

第二章 OFDM 技術基本原理

2.1 OFDM 調變技術介紹

OFDM 系統的基本原理，是將原有的資料傳輸序列分配在多個不同的子載波上平行傳送，因此每一子載波上的傳輸間隔變大為原本間隔的數倍，使得在每個子載波上的符元持續時間(Symbol Duration)增加，如圖 2.1.1 所示。

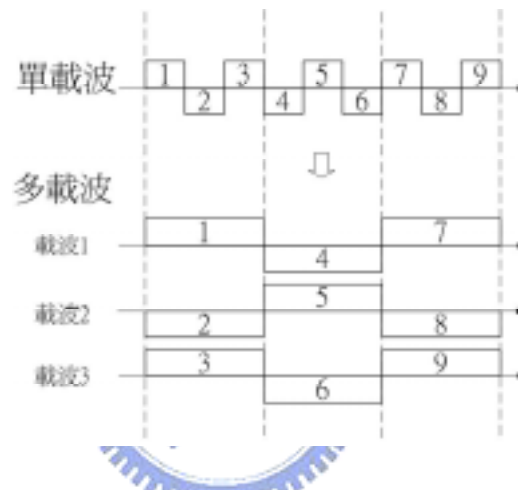


圖 2.1.1 OFDM 之多載波傳輸示意圖

符元時間變長可以降低由多路徑延遲擴散(Multi-path Delay Spread)引起之時域符元干擾。接下來，我們將針對 OFDM 的基本調變技術作介紹。

OFDM 系統與傳統分頻多工(Frequency Division Multiplexing, FDM)不同之處為：OFDM 系統的每個子載波(Sub-Carrier)之間具有正交性(Orthogonality)，此為 OFDM 系統之主要特點。子載波彼此之間不會產生干擾，且頻譜可以相互重疊；而傳統分頻多工系統之不同載波之間頻譜沒有重疊，因此 OFDM 系統比傳統分頻多工系統具有較好的頻寬效益(Bandwidth Efficiency)[2]，其頻譜如下圖 2.1.2 所示。

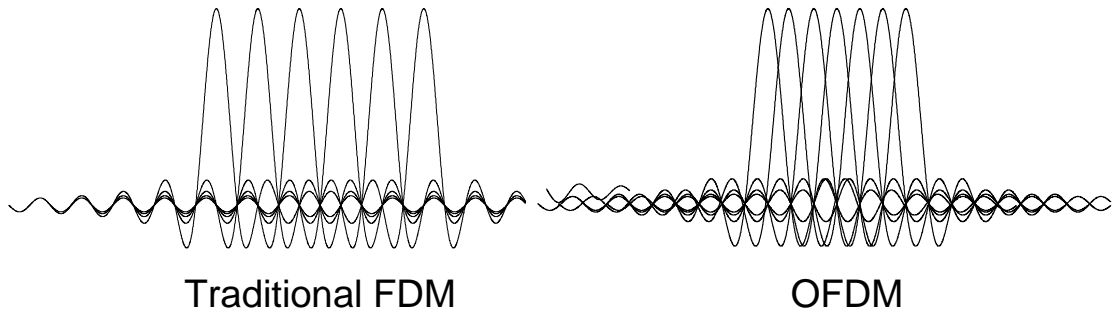


圖 2.1.2 (a) 傳統 FDM 頻譜 (b) OFDM 的頻譜

子載波上所傳送的符元使用相移鍵控(Phase-Shift Keying, PSK)或正交振幅調變(Quadrature-Amplitude Modulation, QAM), 所有子載波的符元一起構成一個 OFDM 區塊(OFDM Block), OFDM 時域信號為所有調變後的子載波總合構成, 其基頻數學表示式為(2.1)式, 圖 2.1.3 為 OFDM 傳送端調變器示意圖。

$$d(t) = \begin{cases} \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+N_s/2} \exp\left(j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)\right), & t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0, & t < t_s \text{ and } t > t_s + T \end{cases} \quad (2.1)$$

d_i : 複數的符元, N_s : 子載波的數目,
 T : OFDM 符元區間, t_s : OFDM 符元開始時間,

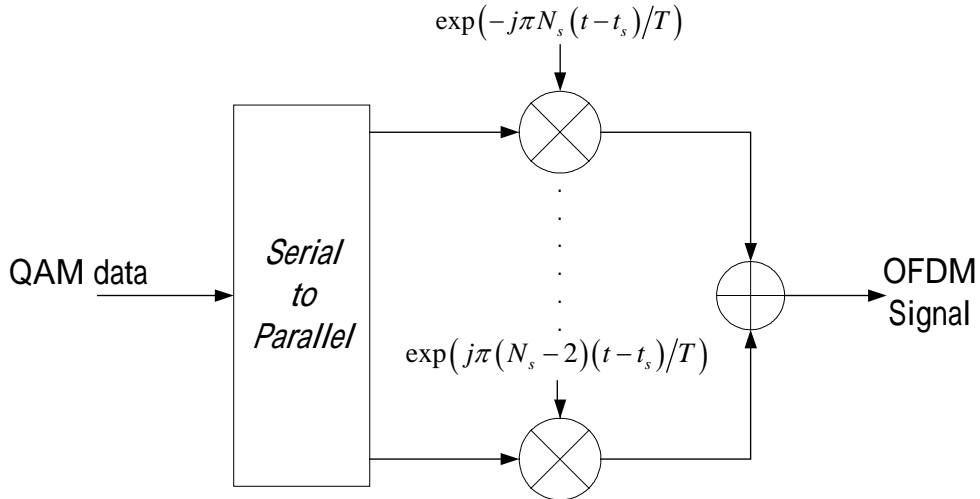


圖 2.1.3. OFDM 系統傳送端調變器示意圖

上述為類比正交多載波調變系統，需要多組的震盪器傳送 OFDM 信號，然而，要同時設計多組的震盪器複雜度太高。因此，實際上的 OFDM 系統採用數位的快速複立葉(IFFT/FFT)的方式來實現之，如(2.4)式所示。

$$\bullet T = N_s T_s$$

$$\hat{s}(t) = \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s-1}{2}} d_{i+N_s/2} \exp\left(j2\pi \frac{i}{N_s T_s} (t-t_s)\right) \quad (2.2)$$

$$\bullet s(k) \triangleq \frac{1}{N_s} \hat{s}(kT_s) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s-1}{2}} d_{i+N_s/2} \exp\left(j2\pi \frac{ik}{N_s}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N_s - 1 \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow s(k) = \text{IFFT} \left\{ d_{i+\frac{N_s}{2}} \right\} \quad (2.4)$$

因此，OFDM 系統能以複立葉轉換之方式實現，OFDM 信號為時域的類比波形取樣點，而符元為頻域上每個子載波的信號，符元調變每個子載波的大小後加起來即為時域信號。為了以數位方式作複立葉轉換，必須對類比信號取樣，而且取樣信號必須滿足取樣定理(Sampling Theorem)，即取樣頻率必須大於或等於兩倍信號頻寬，也就是說， $1/T_s$ 必須大於等於兩倍信號頻寬，如(2.5)式所示。

W : Signal Bandwidth

$$\frac{1}{T_s} \geq 2W \quad (2.5)$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} \geq T_s W \quad (2.6)$$

觀察圖 2.1.4 與圖 2.1.5 後發現，若使用所有子載波載送資料，則無法滿足(2.6)式，如此便違反取樣定理。因此，真正傳送資料的子載波數目不能全部用滿 N_s ，以滿足取樣定理。不送資料的子載波稱之為虛擬載波(Virtual Carriers)。

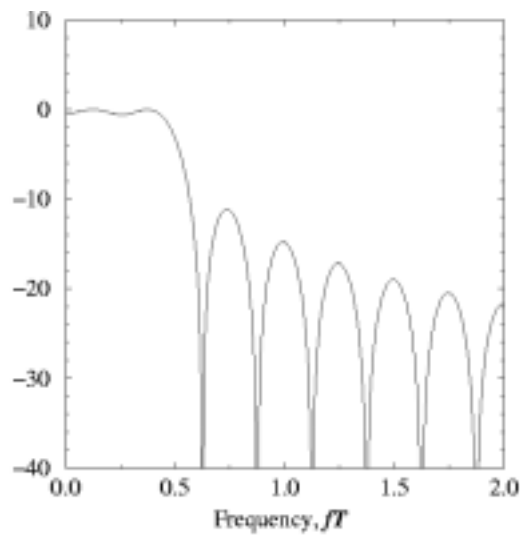


圖 2.1.4. OFDM 系統頻譜 ($N_s=4$, $T = N_s T_s$)

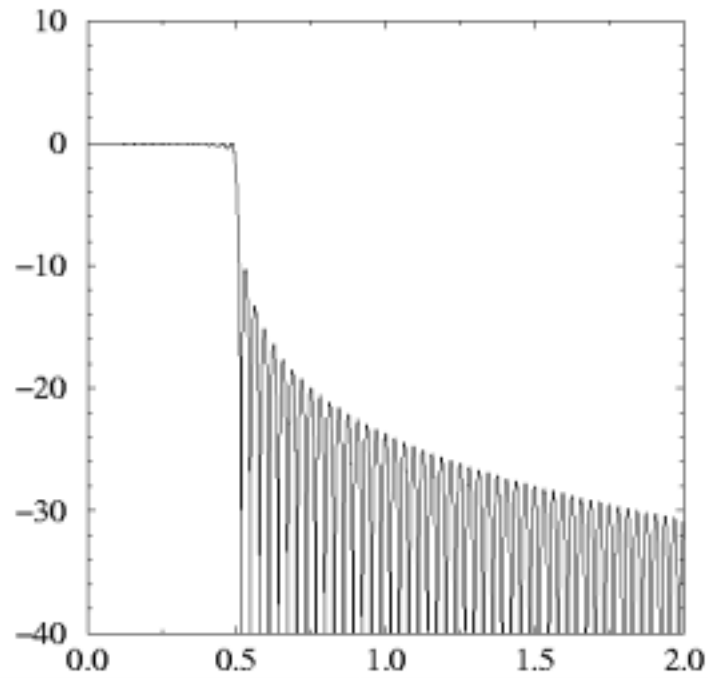


圖 2.1.5 OFDM 系統頻譜 ($N_s=32$, $T = N_s T_s$)

2.2 保護區間與載波正交性

多路徑延遲擴散除了造成符元之間的干擾外，也會造成 OFDM 系統中不同區塊間的干擾(Inter-Block-Interference, IBI)。為了消除此干擾，在每一 OFDM 區塊中加入保護區間(Guard Interval)，如圖 2.2.1 所示。

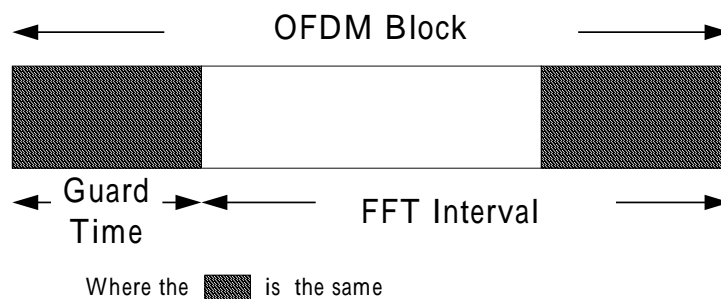


圖 2.2.1 OFDM 之保護區間示意圖

保護區間的長度必須大於所預期之最大多路徑延遲擴散(Maximum Multi-path Delay Spread)，使得 OFDM 區塊不會受到上一個 OFDM 區塊干擾。此外，若保護區間內不送信號，則會引起載波間干擾(Inter-Carrier-Interference，ICI)，載波之間不再具有正交性，如圖 2.2.2 所示。

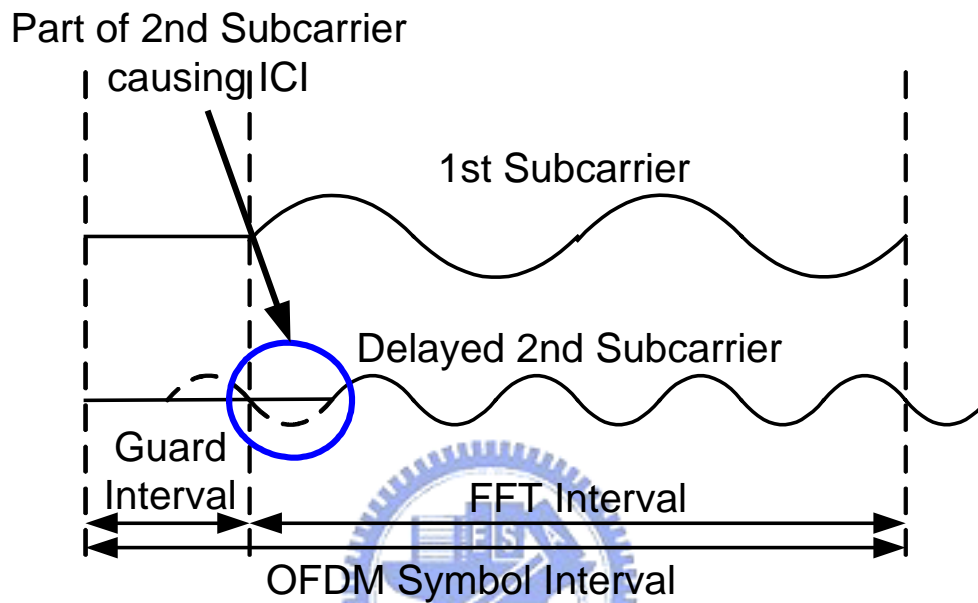


圖 2.2.2 保護區間內不送信號引起 ICI 之示意圖

為了維持正交性，選擇保護區段之信號為 OFDM 區塊之循環延伸(Cyclic Extension)，如圖 2.2.3[2]所示。只要傳輸延遲擴散小於保護區間，則在一個完整 FFT 區間中總是有整數倍週期的弦波，如此仍然可維持載波之間的正交性而不會有 ICI 現象發生，下面以圖 2.2.4[2]為例子說明。

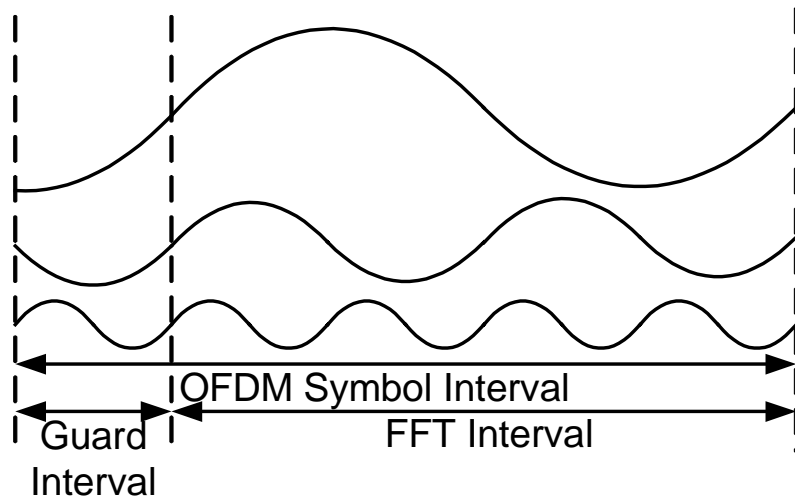


圖 2.2.3 OFDM 保護區間之循環延伸示意圖

圖 2.2.4 為兩個路徑的傳輸，實線部份代表第一路徑，虛線部分代表第二路徑，也就是實線的 OFDM 信號延遲。注意在 OFDM 符元邊界處有相位跳躍產生，用來表示不同符元之間的不連續。對於虛線信號而言，其相位跳躍發生在第一個路徑之後的某一特定延遲，當此延遲小於保護區間，則在完整的 FFT 區間中不會有相位跳躍，因此雖然 OFDM 信號有相位的變化，因為有週期延伸的保護區間存在，使得載波之間仍然維持正交性。若是最大傳輸延遲大於保護區間，則在 FFT 區間內會有相位跳躍，使得載波之間失去正交性，ICI 便出現了。

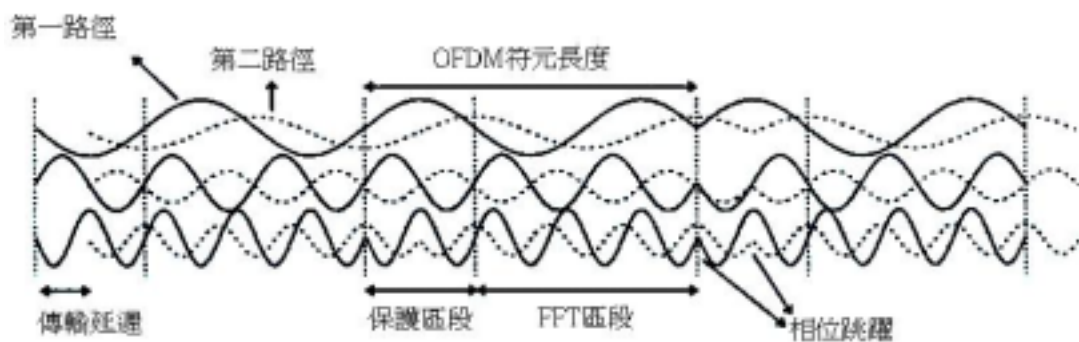


圖 2.2.4 傳輸延遲伸展小於保護區間實例

由此可知，OFDM 系統之保護區間具備週期延伸，對於載波正交性是非常重要的。而在接收端也必須顧慮到這一點，因此必須進行 OFDM 符元同步的動作，確保符元同步後抓到的 FFT 區間的每個載波仍然具備周期性，則 OFDM 區

塊之各載波間仍維持正交性。符元同步若是有誤差，造成取到的 FFT 區間往前移幾點或者往後移幾點，只要載波仍然維持正交，僅造成相位偏轉(Phase Rotation)，可利用通道估測的方式加以補償，因此接收端仍可作正確的解調變。反之，若是正交性被破壞，則接收端便無法進行正確的解調變。

此外，同步問題除了符元同步，確保抓對維持正交性的 FFT 區間外，也要確保此區間內的每個載波頻率要對，也就是傳送端、接收端載波頻率要一樣，若是載波頻率沒有同步，則正交性被破壞，一樣會有 ICI 的問題。同樣地，取樣頻率也要同步，傳送端、接收端取樣頻率若是不一樣，則一樣會有無法維持正交性、ICI 出現的問題。

另外，OFDM 系統另一重要問題為峰值對均值功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)。由於 OFDM 信號為多個載波組合而成，因此其信號功率會隨著子載波所載之符元不同而變化，若變化之範圍超出功率放大器之線性區域則產生非線性失真，因此在多載波時必須考慮 PAPR 問題，以減少功率放大器之非線性失真。



2.3 結論

綜而言之，OFDM 系統主要的優點如下：

- OFDM 系統能抵抗多路徑傳輸的干擾，不需要複雜的時域等化器，可降低複雜度。在一個定的延遲擴散下，OFDM 可以簡單的克服延遲擴散所引起的信號干擾，而單載波系統卻需要一個複雜度相當高的等化器來消除延遲擴散所引起的信號干擾。
- 在緩慢的時變通道中，可以根據各個不同載波的訊雜比，而給予不同載波不同的調變方式，來增加系統的容量。
- OFDM系統具有頻率分集(Frequency Diversity)的效果，比單載波機制更能夠對抗窄頻干擾，因為窄頻干擾只能影響很少比例的載波數目。

OFDM 系統與單載波機制相比，也有一些缺點，可說明如下：

- OFDM 系統對於載波頻率偏差、取樣頻率偏差與相位雜訊較為敏感，容易破壞正交性而造成 ICI。
- OFDM 系統有嚴重的 PAPR 之問題，造成非線性失真，增加功率放大器設計之複雜度。

