

5G標準應用-Rayleigh通道中OFDM系統分析

指導教授：沈瑞欽(Juei-Chin Shen) 教授

成員：曾義竣、劉家瑋、李柏廷

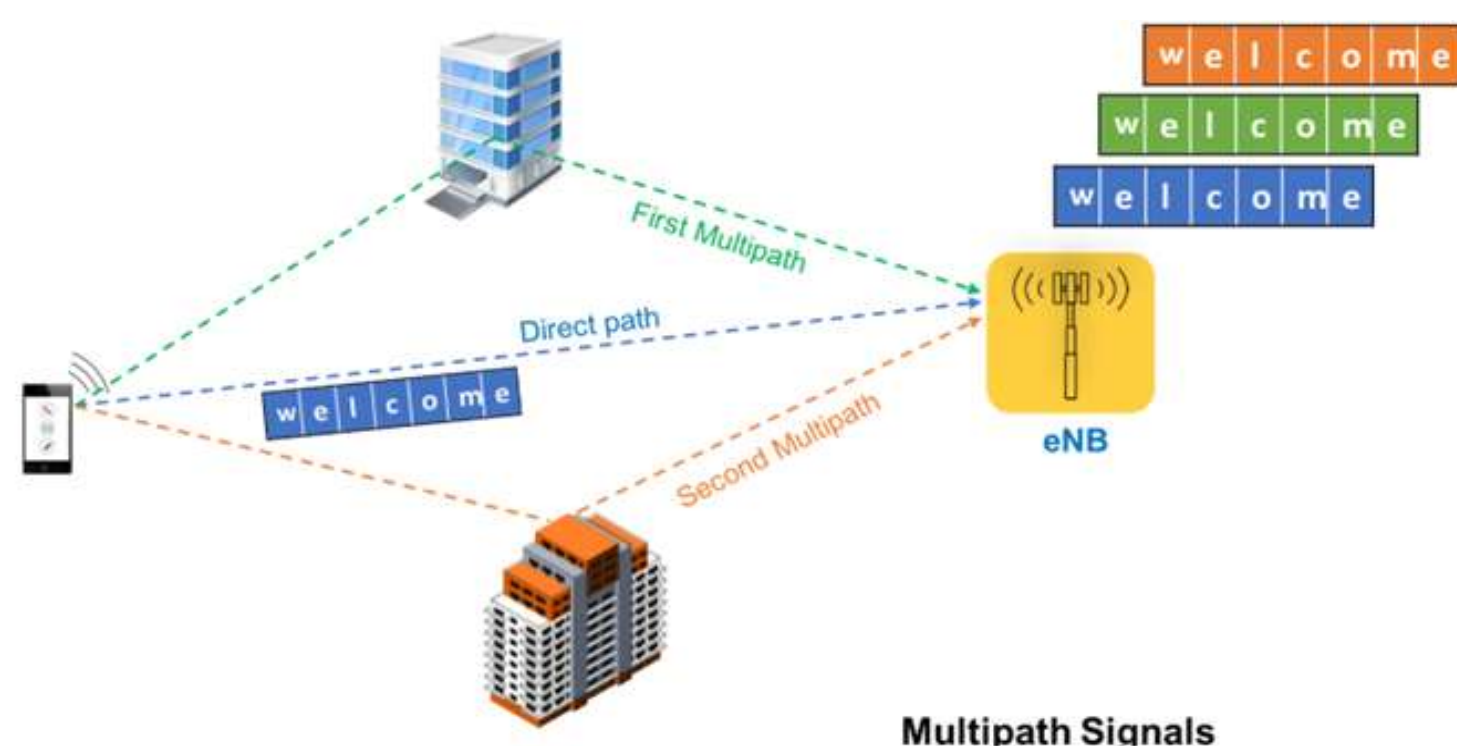
摘要

在當今的4G和5G通訊系統中，正交多頻分工系統（OFDM）扮演重要的角色。OFDM通常用於處理擴散延遲 (Delay Spread) 所造成的符號間干擾 (ISI, Inter Symbol Interference) 和多路徑通道衰落(fading)的問題。其中Rayleigh fading channel是一種最差情形，只要確保Rayleigh channel無受到符號間干擾，同時也代表著其他fading channel沒有ISI的效應產生。

多路徑通道

擴散延遲：訊號經多路徑通道後會產生各種不同的延遲 τ ，而擴散延遲可簡單定義為最大延遲扣除最小延遲。

coherence bandwidth：被定義為擴散延遲的倒數，代表該頻寬較為穩定。當擴散延遲越大時，代表該通道的coherence bandwidth就會比較小，反之該通道的coherence bandwidth就會較大。當子載波間距小於coherence bandwidth時，代表符號持續時間與擴散延遲相比足夠長，同時不會接收不同symbol，但當子載波間距大於coherence bandwidth時，會因為符號持續時間小於擴散延遲使得同時間接收到其他symbol資訊造成 ISI。

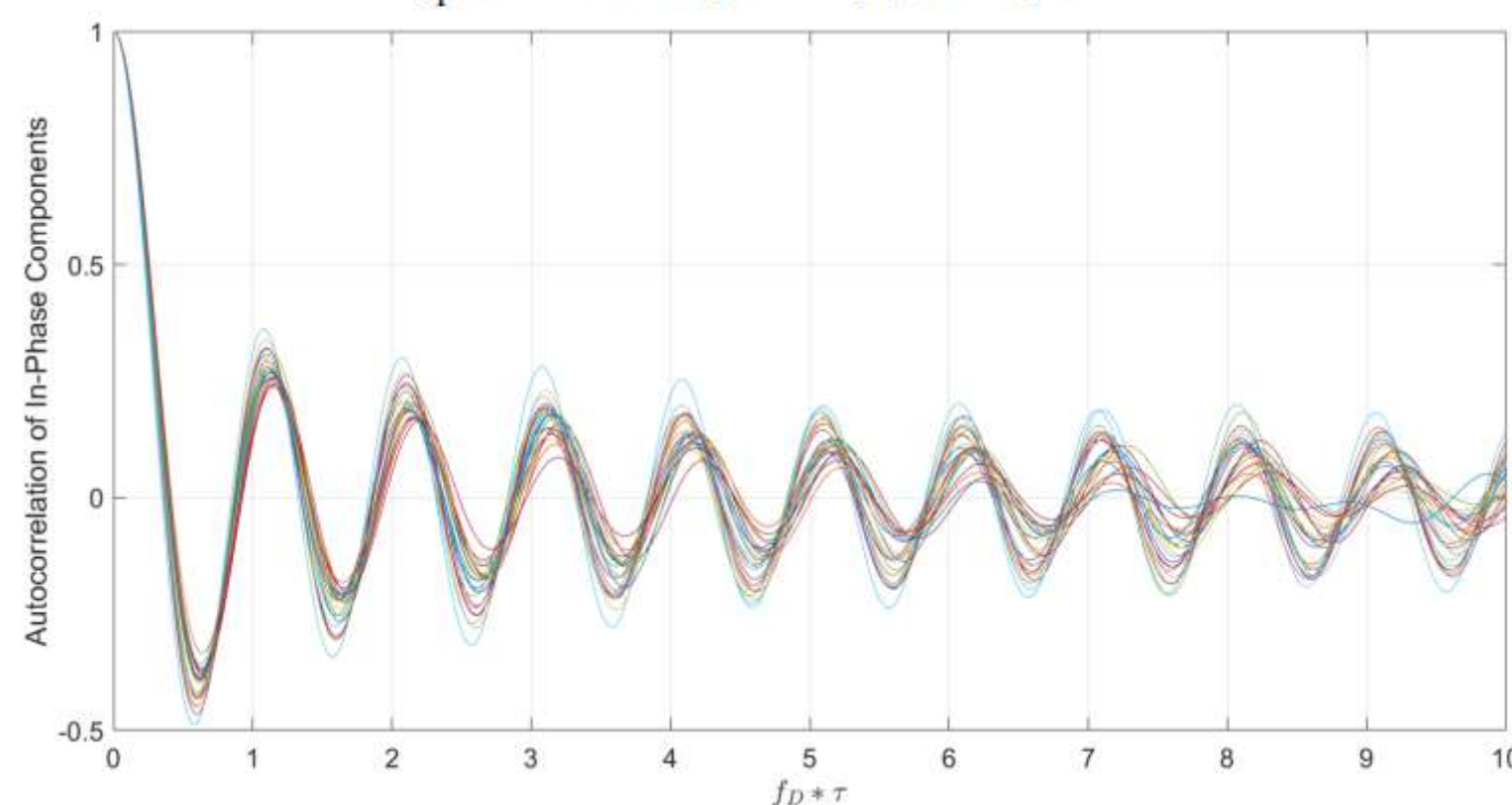


已知接收端訊號為 $r(t)$ ：

$$r(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N(i)-1} \alpha_i(t) e^{-j\phi_i(t)} e^{j\omega_c t} \right\} = r_I(t) \cos(\omega_c t) - r_Q(t) \sin(\omega_c t)$$

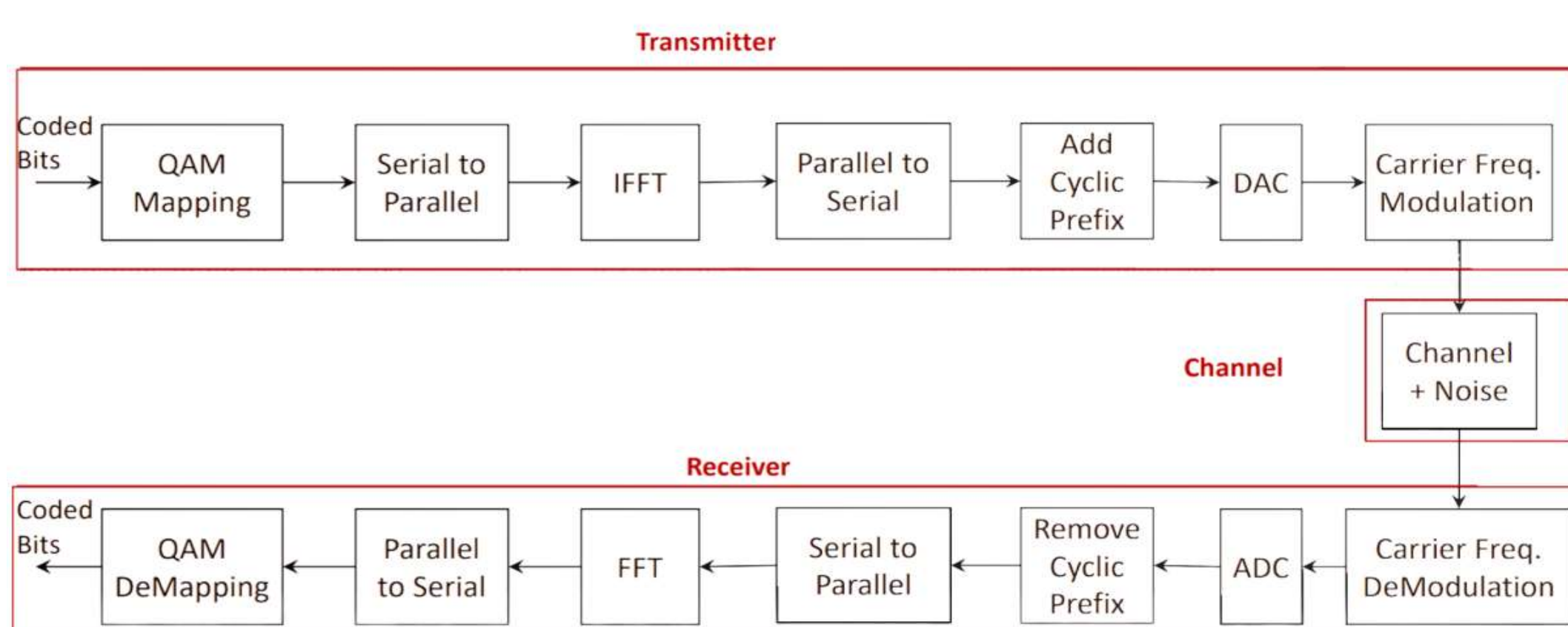
其中 α 為Rayleigh 分布， $\phi_i(t) = \omega_c \tau_i(t) - \phi_{Dn} - \phi_0$ 為uniform 分布 [- π , π]。在uniform scatter環境造成的Rayleigh fading中，已知正交訊號互相獨立的情形下，接收端訊號 $r(t)$ 的autocorrelation呈現零階Bessel function的曲線模型。

$$A_r(\tau) = A_{r_I}(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) + A_{r_Q}(\tau) \sin(2\pi f_c \tau) \\ = A_{r_I}(\tau) \cos(2\pi f_c \tau) = P_r J_0(2\pi f_d \tau)$$



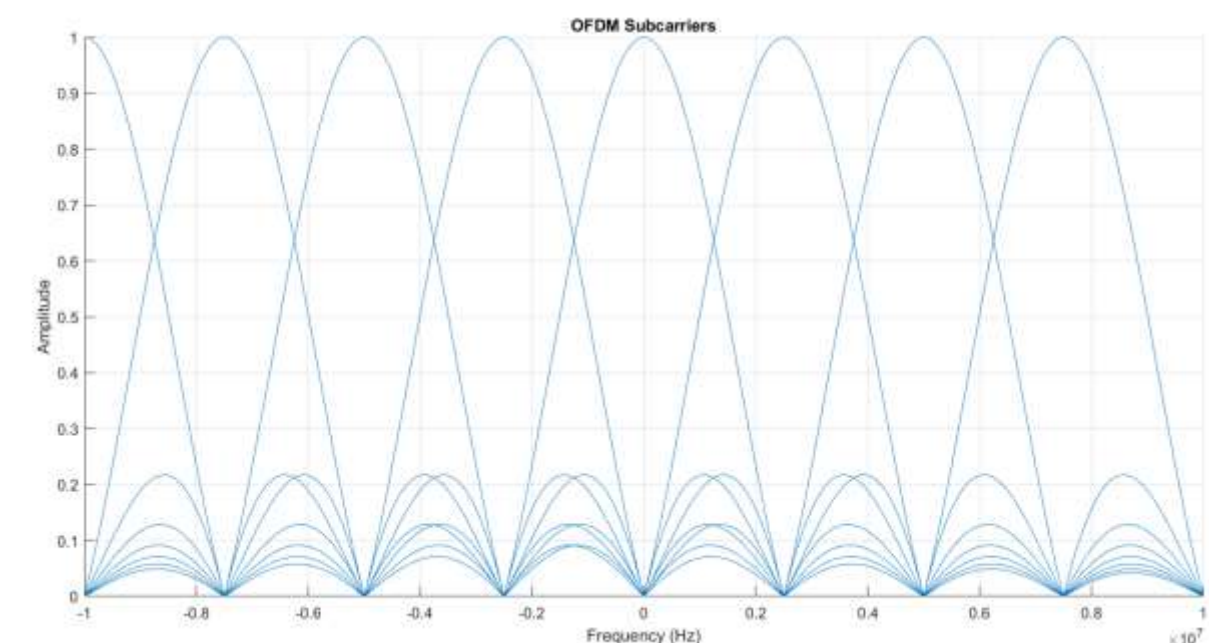
其中 P_r 為接收端接收到的總功率， f_d 為最大Doppler頻移。當autocorrelation為0時，能產生最大Doppler頻移 f_d ，當autocorrelation第一次為0時， $2\pi f_d \tau = 2.4048$ ，所以 $f_d \tau = 0.3827$ 。而 f_d 可由 $f_d = \frac{v \times f_c}{c}$ (v 是相對速度， f_c 為載波頻率， c 是光速)得出。

系統基本架構



系統分析說明

4G和5G所使用OFDM技術相比於前幾代所使用FDM，在頻寬上的子載波間距更小，使得雖然每個subcarrier間有部分重疊，但在該頻率點位置與其他子載波為正交(Orthogonal)不會受到影響，同時所使用頻寬大大減少。

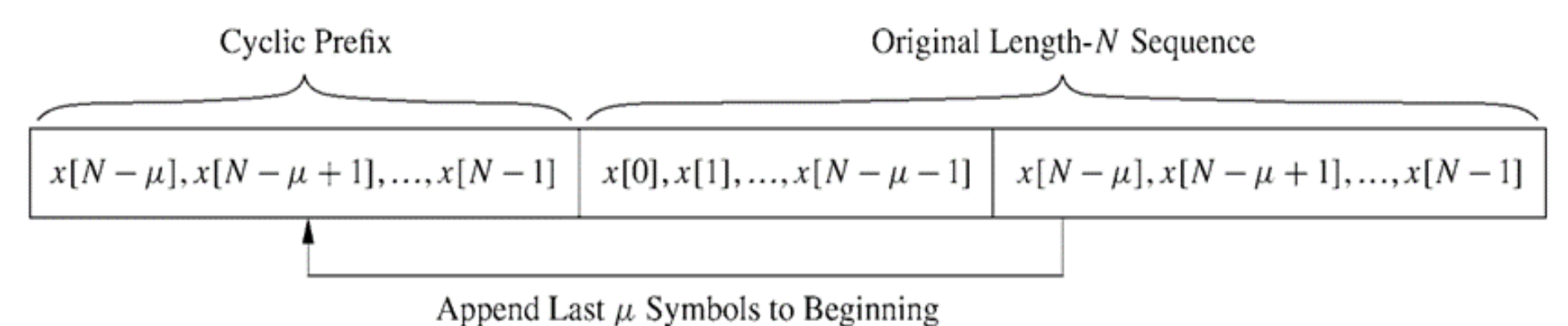


接收信號 $s(t)$ 中每個符號解調器在一個symbol持續時間 T_N ，其中 \hat{s}_i 為訊號 $s(t)$ 與第 i 個子通道correlation後的symbol，是第 j 個子通道的symbol， $g(t)$ 是接收濾波器的脈衝響應， f_j 和 f_i 分別是第 j 個和第 i 個子載波頻率， ϕ_j 和 ϕ_i 分別是第 j 個和第 i 個子通道經Doppler影響所產生的相位。

$$\hat{s}_i = \int_0^{T_N} \left(\sum_{j=0}^{N-1} s_j g(t) \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \right) g(t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) dt = s_i$$

訊號在通道中產生延遲擴散，可看作在通道做脈衝響應，此時可藉由訊號在時域做convolution等效於在頻域相乘的特性。在頻域可用接收端訊號 $Y = \hat{G}X$ 來表示，其中 \hat{G} 為系統頻譜響應矩陣， X 為輸送端訊號矩陣。

在OFDM中為了在接收端乘上系統頻譜響應的反矩陣 \hat{G}^{-1} 來還原出原始 X 的訊號矩陣，此時的 \hat{G} 在時域必須滿足cyclic convolution同時避免 ISI 的問題發生。將符號的尾端複製到整個symbol的最前端可滿足cyclic convolution的形式，而從尾端被複製到整個symbol開頭的部分稱為cyclic prefix。



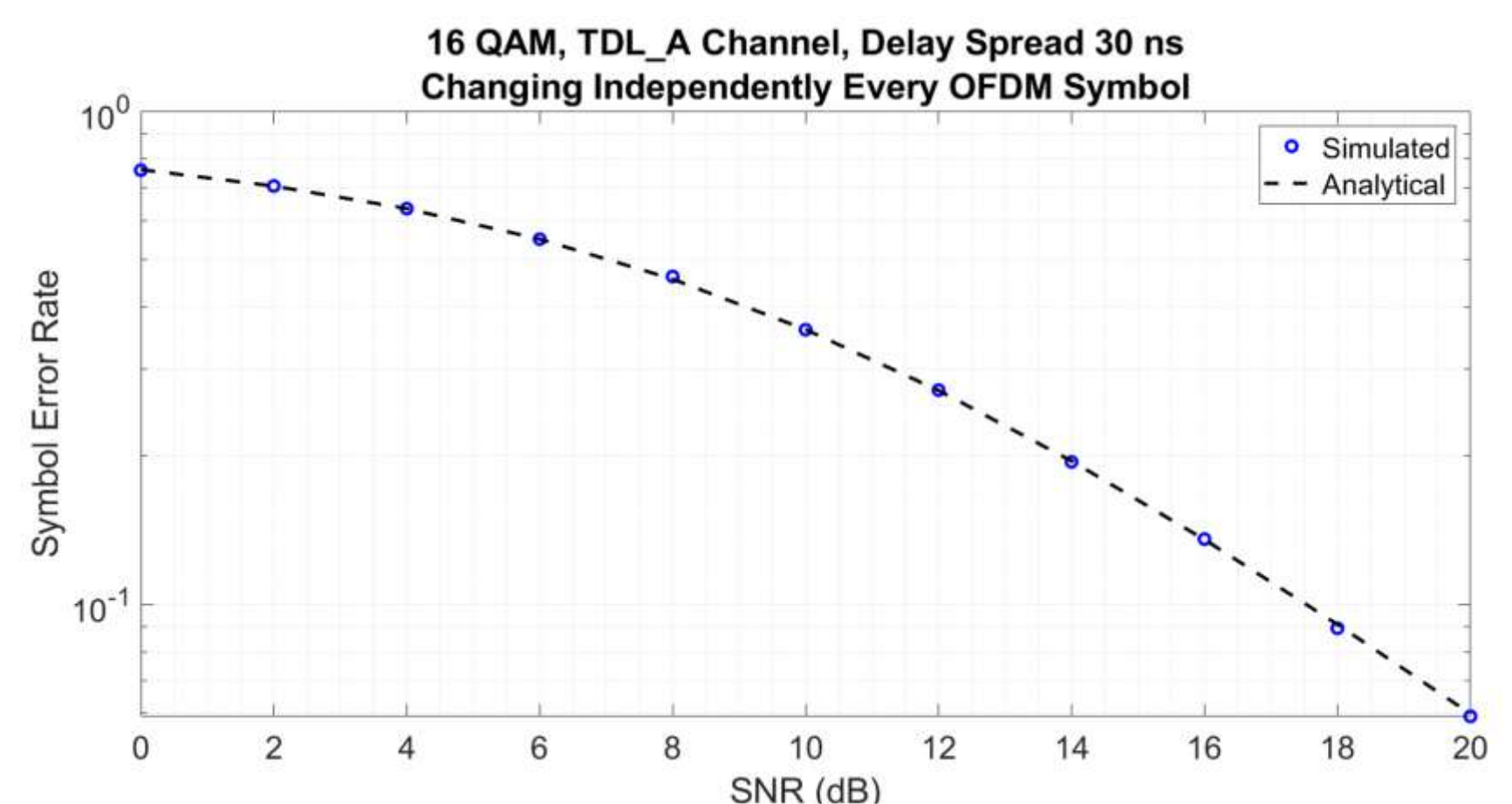
在無雜訊干擾下可用以下式子描述：

(Suppose symbol length N ，cyclic prefix(CP) μ ，OFDM symbol length $N+\mu$ ，time-domain impulse response $g = [g_0, g_1, g_2]$)

$$y = [g_0, g_1, g_2] * [x_{N-\mu}, x_{N-\mu+1}, \dots, x_{N-1}, x_0, \dots, x_{N-\mu}, \dots, x_{N-1}]$$

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \\ \vdots \\ y_{N+\mu-3} \\ y_{N+\mu-2} \\ y_{N+\mu-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & g_2 & g_1 & g_0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & g_2 & g_1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{N-\mu} \\ x_{N-\mu+1} \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_0 \\ \vdots \\ x_{N-\mu} \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \\ \vdots \\ Y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{0,0} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & H_{1,1} & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & H_{n,n} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & H_{N-1,N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_n \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{bmatrix}$$

最終16QAM經模擬結果當訊號經過TDL-A(Tapped Delay Line) Rayleigh fading channel時，所呈現出SNR對應的SER和理論曲線相同。



結論與結語

- TDL-A模型用於模擬高樓林立環境中的5G傳輸，在高密度、高速移動場景中，Rayleigh fading效應最明顯。
- 在模擬autocorrelation時，將最大Doppler設"inf"(無限大)會使得通道在傳送每個symbol時因快速變化為獨立，導致跑不出結果(橫軸為 $f_d \tau$)，需將最大Doppler設一個有限實數值才能使通道之間有相關性。