

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究成果摘要

Enhancement of Sparse Code Multiple Access Systems
Performance under Rayleigh Fading Channels Using
Dynamic Thresholds, Convergence Stability Judgment,
and Separable Codebooks

在瑞利衰弱通道下利用動態閾值及收斂穩定性判斷和分離式碼本改善稀疏碼多工存取系統中的表現

專題領域：通訊領域

組 別：B369

指導教授：馮開明 教授

組員姓名：黃莉絨、郭彥竹

研究期間：112 年 2 月 20 日至 112 年 11 月 27 日止，共 9 個月

摘要

近年來，隨著使用網路的用戶數量持續增長，在頻譜資源有限的情況下，過去的多工技術包含分頻多工接取(FDMA)、分時多工接取(TDMA)與分碼多工接取(CDMA)已難以應付如此大量的通訊需求。因此，採用能適應處理巨量資料的技術便是關鍵挑戰之一。本專題旨在研究 5G 毫米波通訊中主要採用的非正交多工接取(NOMA)技術，分別從 Power-Domain NOMA 及 Code-Domain NOMA 探討兩種不同 NOMA 使用的多工技術。在 Power-Domain NOMA，將索引調變(Index-modulation, IM)結合 NOMA(NOMA-IM)[3]，利用索引調變特性提供更有彈性的操作功率比；在 Code-Domain NOMA 則使用稀疏碼多工存取(SCMA)技術，在無允諾上傳的背景實現超可靠低延遲通信(URLLC)。

而在 SCMA 中，進一步探討優化訊息交換演算法(MPA)的性能，考慮到原本 MPA 運算的複雜度，於是透過利用基於動態閾值及收斂穩定性判斷的低複雜度 MPA(DTS-MPA)在此系統中，根據每個用戶當前的通道狀態設定適當的閾值，再考慮滿足此動態閾值的收斂穩定性，並透過預解碼(Pre-Decoding)降低運算複雜度，在位元錯誤率(BER)表現和運算複雜度之間達到更好的權衡。另一種新穎的低複雜度 SCMA 則運用分離式碼本，可以個別對每個資源單位(RU)進行解調，不需要如 MPA 中在函數節點(FN)及變數節點(VN)之間來回溝通才能解調，因此可以大幅降低運算複雜度。

內容

一、背景簡介與研究目的

非正交多工存取(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)在同一個資源單位(Resource unit)上可以疊加不同用戶的訊號，而區分這些用戶的方法可以利用功率，即為 Power-Domain NOMA，或是利用碼字，即為 Code-Domain NOMA。

本次專題主要研究 Code-Domain NOMA 中稀疏碼多工存取(Sparsity Code Multiple Access, SCMA)的多工技術，避免在 Power-Domain NOMA 中對功率比的要求，還可以增加用戶數量。其中用戶偵測常用的訊息交換演算法(Message Passing Algorithm, MPA)的運算複雜度會隨著迭代次數呈非線性成長，為了降低複雜度，參考引用論文[6]中的方法將基於動態閾值及收斂穩定性判斷的低複雜度 MPA(Dynamic Threshold and Convergence Stability Judgment based MPA, DTS-MPA)實現運用在 SCMA 系統中以保持位元錯誤率(Bit Error Rate, BER)表現並大幅降低運算複雜度。

而針對低複雜度的 SCMA，另一種新穎的技術為分離式碼本[9][10]，能夠有效增加星座點之間的最小歐幾里得距離(MED)，而且不受 MPA 運算複雜度的限制，可以個別對每個資源單位(RU)進行解調，因此我們嘗試運用在此系統中，期望在降低運算複雜度的同時也可以提升位元錯誤率(BER)的表現。

二、研究方法

1-1. 稀疏碼多工存取(Sparse Code Multiple Access, SCMA)

稀疏碼多工存取(Sparse Code Multiple Access, SCMA)[4][5]技術被歸類於 Code-domain NOMA 的範疇，透過稀疏展頻的碼本對使用者進行編碼及非正交的疊加，在同樣資源單位(Resource Unit, RU)下可以比 Power-domain NOMA 容納更多的使用者以提升頻譜使用效率，並在接收端使用訊息交換演算法(Message Passing Algorithm, MPA)進行解調，因為其稀疏性，相較於最大似然(Maximum Likelihood, ML)演算法複雜度會更低，同時又能得到接近 ML 演算法的 BER 表現。

SCMA 在發射端將輸入的 2 位元訊號直接映射為多維碼字，再依照資源配置因子圖(Factor Graph, F)將每個使用者的碼字映射到稀疏碼字。

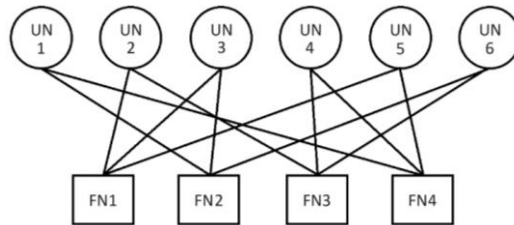


圖 1-1 SCMA Factor Graph[5]

本文是做模擬 SCMA 上行系統，經過調變後各個使用者分別通過不同的通道響應後疊加，由基地台接收到的訊號表示為

$$y = \sum_{j=1}^J \text{diag}(\mathbf{h}_j) \mathbf{x}_j + \mathbf{n}$$

其中 \mathbf{x}_j 為第 j 使用者的碼字， \mathbf{h}_j 表示第 j 使用者通過的通道響應， \mathbf{n} 表示 zero mean 的 AWGN。

1-2. 訊息交換演算法(Message Passing Algorithm, MPA)

MPA 是由最大事後機率(Maximum a Posteriori, MAP)演算法發展而來，主要分成三個步驟如下圖，(a)部分計算每個使用者在不同子載波上的條件機率，(b)和(c)區塊是在函數節點(Function Node, FN)及變數節點(Variable Node, VN)之間不斷迭代進行訊息的交換與更新，把前一次迭代的事後機率當成下次迭代的事前機率再次進行更新，(d)部分則是綜合各個頻率上訊號的機率並透過對數似然比檢驗(Log Likelihood Ratio, LLR)來判斷每個位元機率的大小，就可以得到使用 MPA 的 SCMA 解調結果。

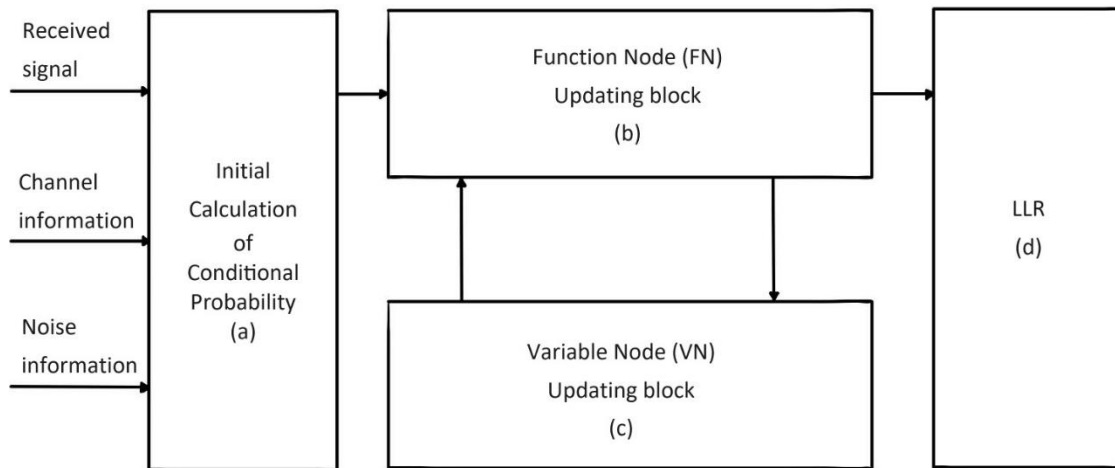


圖 1-2 MPA 流程示意圖[5]

1-3. 低複雜度訊息交換演算法(Low Complexity MPA)

為了能在提升 SCMA 系統的 BER 表現的同時降低運算複雜度，引用的論文中提出了一種基於動態閾值和穩定性判斷的低複雜度 MPA (Low Complexity MPA based on Dynamic Threshold and Stability Judgment, DTS-MPA)方案[6]。DTS-MPA 可充分利用通道狀態訊息與解碼表現之間的關係來設置動態閾值並對 VN 進行預解碼(Pre-decoding)，藉由減少連接到 factor graph 的每個 FN 分支數量以顯著降低所需的迭代次數和運算量。

因為 MPA 主要的運算複雜度在 FN 的運算，因此提前解碼部分 VN 後在特定 FN 的運算就會變簡單。如此無論編碼的碼本和星座點如何變化，DTS-MPA 都可以有效降低 MPA 的運算複雜度。

1-4. 低複雜度稀疏碼多工存取(Low Complexity SCMA, LC-SCMA)

在 LC-SCMA 技術中所提出的碼本設計中所有使用者都遵循相同的可分離式碼本結構，此種結構的好處是在解調時可以個別對每個 RU 進行檢測，可以大幅降低複雜度。

考慮一個採用調變次序 4QAM 的 SCMA 系統，可分離式碼本設計如下：

$$CB = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ A & A & -A & -A \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ B & -B & B & -B \end{bmatrix}$$

此 LC-SCMA 碼本每個一維複數碼本只包含兩個不同的一維碼字元素。若一使用者分配到上述碼本，而要傳送的 2 位元訊號為 01，LC-SCMA 會把訊號的 0 和 1 分別傳送到第二根和第四根 RU 上。由於每個 RU 是被三個使用者共享，所以我們就可以透過每個使用者被分配到的唯一碼本在解調端獨立解調每一個 RU 上的訊號，此時每個使用者的碼本可以分為兩個子碼本表示：

$$CB_{S1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A & -A \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad CB_{S2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B & -B \end{bmatrix}$$

每個使用者的一維複數碼本可以用 2 進制的星座圖表示，因此每個一維疊加碼字所有可能值可以用 8 進制的星座圖來表示。

由於星座點之間的最小歐幾里得距離(Minimum Euclidean Distance, MED)在 AWGN 通道中是 BER 性能的一個關鍵指標，因此在這裡選擇了非方型 8QAM(non-square 8QAM, NS-8QAM)星座圖以最大化 MED。

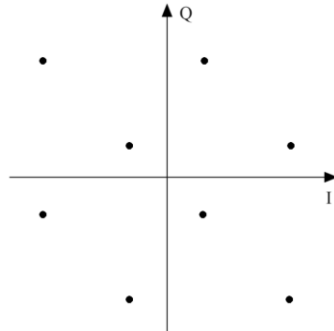


圖 1-3 NS-8QAM 星座圖示意圖[9]

解調時運用平行最大事後機率演算法(Parallel Maximum a Posteriori, P-MAP)檢測器，因為每個子載波上的訊號可以獨立回復，所以只需要將接收到的碼字和 8 種組合進行比對，找到有最小歐幾里得距離即可解調，因此複雜度可顯著降低。

三、研究結果

以下模擬結果皆為 J=6，K=4，使用 Rayleigh fading channel 作為通道：

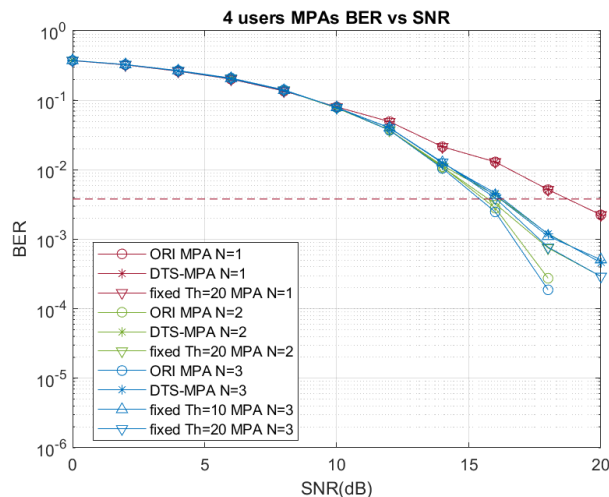


圖 2-1 4 active users 下的 BER 表現

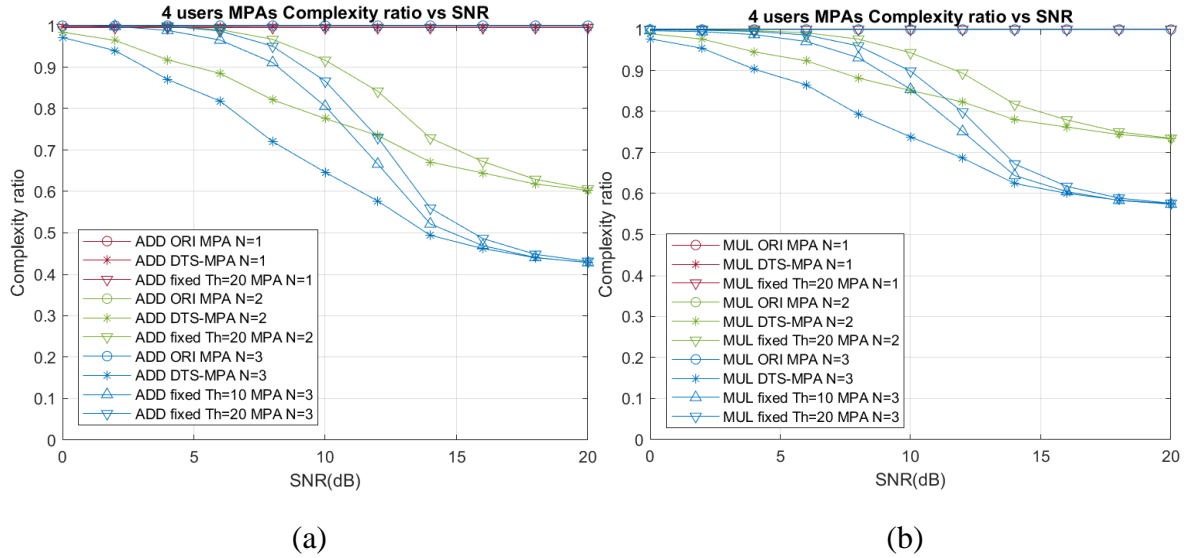


圖 2-2 4 active users 下的(a)加法 (b)乘法 運算複雜度比

圖 2-1 顯示 TB-MPA、DTS-MPA 和 Ori-MPA 在各個 SNR 下的 BER 表現，N 為 MPA 迭代次數，可以看出雖然 TB-MPA 及 DTS-MPA 略比 Ori-MPA 表現差一點，但在通過 FEC(Forward Error Correction, BER=3*10⁻³)時的表現差不多。而在圖 2-2 可以分別看到加法和乘法數在使用 TB-MPA 及 DTS-MPA 時皆有明顯下降，尤其使用 DTS-MPA 時下降較多，因此 DTS-MPA 可以在維持 BER 表現的同時花費更少的時間進行解調。

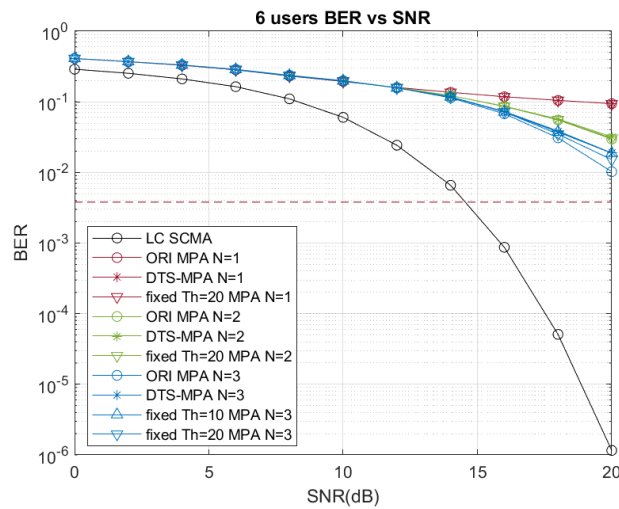


圖 2-3 6 active users 下的 BER 表現

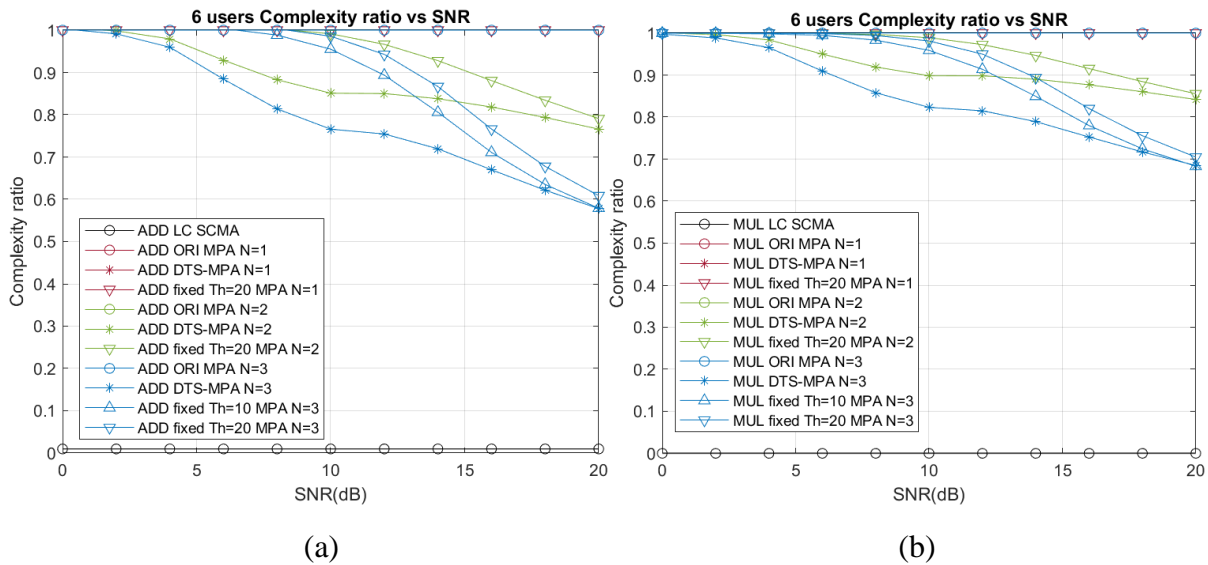


圖 2-4 6 active users 下的(a)加法 (b)乘法 運算複雜度比

圖 2-3 顯示 TB-MPA、DTS-MPA 和 Ori-MPA 以及 LC-SCMA 在各個 SNR 下的 BER 表現，N 為 MPA 迭代次數。可以看出因為 6 個使用者同時傳送訊號，MPA 的表現大幅下降，此時 LC-SCMA 卻可以維持在 SNR=14dB 左右時通過 FEC (Forward Error Correction, BER=3*10⁻³)，可以看出此 LC-SCMA 強大的解調能力。而在圖 2-4 可以分別看到加法和乘法數在使用 TB-MPA 及 DTS-MPA 時也同樣有明顯下降，而 LC-SCMA 更是大幅度減少複雜度，因此此 LC-SCMA 可以在維持 BER 表現的同時花費更少的時間進行解調。

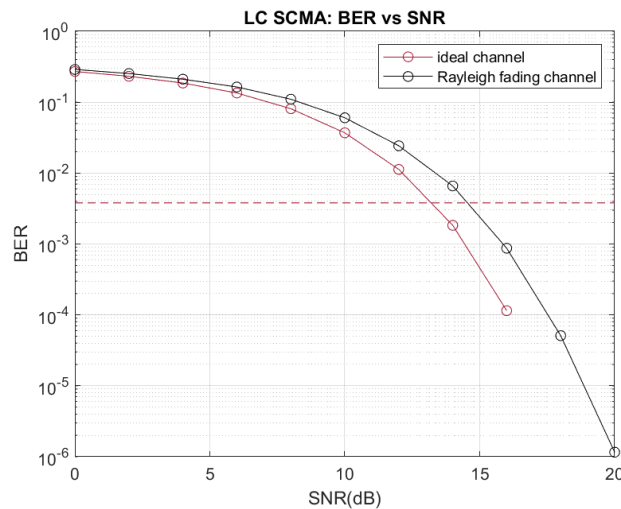


圖 2-1 LC-SCMA 在不同通道下的 BER 表現

圖 2-6 中可以看到 LC-SCMA 在理想的通道下和 Rayleigh fading channel 下的 BER 表現，在使用者通過理想的通道時約在 13dB 達到 FEC，而通過 Rayleigh fading channel 時表現略差，約在 15dB 時達到 FEC。

四、結論

本次研究主要探討了在 NOMA 中 SCMA 技術中的一些關鍵概念和方法，並進行了相應的實驗模擬。在 Code-Domain NOMA 中，專注於稀疏碼多工存取的多工技術，並引入低複雜度的訊息交換演算法(DTS-MPA)來提高解調效能並降低運算複雜度，除此之外也將 SCMA 結合可分離式碼本結構和平行最大事後機率演算法，大幅降低解調複雜度並提升 BER 表現。

模擬結果顯示 DTS-MPA 在維持一定 BER 表現的同時，能夠顯著降低運算複雜度，特別是在多用戶的情況下。而 LC-SCMA 在多用戶情況下表現出色，且與傳統 SCMA 運用 MPA 演算法的結果比較，其解調複雜度顯著降低，同時也能保持更好的 BER 表現。

未來的研究方向可以考慮在更複雜的通道條件下進行模擬實驗，並進一步優化算法以提高多用戶多載波系統的整體性能。

五、心得

經過這兩個學期的實作專題訓練，從一開始對專題方向有所迷茫，尤其在實作專題沒有固定的學習內容及絕對的解答，在這段過程中透過大量閱讀文獻資料，和教授多次討論後確立專題目標，逐漸地也讓我們在摸索中成長。實作中有許多知識及技術是大學課程中從未接觸過的，需要另外花費心力去找到資源，且找到的資源也不一定正確，需藉由各種方法加以篩選出正確資訊，如此開放式學習的思考與探索也讓我們了解到學業不單純只是得高分，更是在探索如何自主學習、並在挫折中成長，不白費所有曾付出的努力，在歷經一番波折後將一切經歷化為未來的養分。非常感謝教授和實驗室碩班學姐撥冗指導，我們遇到的問題都很細心回答，或分享許多知識和寶貴的意見，很高興這一路上能受到如此多的幫助，使我們在實作專題中受益良多。