

## 摘要

極化碼是一種用於訊號傳輸的錯誤更正編解碼技術，透過通道極化的處理，使得一部分的通道容量趨近於1(完美通道)，另一部分通道容量趨近於0(純雜訊通道)，並利用趨近完美通道的部分作為傳輸通道，藉此逼近香農極限。當編碼長度愈長，通道極化的現象會變得愈明顯，所以在編碼長度有限的狀況下，基礎的逐次消除(Successive Cancellation, SC)解碼演算法的性能並不好。SCF(Successive Cancellation Flip)解碼演算法的出現，是為了提升極化碼的解碼性能(即降低訊框錯誤率(Frame Error Rate, FER))。SCF解碼透過數次重新進行SC解碼並在過程中翻轉一個錯誤機率高的位元來避免錯誤傳遞。在本次專題中，會介紹SCF解碼演算法並且比較在SCF解碼演算法中使用與未使用深度學習決定翻轉位元的差異。

關鍵字: 第五代行動通訊技術、極化碼解碼、深度學習、通訊演算法

## 通道編碼

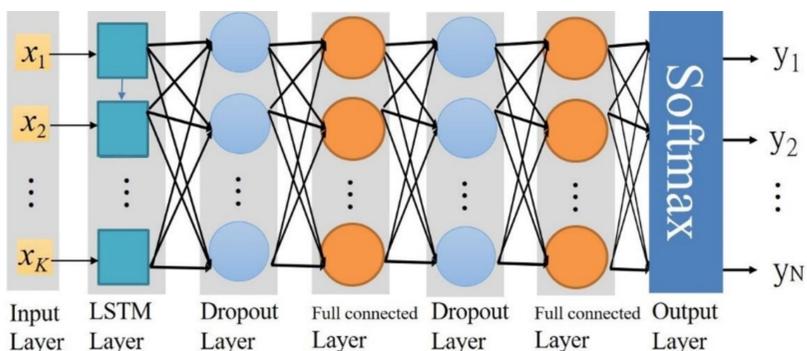
極化碼可以利用 $P(N, K)$ 來表示，其中 $N$ 是碼長， $K$ 是用來傳送資訊的資訊位元數，不用來傳送資訊的 $(N-K)$ 個位元則當作凍結位元(通常會直接設為0)。原始訊息 $\mathbf{u}$ 為一長度為 $N$ 的row vector，經過編碼後得到 $\mathbf{x}$ ，兩者的關係如下：

$$\mathbf{x} = \mathbf{u} \mathbf{G}_N$$

而 $\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N \mathbf{F}^{\otimes n}$ ， $\mathbf{F}^{\otimes n}$ 是極化陣列 $\mathbf{F} = [[1, 0], [1, 1]]$ 的 $n$ 次( $n = \log_2 N$ )克羅內克積， $\mathbf{B}_N$ 是位逆序置換矩陣。

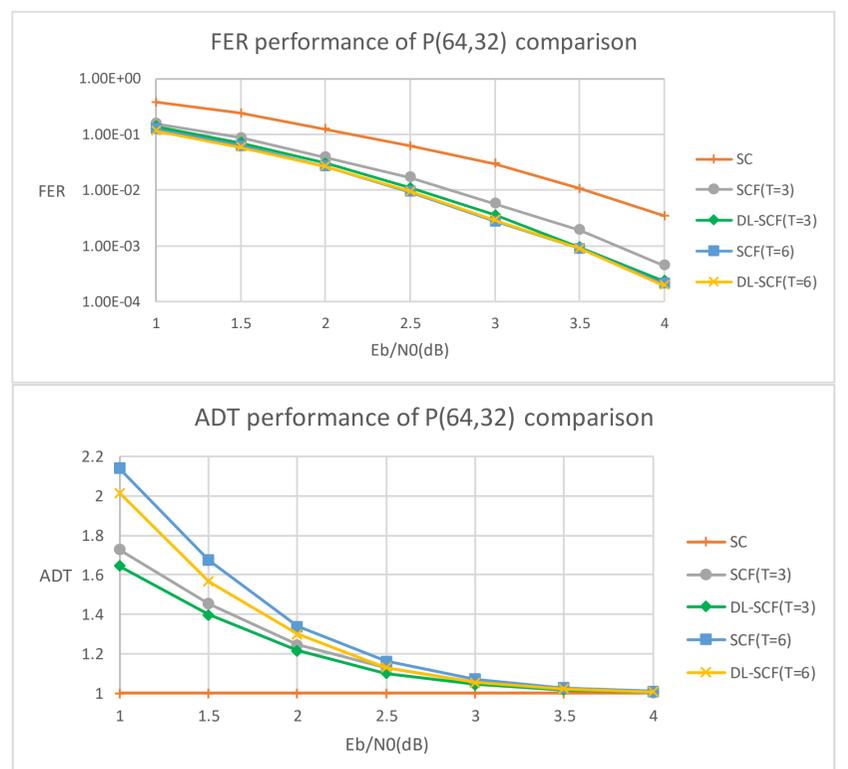
## 通道解碼

使用BPSK調變經過AWGN通道後獲得接收訊號 $\mathbf{y}$ ，再將 $\mathbf{y}$ 透過高斯近似的方式得到接收端各位元的對數似然比(log-likelihood ratio, LLR)。在SC演算法中，接收端各位元的LLR就像樹狀圖的葉節點，而 $\mathbf{u}$ 各個位元的LLR值就像根節點，透過遞迴關係式可以計算得到 $\mathbf{u}$ 各個位元的LLR值。關於解碼判斷，首先會計算 $\mathbf{u}$ 第一個位元的LLR值，並用其結果決定資訊位元該判斷成1還是0(若該位元為凍結位元則直接判斷為0)，接著計算 $\mathbf{u}$ 第二個位元的LLR值...，以此類推。在計算過程中，部分節點的LLR值會被先前解出位元的判斷結果所決定，也就是說，若前面位元解錯就會造成錯誤傳遞。當資訊位元的LLR絕對值很小時，代表有很高的機率會發生判斷錯誤，SCF演算法就是基於這樣的特性，若首次SC解碼錯誤，會將資訊位元中LLR絕對值前 $T$ 小的索引(index)從小到大組成翻轉索引集合，之後將SC解碼重解 $T$ 次，每次重解依集合翻轉(01互換)該個索引的解碼結果再繼續解碼下去，藉此降低FER。除上述決定翻轉索引集合的方法外，也可透過以LSTM為核心的神經網路決定，其模型架構如下圖所示。在本專題中將利用深度學習的神經網路決定翻轉索引集合並以該集合執行後續SCF解碼的方法稱作DL-SCF演算法。



## 實驗過程與實驗結果

利用神經網路(其架構為左下圖)預測具有很高的機率會解碼錯誤的位元索引，其optimizer為adam，loss function為categorical\_crossentropy。當輸入 $\mathbf{x}$ ，softmax會生成各位元具有很高機率會解錯的機率 $\mathbf{y}$ ，接著選出 $\mathbf{y}$ 中數值前 $T$ 大的索引從大到小組成翻轉索引集合來執行接下來的SCF解碼。每次實驗開始會隨機生成24位元傳送資料並生成8位元CRC檢查碼一起當作資訊位元。若首次SC解碼沒有通過CRC檢查(代表解碼錯誤)，則將LLR絕對值與進行CRC檢查後取得的徵狀值當作神經網路的輸入，再由輸出得到翻轉索引集合，進行接下來的SCF解碼。在低SNR時跑上千個、在高SNR時跑上百個錯誤訊框得到實驗結果，看出當 $T=3$ , DL-SCF( $T=3$ )和SCF( $T=3$ )相比有較低的訊框錯誤率(FER)，而且在平均解碼次數(Average decoding time, ADT)的部分DL-SCF( $T=3$ )也比SCF( $T=3$ )還要少；當 $T=6$ , DL-SCF( $T=6$ )和SCF( $T=6$ )有著極為相近的FER，但是在ADT的部分DL-SCF( $T=6$ )比SCF( $T=6$ )還要少。



## 結論

使用深度學習決定翻轉索引集合的SCF解碼演算法在不同的 $T$ 下存在不同表現，當 $T=3$ ，其FER, ADT都能得到改善；當 $T=6$ ，因為SCF( $T=6$ )已涵蓋絕大多數翻一個位元就能解碼正確的情況，所以此時使用深度學習並不能改善FER，而是能透過更精確地決定翻轉索引集合中的元素順序來減少ADT。