

SIMO SC-FDMA 上鏈傳接機之分集合併處理研究

馬杰*^a、呂昀叡^a、王郁婷^a
元智大學通訊工程學系^a

摘要—本文採用長期演進 (Long Term Evolution, LTE)標準，模擬單載波分頻多工接取 (Single-carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA)信號在瑞利(Rayleigh)衰減通道環境中進行上鏈傳接機之選擇合併法 (Selection Combining, SC)、等增益合併法 (Equal Gain Combining, EGC)、最大比率合併法 (Maximal Ratio Combining, MRC)之性能比較。

一、簡介

長期演進(Long Term Evolution, LTE)[1]是由國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)認證之組織3GPP(Third Generation Partnership Project)所提出的第四代行動通訊系統，此系統保留舊有的GSM/EDGE和UMTS/HSPA網路技術，並大幅提升網路容量及速度。該標準由3GPP於2008年於Release 8版本中首次提出，並在Release 9版本中進行少許改良，隨著無線通訊技術的演進，為了提升網路之容量、頻譜效率與服務品質，LTE 逐漸晉升為未來行動無線寬頻技術的新趨勢 [1]。

單載波分頻多工接取 (Single-carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA)為LTE上鏈之技術，相較下鏈之OFDMA處理過程多了一個離散傅立葉轉換 (Discrete Fourier Transform, DFT)且有較低的峰值對均值功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)，以降低傳輸時的失真率，SIMO (Single input Multiple output) [2][3]系統分集合併處理方式主要分成三種：選擇合併法 (Selection Combining, SC);等增益合併法 (Equal Gain Combining, EGC);最大比率合併法 (Maximal Ratio Combining, MRC) [4][5][6]。參考文獻[4]將分集技術應用於SIMO系統，分析比較系統性能；參考文獻[5]中說明分集技術之工作原理；而參考文獻[6]將MRC分集技術應用於SC-FDMA衛星Rician衰減通道，進行其性能分析。

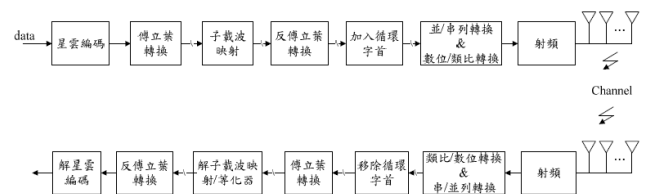
本文應用目前由3GPP提出之LTE規格，模擬SC-FDMA上鏈傳接機在瑞利(Rayleigh)衰減傳輸通道環境中進行選擇合併、等增益合併以及最大比率合併法之性能比較。

二、SC-FDMA 信號

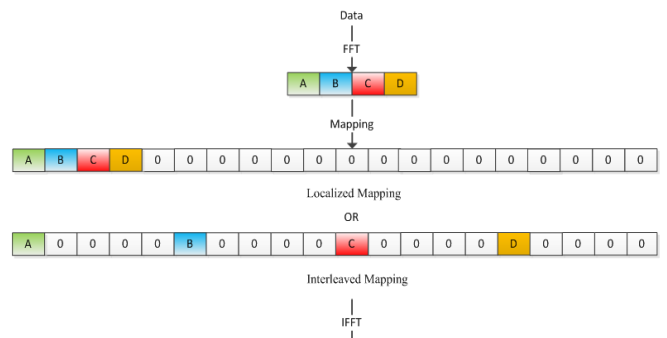
LTE無線通訊系統上鏈傳接機採用單載波分頻多工接取調變信號、DFT 展頻正交分頻多工與頻域等化等技術。如圖一所示，資料經由星雲編碼調變後，進行 N_{FFT} 點的傅立葉轉換，接著進行子載波映射、 M_{FFT} 點反傅立葉轉換、為了建立保護區間而加入的循環字首(Cyclic Prefix, CP)、並/串列轉換器、數位/類比轉換器，並運用

RF 射頻器與天線發送信號。由於OFDMA訊號是由多個調變過的子載波訊號的線性加成而得，因此可能會造成比平均訊號功率高的瞬間尖峰訊號，進而產生高峯值對均值功率比效應，進而造成瞬間功率超過功率放大器之線性區域導致失真，而相較於OFDMA信號，SC-FDMA信號處理過程多了一個離散傅立葉轉換並使用子載波映射法(Subcarrier Mapping)藉以降低PAPR，子載波映射法分別有兩種型態的映射配置方式：區域式子載波映射 (Localized subcarrier mapping)和交織式映射 (Interleaved subcarrier mapping)，區域式子載波映射是將 N_{FFT} 個子載波映射到 M_{FFT} 個子載波並且相鄰的擺放，而交織式子載波映射則是等間距的平均擺放在整個通道頻寬內，如圖二所示。而本文採用Interleaved Mapping子載波映射法。

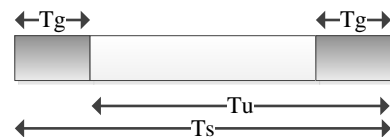
為了避免符碼間的干擾(Inter symbol Interference, ISI)，因此將信號加入保護區間(Guard Interval)，保護區間則是採取循環字首的方法，將信號最後1/4部分複製到信號前做為保護，如圖三所示， T_u 為原始信號長度， T_g 為保護區間長度， T_s 為整個SC-FDMA信號長度。



圖一：SC-FDMA 傳接機方塊圖



圖二：子載波映射法示意圖

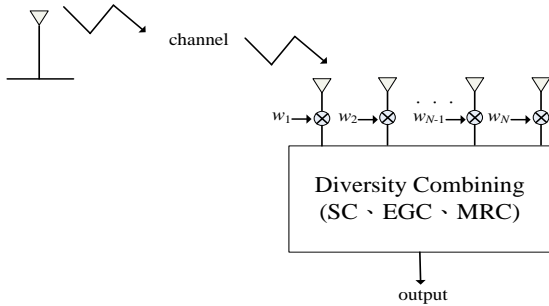


圖三：循環字首示意圖

三、分集合併法

3.1 SIMO 多天線系統

SIMO多天線系統的基本概念是發射端為單一天線，接收端為多天線，上鏈系統選用SIMO 模式目的可減少發射端(User Equipment, UE)硬體成本與空間。本文將使用 1×1 、 1×2 、 1×4 、 1×8 的SIMO天線模組，在分集處理技術中，每根天線會獨立接收信號，再進行分集合併，可提升傳輸速率以及降低錯誤率，並抵抗因多路徑造成的通道衰減，圖四為SC-FDMA上鏈傳接機SIMO天線示意圖，其中 N 為天線數。



圖四：SC-FDMA上鏈傳接機SIMO天線示意圖

3.2 分集合併處理

本小節將介紹三種常見的SIMO SC-FDMA 接收端分集處理合併的方法，包括選擇合併法(SC)、等增益合併法(EGC)和最大比率合併法(MRC)，並對三者性能進行分析比較。

假設單一天線系統模型可以寫成下式：

$$x_n(t) = h_n(t)u(t) + n_n(t) \quad (1)$$

$u(t)$ 為信號功率為 1 瓦之傳送信號， $h_n(t)$ 代表第 n 根(下標)天線之通道， $n_n(t)$ 代表第 n 根天線之雜訊，在第 n 根天線一個符碼週期之信號功率為：

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |h_n(t)|^2 |u(t)|^2 dt \\ &= |h_n(t)|^2 \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} |u(t)|^2 dt \\ &= |h_n(t)|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

假設在可加成性白色高斯雜訊通道環境中， $E\{|n_n(t)|^2\} = \sigma^2$ ，則可以得到在第 n 根天線之瞬時訊雜比為：

$$\gamma_n = \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

假設在瑞利衰減通道(Rayleigh fading channel)環境中，則 $h_n = |h_n|e^{j\angle h_n}$ ， $\angle h_n$ 為在 $[0, 2\pi)$ 之勻分佈(uniform)， $|h_n|$ 為瑞利機率密度函數(Rayleigh pdf)。

則多天線系統模型可以寫成下式：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \mathbf{h}(t)u(t) + \mathbf{n}(t) \\ \mathbf{h} &= [h_0, h_1, \dots, h_{N-1}]^T \\ \mathbf{n} &= [n_0, n_1, \dots, n_{N-1}]^T \\ \mathbf{r}(t) &= \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t) = \mathbf{w}^H \mathbf{h}(t)u(t) + \mathbf{w}^H \mathbf{n}(t) \\ \mathbf{w} &= [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

其中， \mathbf{w} 為補償權重矩陣，上標 T 為轉置，上標 H 為厄米特共軛(Hermitian conjugate)運算，由式(4)可得到 N 根天線之訊雜比 γ 為

$$\gamma = \frac{|w^H h|^2}{E\{|w^H n|^2\}} = \frac{|w^H h|^2}{E\{|w^H n n^H w\}} = \frac{|w^H h|^2}{w^H E\{|n n^H\} w} = \frac{|w^H h|^2}{w^H w \sigma^2} \quad (5)$$

接著將式(5)所求出之訊雜比 γ 和當下訊雜比(Signal to noise ratio, SNR)進行比較，求得性能。

3.2.1 選擇合併法 [2][3]:

選擇合併法是指選取最大的訊雜比 γ_k 之信號來做處理，因此

$$w_k = \begin{cases} 1 & \gamma_k = \max_n \{\gamma_n\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\gamma = \gamma_k \quad (7)$$

其硬體複雜度最為簡單，但效能遜於等增益合併法和最大比率合併法。

3.2.2 等增益合併法 [2][3]:

假設通道之相位變化已知，在接收端針對相位進行補償，則

$$\begin{aligned} w_n &= e^{j\angle h_n} \\ \Rightarrow w_n^* h_n &= |h_n| \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \mathbf{w}^H \mathbf{h} &= \sum_{n=0}^{N-1} |h_n| \\ \gamma &= \frac{\left[\sum_{n=0}^{N-1} |h_n| \right]^2}{N \sigma^2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 h_n 為第 n 根天線之通道，等增益合併效能略遜於最大比率合併，但只需針對接收信號的相位做估測及補償，因此硬體複雜度較為簡單。

3.2.3 最大比率合併法 [2][3][4]:

假設通道特性完全已知，在接收端針對相位以及振幅進行補償，則

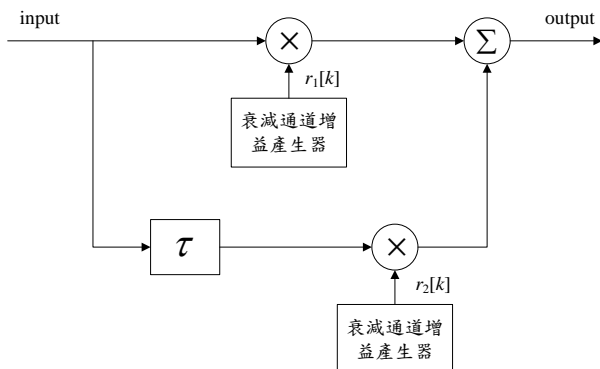
$$\mathbf{w} = \mathbf{h} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{h}|^2}{\sigma^2 \mathbf{h}^H \mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{h}}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n$$

此方式被視為是最佳化的合併方式，但在硬體複雜度最為複雜，較難完全實現。

四、 瑞利(Rayleigh)衰減通道

本文使用瑞利(Rayleigh)通道模型來描述一個無線衰減通道，在無線信號發射後，會因為接收端附近的物體或建築，而產生多條的傳輸路徑，這些信號同時具有時變獨立性(time-varying)的振幅與相位。萊斯 κ 因子(Rician κ -factor)可表示通道中直視訊號與非直視訊號功率的比值，當萊斯 κ 因子為0時，即為非直視訊號(non line of sight, NLOS)，在這些條件下，這些非直視訊號組合後，即可成為一個Rayleigh通道。若萊斯 κ 因子遠大於1時，衰減通道則近似為高斯(Gaussian)分布，可近似為只有直視訊號(line of sight, LOS)成分，這些直視訊號組合後及為萊斯(Rician)通道。本文使用一個兩路無線通道的模型，如圖四所示，並依據表一的兩路無線通道參數來進行SC-FDMA傳接機性能測試。第 i 條路徑之衰減通道增益值 $r_i[k]$ ，即可由非直視訊號與直視訊號所受的衰減效應相加產生。依據表I的兩路萊斯(Rician)以及瑞利(Rayleigh)通道參數來進行系統測試。



圖四：無線衰減通道方塊圖

表 I 參數設定

Path No.	Path power(dB)	Path Delay(μ sec)	Velocity (km/hr)	κ Rician	κ Rayleigh
1	0	0	100	4	0
2	-1.50515	1	100		

五、 模擬

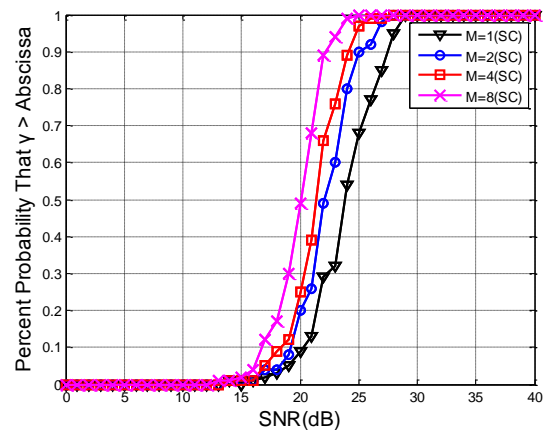
根據由3GPP所提出之LTE標準，採用Matlab軟體模擬SC-FDMA傳接機信號於瑞利(Rayleigh)衰減通道環境中進行選擇合併法(SC)、等增益合併法(EGC)、最大比

率合併法(MRC)，接收機天線數分別為1、2、4、8根，信號模擬參數如表II所示。

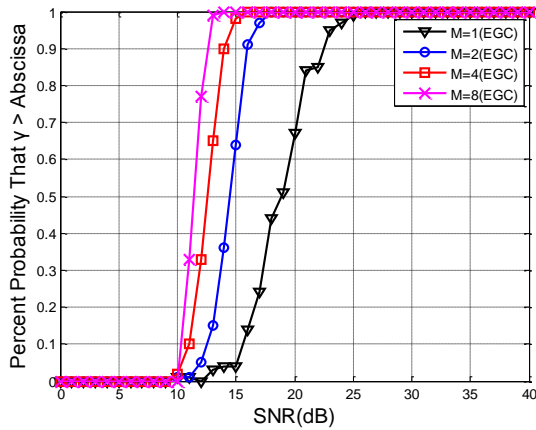
圖五至圖七分別為接收端在不同天線數下，使用選擇合併、等增益合併以及最大比率合併之性能模擬結果。模擬結果顯示無論選擇合併、等增益合併或是最大比率合併，接收端天線數越多性能越好。圖八為SC、EGC、MRC在接收端天線數為8根時之性能曲線圖，當性能達到90%時，使用選擇合併之SNR為22dB；等增益合併之SNR為14dB；而最大比率合併則為8dB。由上述結果可觀察出，最大比率合併法效果最佳，其次為等增益合併，選擇合併效能最差。

表 II SC-FDMA 信號之模擬參數

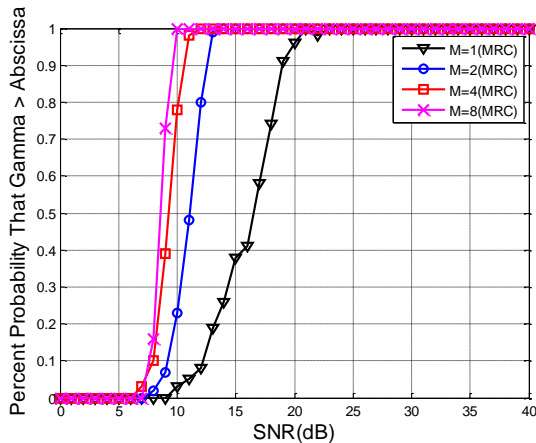
調變方式	QPSK
通道環境	Rayleigh fading channel
子載波映射	Interleaved
N_{FFT}	128
M_{FFT}	512
Guard Interval	1/4
Sampling Frequency	7.68 MHz
Carrier Frequency	2GHz



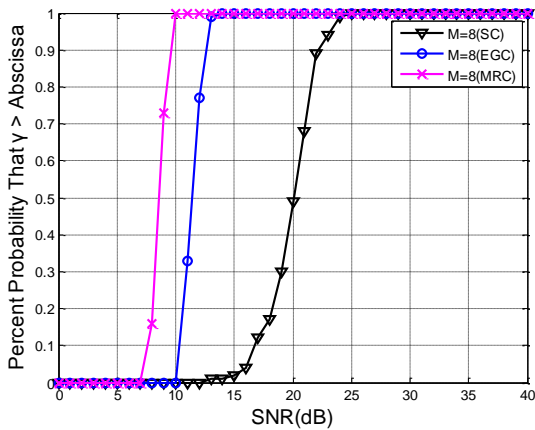
圖五：選擇合併法之天線性能圖



圖六：等增益合併法之天線性能圖



圖七：最大比率合併法之天線性能圖



圖八：SC、EGC、MRC 合併法之天線性能圖

結論

本文在瑞利衰減通道環境中實現SC-FDMA傳接機性能模擬，並比較選擇合併法、等增益合併法、最大比率合併法在接收端天線數為1、2、4、8根時之性能，驗證理論之正確性。實驗結果驗證SC-FDMA信號在瑞利衰減通道環境中，最大比率合併法可以在最低的SNR時達到最佳效能，為目前最佳化的合併方法。本文之模擬結果可做為長期演進系統上鏈傳接機設計與測試之參考。

誌謝：本研究獲得國科會經費補助，計畫編號 NSC101-2221-E-155-036

參考文獻

- [1] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*, Wiley, 2012.
- [2] H. Ebrahimzad and A. Mohammadi, "Diversity multiplexing trade-off in shadowed fading SIMO/MISO channels," *IEEE ELECTRONICS LETTERS*, vol. 46, Feb. 2010.
- [3] Luis Angel Maestro Ruiz de Temino, Gilberto Berardinelli Simone Frattasi, Kari Pajukoski and Preben Mogensen, "Single-user MIMO for LTE-A Uplink: Performance evaluation of OFDMA vs. SC-FDMA," *IEEE Radio and Wireless Symposium*, Jan. 2009.
- [4] F. Jin, W.Y. Li, Y.L. Zhang and L. Zhog, "Performance Analysis of Diversity Combining Technique in SIMO System", Xi'an Communication Institute, Xi'an, 710106, Aug. 2006.
- [5] William C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*, John Wiley, Jan. 1993.
- [6] J. Gangane1, Mari Carmen Aguayo-Torres and J. Sanchez, Sharad Wagh, "Maximal Ratio Combining SC-FDMA Performance over Land Mobile Satellite Rice fading Channel," ISSN 2250-2459, vol. 2, Issue 11, Nov. 2012.