

第 1 章 簡介

由於多媒體應用及網路使用的盛行,使得人們對頻寬的需求日益增加,因此高資料傳輸率成為下一代通訊系統的基本要求。眾多的研究想找出一個容易實現、有效率的頻寬使用及經過不理想的通道效能更穩定的新調變技術,正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)是一個可以滿足以上需求的調變技術。正交分頻多工技術在 1960 年代中期即已提出[1],但在當時由於正交多載波硬體的製作相當困難且昂貴,而且在數位信號處理不發達的當時,此技術並不受到歡迎。直到 1971, Weinstein 及 Ebert 提出利用 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)及 FFT(Fast Fourier Transform)取代類比之多載波製作,此技術得以再受重視。在 1980 年 Peled 及 Ruiz 提出利用前置循環信號(Circular Prefix)來解決在多重路徑通道下的符際干擾(Inter Symbol Interference, ISI)問題。

在目前 OFDM 技術已經被採用為多種傳輸技術的標準,在有線的環境下,如非對稱式數位用路迴路(ADSL)、高速數位用路迴路(HDSL)及電力線傳輸系統(Home-Plug)。在無線環境中,如數位音訊廣播(DAB)、數位影像廣播(DVB)、IEEE 802.11a 無線區域網路標準(WLAN)及 IEEE802.16a 無線都會型區域網路(WMAN)都是藉由 OFDM 技術來傳輸。

OFDM 技術廣泛的被使用在通信系統中,因為 OFDM 在頻率選擇性衰退通道(Frequency Selective Fading Channel)、多重路徑(Multipath)的影響及遭到窄頻干擾時有較佳的穩定性。對單載波通系統,衰退通道及干擾可能造成傳輸失敗,但對多載波系統而言,只有少部分的子載波受到影響,且經由錯誤更正編碼可增加傳輸效能。但是,OFDM 有兩個熟知的缺點,第一個是峰值對均值功率比(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,PAPR 的問題增加 D/A 及 A/D 設計的複雜度,以及減低功率放大器的效率。第二個是對同步錯誤極為敏感,同步錯誤包括頻率偏移

(Frequency Offset)及時序偏移(Time Shift)，頻率偏移主要由於傳送與接收端的振盪器存在頻率差與都卜勒效應所造成，將造成載波間的正交性被破壞[2]，由於子載波間的互相干擾(Inter-carrier Interference, ICI)，造成子載波能量下降，而且相鄰的子載波也會造成干擾。時序偏移是由於雜訊及多重路徑使得不能正確找出每個符元(Symbol)的邊界，造成 ICI 與 IBI(Inter-block Interference, IBI)的效應。

本論文是針對 IEEE 802.11a 無線區域網路標準及 IEEE 802.16a 無線都會型區域網路作研究，主要目的是針對接收機的實體層同步中：封包偵測、頻率偏移估算及碼框同步方法的研究，在各章的最後為各個方法的模擬及結果分析。



第 2 章 OFDM 調變技術

從第一章可知 OFDM 技術是一種在高資料傳輸時有較佳效能的調變技術，而且廣泛被使用在現今的通訊系統中。在本章中將解釋 OFDM 傳輸技術的基本原理。首先介紹傳統單一載波系統及多載波系統的差異。其次介紹 OFDM 傳輸技術前置循環信號的特性。

2.1 多載波調變

多載波傳輸是將原本串列傳輸的資料，分割成平行的 N 個為原本傳輸速率 $1/N$ 的低速率資料，在頻域上使用 N 個子載波傳送。在每一路平行分割的資料上看來，分割後的符元區間變為原本串列傳輸的 N 倍大，因此可以降低由多重路徑延遲擴散(Multi-path Delay Spread)所引起的符際干擾(Inter Symbol Interference)。在頻域上，相對於原本串列傳輸而言，各個子載波的頻寬相對變小 N 倍，於是在遭遇到多重路徑衰落通道時，通道之同調頻寬(Coherence Bandwidth)便大於子載波的頻寬，於是對於個別的子載波而言，其實是遭遇到非頻率選擇性(Frequency Non-selective)的通道[3]。

在頻譜效益上，傳統的多載波傳輸技術子載波頻譜間不相互重疊，而 OFDM 技術使用子載波相互重疊，且子載波間相互正交的方式來達成頻寬的高利用率，如圖 2.1.1 所示。

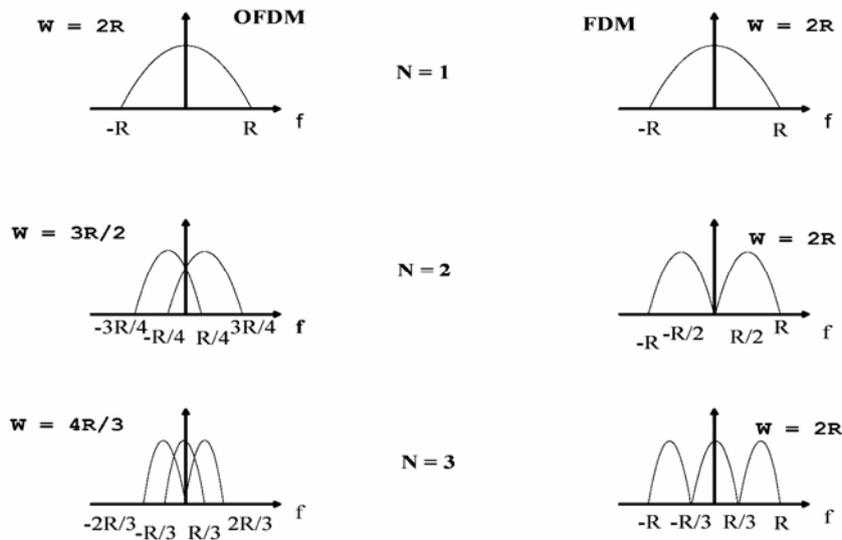


圖 2.1.1 OFDM 與傳統多載波傳輸技術頻寬使用比較圖

在理論上，當子載波數目趨近於無限大時，使用子載波頻譜重疊的多載波傳輸技術其頻譜效益為傳統多載波傳輸技術的 $(1 + \beta)$ 倍。而二種不同的方式其頻譜效益可以證明如下：

在傳統單載波系統的頻寬效益：

$$W = \frac{(1 + \beta)}{T_s}$$

$$R = \frac{\log_2 M}{T_s} \text{ bits/sec}$$

$$\Rightarrow \frac{R}{W} = \frac{1}{1 + \beta} \log_2 M \text{ bits/sec/Hz} \quad (2.1.1)$$

β : Roll-off Factor
 M : Alphabet Size

使用重疊的多載波的頻寬效益：

$$W = (N + 1) \cdot \frac{1}{NT_s}$$

$$R = \frac{\log_2 M}{T_s} \text{ bits/sec} \quad (2.1.2)$$

$$\Rightarrow \frac{R}{W} \approx \log_2 M \text{ bits/sec/Hz}$$

N : Total Number of Subcarriers

於是在式(2.1.2)中，可以看見在載波數 N 相當大時，使用重疊的多載波的頻寬效益上比起在傳統上使用單載波系統的頻寬效益(式(2.1.1))好上 $(1+\beta)$ 倍。

OFDM 的信號是由 PSK 或是 QAM 所調變的子載波在時域上相互疊加而成。其等效低通(Equivalent Lowpass)信號可以表示成：

$$r_F(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-K}^K X_{k,l} \exp\left(j2\pi \frac{k}{T}(t-lT)\right) \quad (2.1.3)$$

其中，傳送的信號 $r_F(t)$ 是由多個 OFDM 符元串接而成，其中 l 及 k 分別是 OFDM 符元及子載波的索引， $X_{k,l}$ 代表第 l 個 OFDM 符元第 k 個子載波上的資料，其中子載波數目共有 $2K+1$ 個。 T 為符元的區間，類比調變器可以圖 2.1.2 表示。

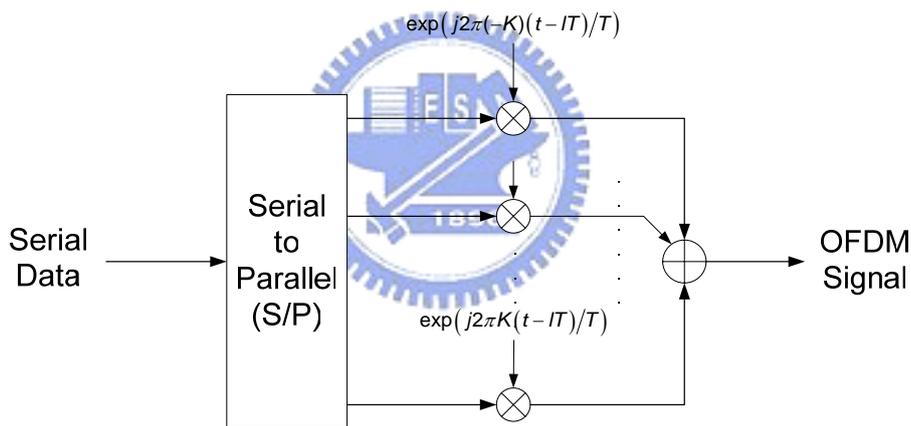


圖 2.1.2 OFDM 系統傳送端調變器示意圖

在時域中，OFDM 信號可以視為由多個擁有整數個週期且不同頻率的正交子載波疊加所成，如圖 2.1.3 所示：

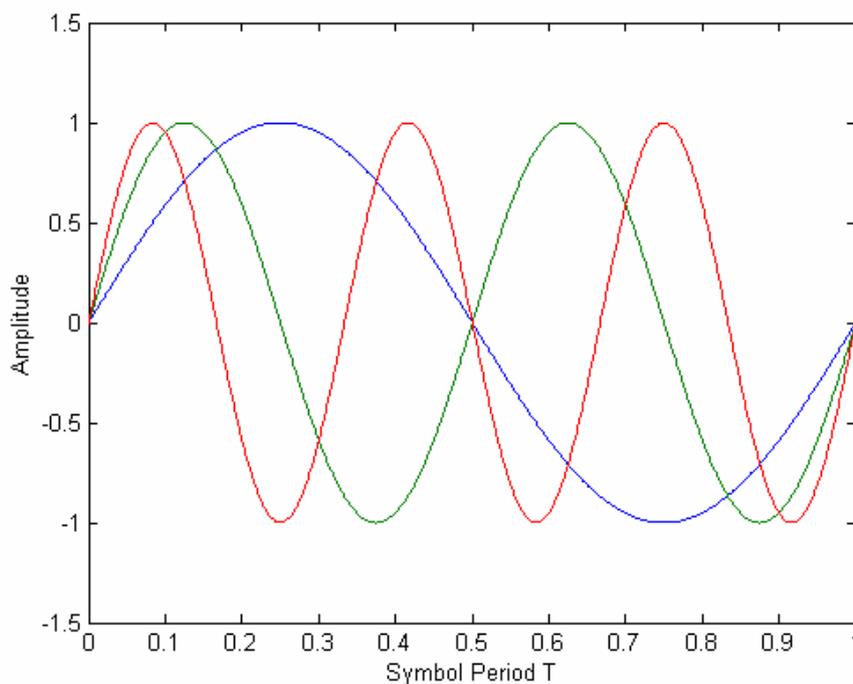


圖 2.1.3 三個彼此正交的子載波所構成的 OFDM 信號

在時域上，OFDM 是以時間為 T 的區塊傳送，在頻域上相當於所有的子載波信號和 $\text{sinc}(\pi \cdot f \cdot T)$ 作迴旋(Convolution)，於是在頻譜上可以圖 2.1.4 表示。

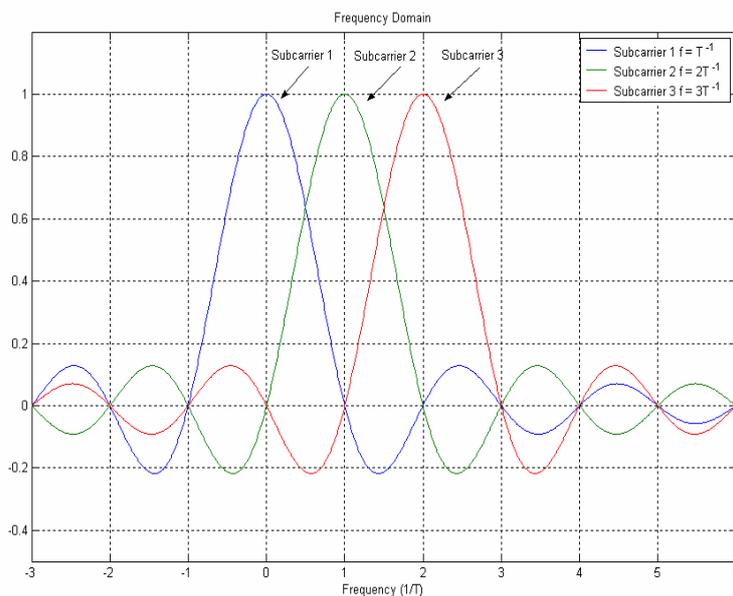


圖 2.1.4 OFDM 子載波頻譜

在圖 2.1.4 中可以看見在頻域上子載波相互疊加的情形。以子載波 1 為例，子載波 2 及子載波 3 的頻譜在子載波 1 的峰值時剛好是零交錯(Zero Crossing)，

子載波 2 及子載波 3 對子載波 1 不產生干擾。因此對於所有子載波而言，彼此是正交的。但是在有頻率偏移的情形下，如圖 2.1.5:

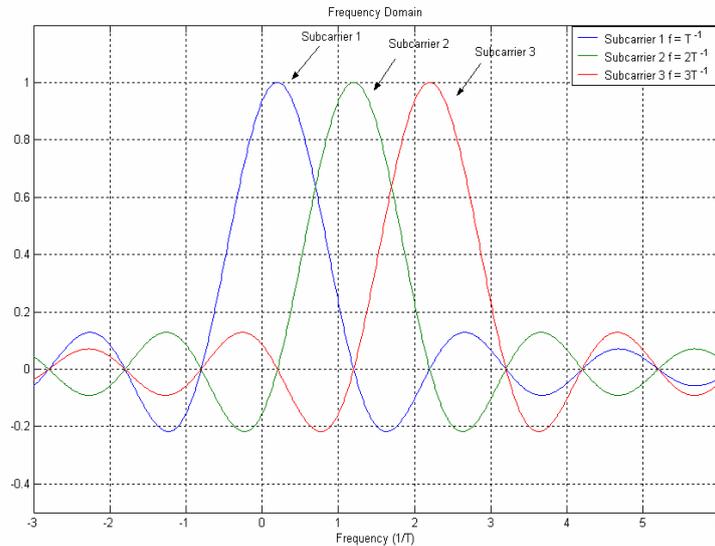


圖 2.1.5 頻率偏移下 OFDM 子載波頻譜

在圖 2.1.5 中，是以頻率偏移為 0.2 個子載波間距為例，子載波 1 在頻率 0 處不但振幅下降，而且同時受到子載波 2 及子載波 3 的干擾，子載波間的正交性被破壞。圖 2.1.6 為類比 OFDM 信號解調器。在接收端所收到第 l 個 OFDM 信號的第 k 個子載波乘以 $\exp(j2\pi k(t-lT)/T)$ 再積分一個符元區間，即可將所傳送的信息 $X_{k,l}$ 解出。

然而在類比調變器及類比解調變器製作不易及價錢昂貴的情形下，使得之前該技術不受歡迎的情形，在快速富利葉轉換演算法的適時出現以及數位信號處理技術的快速發展下獲得了疏解

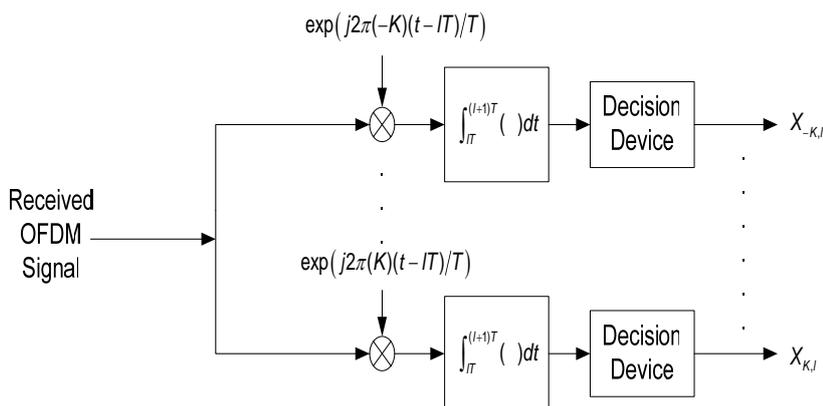


圖 2.1.6 OFDM 接收端解調器示意圖

2.2 前置循環信號

在高傳輸速率的無線通訊系統中,由於多重路徑的效應而產生符際干擾(Inter Symbol Interference,ISI),使得傳輸效能減低。在 OFDM 將原本串列傳輸的資料流,分割成平行的 N 個低速資料後,分割後的符元區間變為原本串列傳輸的 N 倍大,因此可以降低由多重路徑所引起的符際干擾。為了完全消除此干擾,在每一 OFDM 區塊中加入保護區間(Guard Interval),如圖 2.2.1 所示。

在保護區間長度的選擇上,通常是選擇大於所預估的最大傳輸延遲擴散(Delay Spread),完成同步後只要將受到前一個符元干擾的守護區間丟棄即可。此外,若保護區間內不送信號,在不同延遲的效應下,因為信號的週期性被破壞而產生子載波干擾(Inter Carrier Interference, ICI)問題[3]。在圖 2.2.1 中,因為保護區間是一個空白的信號,延遲的符元在符元區間已經不是一個完整的週期,於是產生了子載波的干擾(ICI)。為了改善這個問題,在保護區間內置入 OFDM 的一部分複製信號使其成為一段循環週期性信號,如圖 2.2.2 所示,圖 2.2.3 為前置循環信號產生方式。

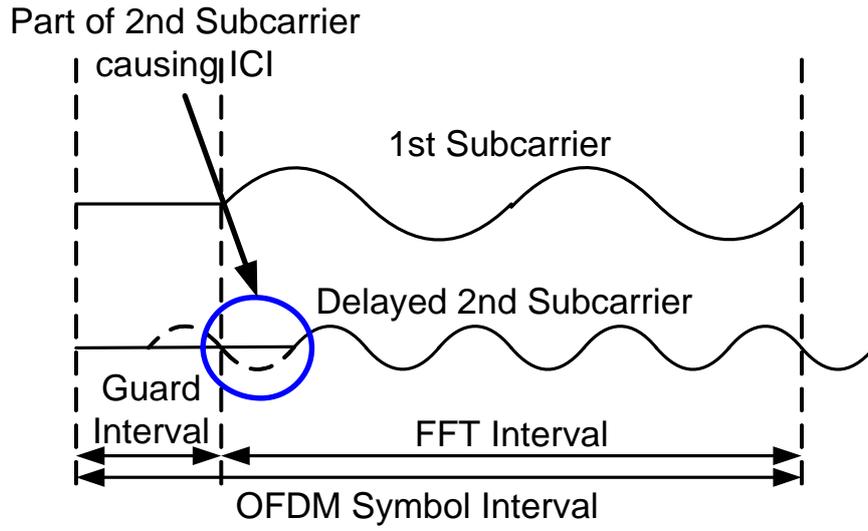


圖 2.2.1 保護區間內不送信號引起 ICI 之示意圖

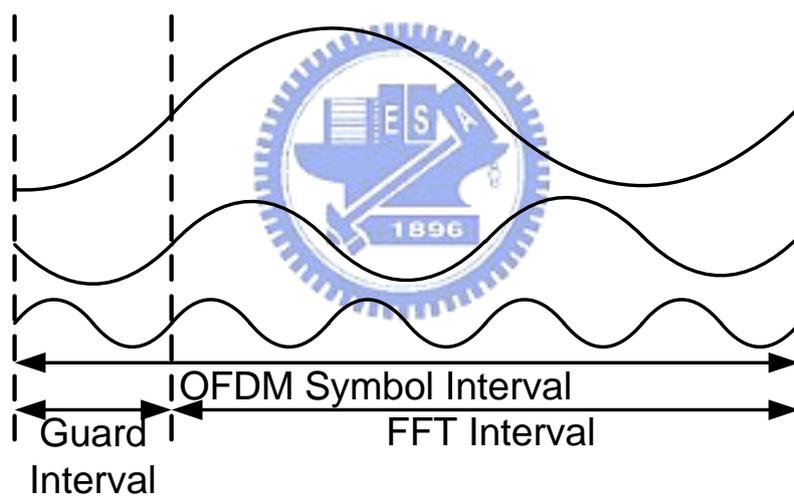


圖 2.2.2 週期性前置循環信號

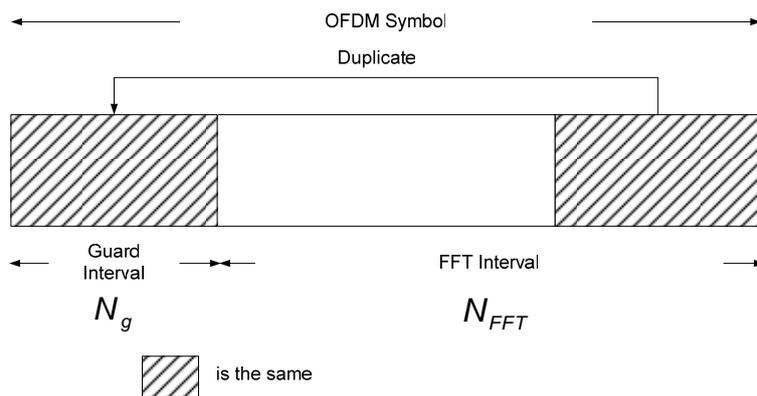


圖 2.2.3 前置循環信號產生方式

當最大的傳輸延遲擴散小於守護區間時，在同步住的情況下，前置循環信號的引入，可以確保在一個 OFDM 區塊中 FFT 區間中能夠維持子載波的正交性。然而因為前置循環信號的引入，傳送的信號損失了一部分的傳輸功率。若是最大傳輸延遲大於保護區間，將使得載波之間失去正交性，ICI 便出現了。因此進行 OFDM 符元同步的動作，必須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。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，以確保 FFT 區間子載波間能維持正交性外，也要必須補償因傳送與接收端的振盪器存在頻率差所造成的頻率偏移，確保子載波間能維持正交性，若頻率偏移補償做的不好，正交性被破壞，同樣會引發 ICI 的問題。

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。

