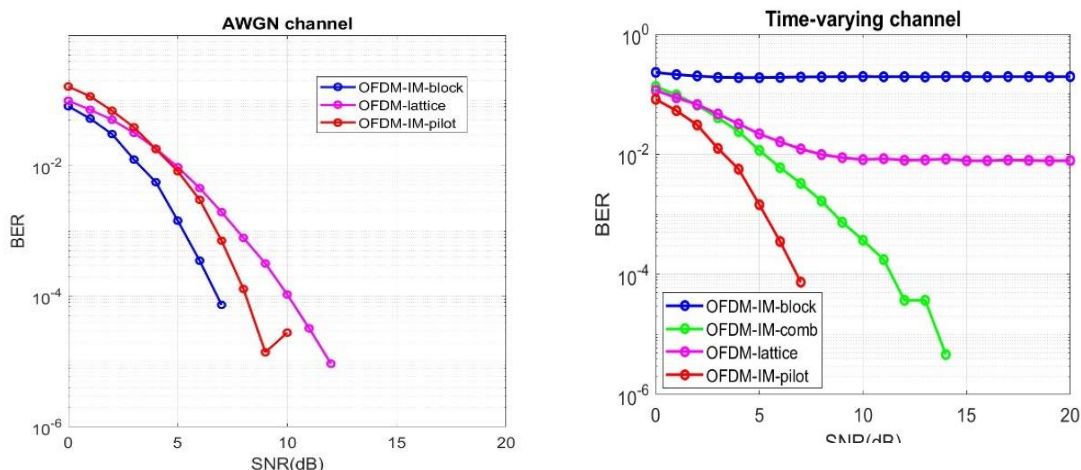


Fig.3-2, Fig.3-3 AWGN channel 與 Time-varying channel 下位元錯誤率模擬結果(4QAM)

我們可以看到在 Fig.3-2 中，AWGN channel 下 4QAM 時表現最佳為 block 型，其次才為 pilot 型。這是因為進行 dynamic index pilot 施加動態的 pilot 於關閉的子載波上相

比傳統的 N4K3 型會多耗功率，因此導致 performance 變差。而在 Fig.3-3 Time-varying channel 之下，相較於 block 型、和 lattice 型，comb 型的領航員配置訊號方式較能適應時變的通道響應，因此三者當中 comb 型表現較佳。但將 comb 型與 OFDM-IM-pilot 相比，由於領航員訊號和傳輸訊號分離的較清楚且不互相干擾，且 dynamic index pilot 形式的 pilot signal 密度較高，因此表現較佳。

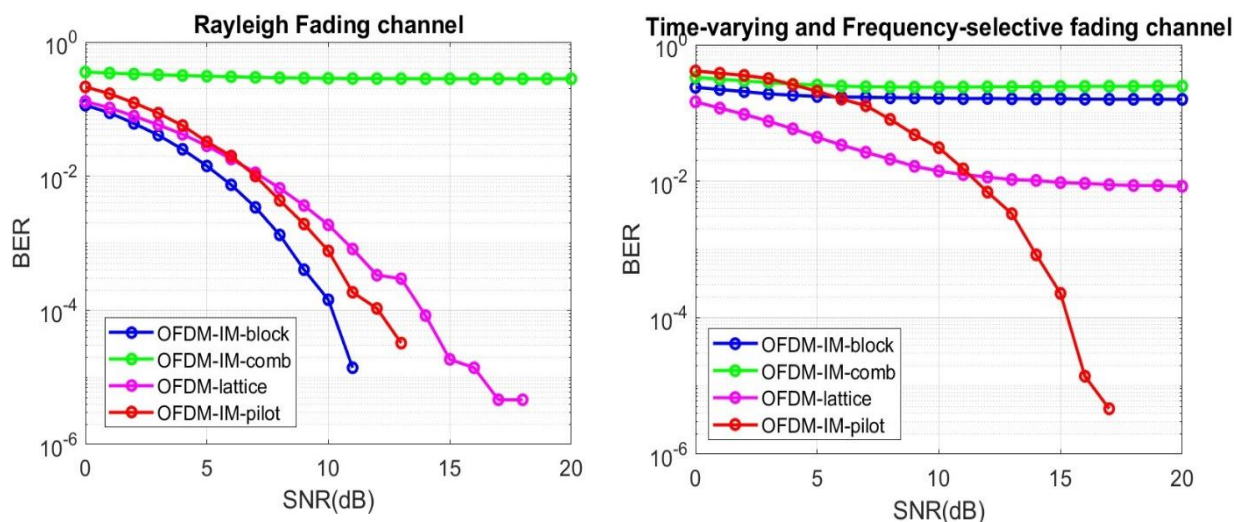


Fig.3-4, Fig.3-5 Rayleigh Fading channel 與 Time-varying and Frequency-selective channel 下位元錯誤率模擬結果(4QAM)

由 Fig.3-4 可看到在 Rayleigh-Fading channel 中，block 型、lattice 型與 dynamic index pilot 型的結果趨勢相似。由於 block 型和 dynamic pilot 型相比，block 型因為並不需額外消耗 pilot signal 的功率，因此表現略佳於 OFDM-IM-pilot 型。而 block 型和 lattice 型相比，因為通道沒有快速的時域改變，因此使用 lattice type 沒有相對的優勢，表現結果當 SNR 越高時 block 型就會略優於 lattice 型。

而由 Fig.3-5 則能發現，在 Time-varying and Frequency-selective fading channel 中，傳統的索引調變 block 型和 comb 型無法面對時域和頻域如此變化的通道，因此表現非常不理想。而 lattice 型因為能將 pilot 分散放置於時間軸和頻率軸上，因此相對前兩者表現較佳。而 OFDM-IM-pilot 當 SNR 較小時傳輸訊號和領航員訊號會互相干擾而導致 BER 表現較差。但當 SNR 夠高時，因 pilot 的密度較其他傳統的 OFDM 模式高，因此會有最佳的表現。

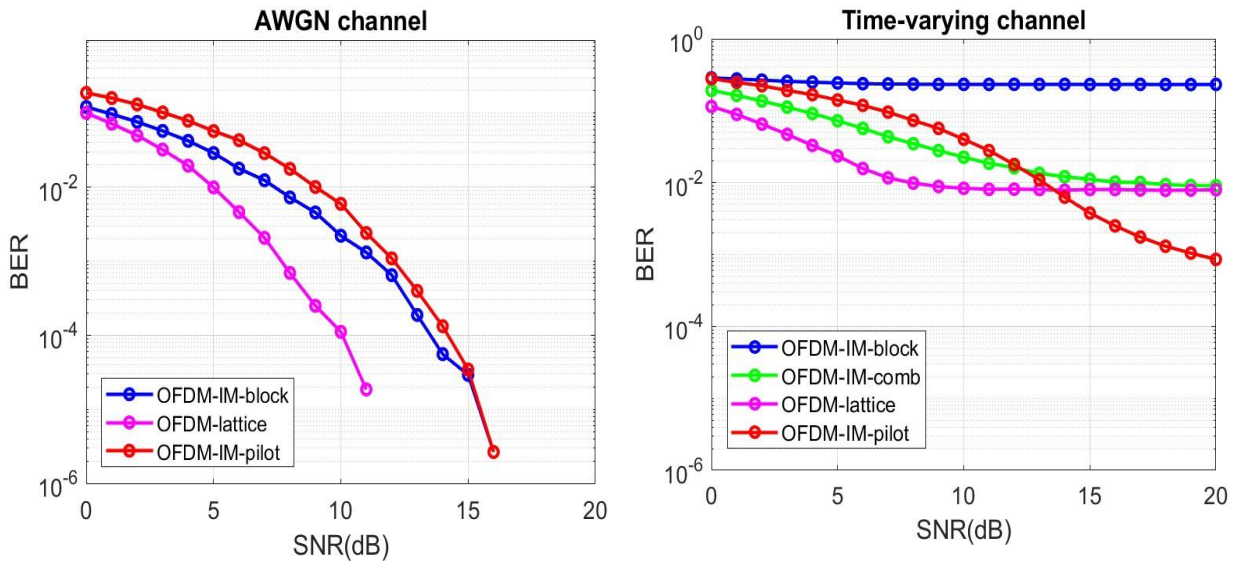


Fig.3-6, Fig.3-7 AWGN channel 與 Time-varying channel 下位元錯誤率模擬結果(16QAM)

Fig.3-6 為 AWGN 通道下 16QAM 的模擬結果。可發現 Comb 型表現最差，BER 幾乎不隨 SNR 改變。這是由於 comb 型設計對某些 SNR 範圍不敏感，或其抗干擾能力不足，導致性能無法隨著 SNR 提升而改善。而 Lattice 型在高 SNR 區域迅速優化，呈現最佳的 BER 表現，這可能是由於 lattice 分散地將 pilot 放置於時間和頻率軸上，能更適應同時在頻率上和時域上衰減的通道。OFDM-IM-pilot 該方法在低 SNR 時性能較差，但隨著 SNR 增加，BER 有較好的改善，接近 block 的表現，因此 Pilot 的引入可能提高了通道估計精準度。

在 Fig.3-7 中，block 型的領航員配置無法應付時變的通道形式，因此 BER 表現極差。而在低 SNR 時，comb 型和 lattice 型都將部分的 pilot 插在時域軸上，因此當通道隨時間改變時，能有適當的模擬表現，BER 將隨 SNR 下降。而關於 dynamic index pilot OFDM-IM，低 SNR 時 pilot 訊號會因為噪聲不易判讀，但當 SNR 提高時，相較其他型態，有更高的 pilot 密度，因此 BER 表現變佳。

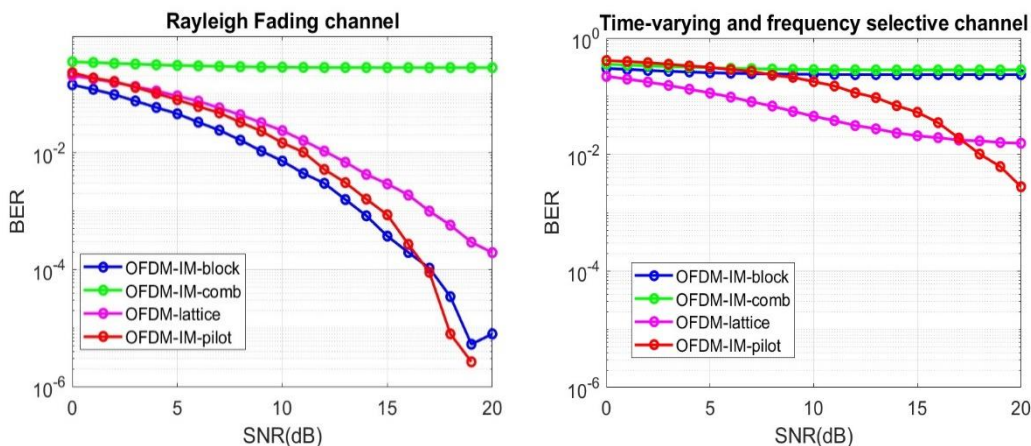


Fig.3-8, Fig.3-9 Rayleigh-Fading channel 與 Time-varying and Frequency-selective fading channel 下位元錯誤率模擬結果(16QAM)

Fig.3-8 為16QAM 下於 Rayleigh Fading channel 的模擬結果。我們可以看到 block 型、lattice 型、dynamic index pilot 型的結果都是 BER 隨 SNR 增大而縮小。我們認為 block 型和 dynamic pilot 型相比，當 SNR 小時，block 型因未額外消耗 pilot signal 的功率，因此表現略佳於 OFDM-IM-pilot 型；而當 SNR 夠大時，OFDM-IM-pilot 中 pilot signal 占比大的優勢就發揮作用，因此表現優於 block 型。而當 block 型和 lattice 型相比，因為通道沒有快速的時域改變，因此使用 lattice type 沒有相對的優勢，表現結 block 型就會略優於 lattice 型。

在 Fig.3-9 中，可以看出 block 型和 comb 型在時變和頻率選擇性衰變通道中沒有太大的優勢，BER 幾乎不隨 SNR 改變。而 lattice 型因為能將 pilot signal 分散放置於時域和頻域上，因此相對前兩者表現較佳。而 OFDM-IM-pilot 當 SNR 較小時傳輸訊號和領航員訊號會互相干擾而導致 BER 表現差。但當 SNR 夠高時，因 pilot 的密度較其他傳統的 OFDM 模式高，因此會有最佳的表現。

Table 3-1 模擬使用參數

Parameter	Value	Parameter	Value
QAM size	4-QAM、16-QAM	Pilot Arrangement	lattice-type、block-type、comb-type
IM Description	N4K3	Symbol Length	180
Bandwidth	0.8GHz	Cyclic Prefix Ratio	0.125
FFT/IFFT size	1024	Intermediate Frequency	3 GHz
Subcarrier used	60	DAC Sampling Rate	12 GS/s
Pilot Ratio	10%	ADC Sampling Rate	80 GS/s

Reference: [1]

## 4. 結論

本研究探討了在不同通道環境下，OFDM-IM-pilot 的位元錯誤率 (BER) 表現，並與傳統的 OFDM-IM 進行比較。雖然在 AWGN 通道中，OFDM-IM-pilot 在 BER 的表現上並無優勢，但在 Time-varying 通道中的 4-QAM 情況下，OFDM-IM-pilot 雖然在低 SNR 時容易受到干擾，但在高 SNR 下的錯誤率表現優於傳統 OFDM-IM (comb type) 格式。而在 Rayleigh Fading 通道中，雖然 OFDM-IM-pilot 相較於 OFDM-IM (block type) 在位元錯誤率的表現上並無優勢，然而，在 Time-varying and Frequency-selective fading 通道下，無論是 4-QAM 或是 16-QAM，OFDM-IM-pilot 在高 SNR 的地方都展現出顯著的低錯誤率優勢，使其在複雜通道中的系統效能最佳。

未來的研究方向可著重於提升 OFDM-IM-pilot 在未取得 BER 優勢的其他通道情況下的表現，並更全面地提升 OFDM-IM-pilot 在其他更複雜的通道情況下的適應性，例如針對高移動性場景中通道快速變化的影響，進行進一步分析與優化。此外，也可以結合機器學習技術，動態調整 Pilot 的分佈與功率分配，根據實際通道狀況自動選擇最合適的功率比與 Pilot 格式。同時，也可探討該技術在大規模 MIMO 系統或更高階調變下的應用潛力，以期能在未來的 5G 或 6G 通訊系統中獲得更有效率及廣泛的應用與推廣。

## 5. 心得感想

在進行這次 5G 毫米波通訊系統的專題研究過程中，我們深刻體會到了理論與實踐結合的重要性，並逐漸在摸索中成長。專題的核心聚焦於提升 OFDM-IM (正交分頻多工索引調變) 系統的頻譜效率與通道估計性能。回顧研究過程，我們從傳統 OFDM 系統的基本理論入手，分析了其在不同訊噪比 (SNR) 下的效能，進而探索了索引調變技術的優勢與局限。尤其是在利用動態索引領航員訊號提升系統性能的實驗中，我們經歷了反覆的參數調整與模擬驗證，從中學會了如何系統性地解決問題。

整個專題研究耗時十個月，讓我們學會了如何面對實際應用中的不確定性，並大大增加了我們解決問題的能力。非常感謝教授和博班廖夢哲學長撥冗指導，細心回答我們遇到的問題，並在每周討論時分享許多寶貴的知識和意見，使我們的進度得以推展，讓我們在實作專題中受益良多。

## 6. 參考文獻

- [1] Y.-X. Yang, "Enhancing Spectral Efficiency and Improving Channel Estimation Performance by Using Dynamic Index Pilots in an OFDM-IM System," M.S. thesis, Inst. of Commun. Eng., Nat. Tsing Hua Univ., Hsinchu, Taiwan, 2023.