

IEEE 802.11a 技術文件內容簡介

暨南大學 電機工程研究所

饒敬國

s0323516@ncnu.edu.tw

1 無線區域網路(WLAN)簡介 [1]

成立於 1963 年的 IEEE 組織是 Institute Of Electrical and Electronics Engineers 的簡稱，亦即電氣及電子工程師協會。涵蓋的領域從廣播、通信，到電力、航空宇宙等。擅長各個領域均設有組織。在電腦領域中的區域網路 LAN 以及都會網路 MAN-Metropolitan Area Network，就是 IEEE 802 系列最為有名。而 IEEE 802 之下，設有各個工作小組—Working Group 針對各個主題進行標準化作業。無線區域網路的作業小組，即是 802.11。

IEEE 802 團體的各個工作小組，如下所述：

802.1：LAN 以及 MAN 的基本規格。

802.2：連結層規格。

802.3：乙太網路

802.4：Token Bus。

802.5：Token Ring。

802.6：MAN- Metropolitan Area Network。

802.7：廣帶域廣路。

802.8：光纖通信。

802.9：非同步通信。

802.10：安全性。

802.11：無線網路基本實體層與 MAC 層的規格定義。

802.12：Demand Priority Access Methods。

802.14：Cable TV network。

802.15：WPAN-Wireless Personal Area Network。

802.16：MAN- Metropolitan Area Network。

802.17：Resilient Packet Ring。

而 802.11 又可以再度細分成依據計畫的各個工作小組：

802.11a：定義 5GHz 頻帶，最高 54Mbps 無線網路實體層規格。

802.11b：定義 2.4GHz 頻帶，最高 11Mbps 無線網路實體層規格。

802.11c：定義 MAC Bridge 的規格。目前，轉移至 802.1D。

802.11d：定義目前 802.11 不可以使用國家之方式。

802.11e：以 WhiteCAP 為基礎，延伸 802.11 MAC 層的 QoS 功能。

802.11f：不同製造商 Access Point 之間能夠接續的規格定義。

802.11g：定義 2.4GHz 頻帶，最高 54Mbps 無線網路實體層規格。

802.11h：802.11a 中未納入的動態頻道控制，電力控制得規格定義。維持與歐洲的 HiperLAN 2 得共通性。

802.11i：擴張 802.11 的 MAC 層，定義強化安全機能與認證機構之規格。

我們可以說，802.11 a/b/g 的精華，在於「調變方式」，802.11 e 的精華則在於控制方式的擴張技術。因此，您可以輕易地看出，調變方式可以決定出傳送速度。不論是有線網路還是無線網路的規格，是取決於兩個東西。一個是實體層，另一個就是 MAC-Media Access Control 層。

而 802.11 的規格書，全部由 15 個章節所構成：

- 第一章~第五章：規格概要以及用語解說。
- 第六章~第十一章：MAC 層規格。主要的內容範疇涵蓋存取控制方式、資料匡的種類、資料匡的格式、標頭（Header）的構造等。
- 第十二章起，開始實體層的規格敘述。
- 第十四章~第十五章：定義調變方式。僅僅規範了 1Mbps, 2Mbps 的規格。所以，才會有 802.11 a/b/g 的追加規格。
- 第十六章：也是最後一個章節，則是定義了紅外線無線網路的實體層規格。

因此對於 802.11 a/b 的基本差異，就在於實體層的規格敘述。而所追加的全名分別是：「High Speed Physical layer in The 5GHz Band」與「High Speed Physical layer Extension in The 2.4GHz Band」。兩者均沿用 802.11 中的 MAC 層，因此，我們可以看到：

802.11 規格書：總共 528 頁。

802.11a 規格書：總共 91 頁。成為 802.11 規格的第十七章。

802.11b 規格書：總共 96 頁。成為 802.11 規格的第十八章。

802.11a 與 802.11b：皆是在 1999 年 11 月，由 IEEE 正式認可該規格。

再度強調一次，802.11a 與 802.11b，都是追加了調變方式，來提升速度。802.11b 依然使用 802.11 所使用 2.4GHz 的頻帶，追加了 5.5Mbps 與 11Mbps 的規格。而 802.11a 規格，則跳躍至 5GHz 的頻帶，規定了 6Mbps 54Mbps 等 8 個階段。

2 IEEE 802.11a V.S. Hiperlan2 [4]

在高速的無線區域網路中有兩個主要的標準，一個是歐規的 Hiperlan2；另一個是美規的 802.11a。這兩個規格在 PHY 規格架構上非常相似，不過在歐洲的頻帶規劃上，跟美國所訂定的頻帶雖然都是在 5GHz 的頻帶上，但是其中心頻率卻不盡相同。不過 IEEE 802 和 ESTI 都試著跟 ITU-R 一起推動 WLAN 讓它在全球有共同的一個統一頻帶。

當 IEEE 802.11 工作小組準備提出 802.11a 這個標準時，這個小組採納了 NTT 以及 Lucent 的兩家公司的建議，就是運用正交分頻多工(OFDM)這個技術來當作 WLAN 系統的調變技術。OFDM 會被採納的原因是因為他擁有較強對抗多路徑通道效應的能力(multipath channel fading effect)。

在 IEEE 正在發展出 802.11a 這個標準時，ESTI 也跟著推動了另一個 WLAN 的標準稱為 Hiperlan2，它也同樣採用了 OFDM 的技術。所以基本上 802.11a 和 Hiperlan2 在 PHY 上的差異非常的小，不過在 PHY 的上一層 MAC(Medium Access Control)層，這兩個標準的差異性卻有顯著的不同。

3 IEEE 802.11a 系統介紹

3-1 IEEE 802.11a 頻帶分配

在美國 U-NII (Unlicensed-National Information Infrastructure)這個單位，規劃了 300MHz 的頻帶供給 WLAN 使用。這個頻帶是在 5GHz 到 6GHz 上，但是被分成 Lower and Middle U-NII Band 以及 Upper U-NII Band 兩塊。在歐洲的 WLAN Hiperlan2 在 5~6GHz 的頻帶上總共擁有 455MHz 的頻寬。見圖 1

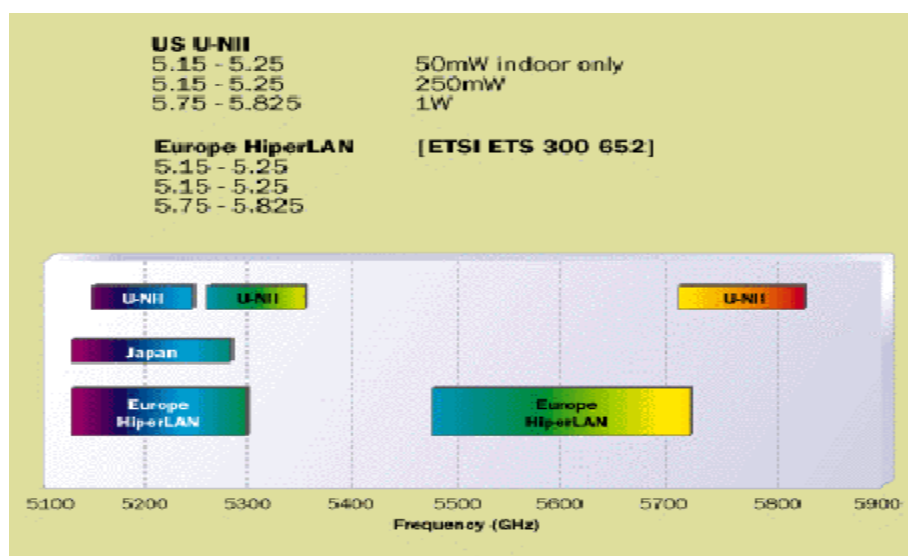


圖 1. 802.11a 和 HiperLan2 頻帶分配圖

802.11a 無線高速區域網路的一個頻道(Channel)寬度是 20MHz，圖 2 清楚的表示了各個頻道在 5GHz 頻帶上的分布情況。FCC-UNII 規定了第一塊 WLAN 的頻帶(Lower and Middle U-NII Band)頻寬有 200MHz，加上第二塊頻帶(Upper U-NII Band)有 100MHz，所以在美國 5GHz 的 WLAN 總共擁有 300MHz 的頻寬可用。

在第一塊 Lower and Middle U-NII Band 上配置了八個頻道，值得注意的是最左和最右兩個頻道的中心頻率 U-NII 規定了必須距離下邊帶邊緣(5150MHz)和上邊帶邊緣(5350MHz)各 30MHz，這主要是為了避免干擾到其他頻帶上的系統。而在第二塊 Upper U-NII Band 上則配置了四個頻道，跟第一塊不同的是兩旁的頻道中心頻率只需距各邊帶 20MHz 即可。

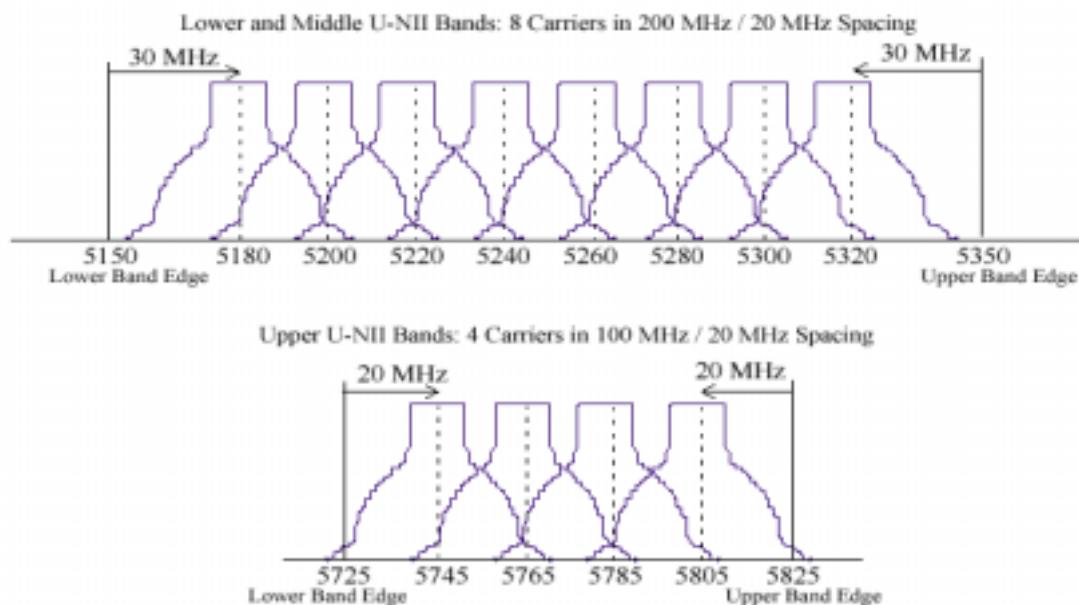


圖 2. IEEE 802.11a 頻道分配圖

3-2 OFDM 系統架構

在 802.11a 的系統中跟其他傳統單載波調變系統最大的不同就是它採用了多載波調變系統(multi-carrier modulation)，也就是 OFDM 系統。整個 OFDM 系統的大概架構可以在圖 3 中了解大致的系統方塊圖。除了(解)調變器是以 FFT 和 IFFT 這部分不同外，其它像是 FEC encoder 或是 Interleaver 等元件，大致都跟傳統系統相同，在下面我會有更清楚的介紹。

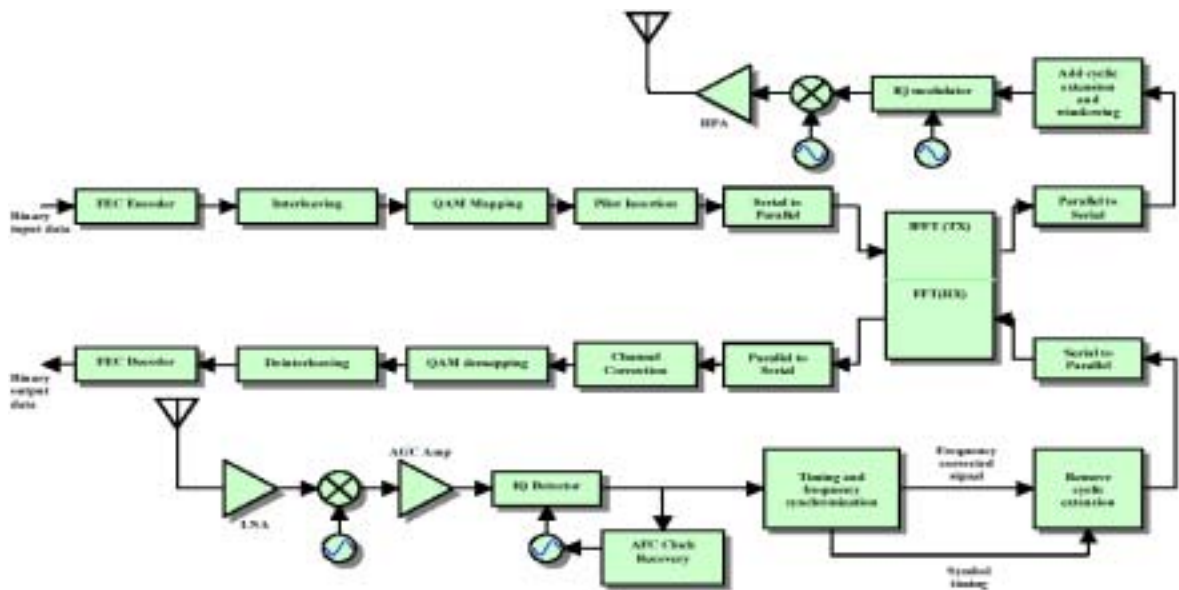


圖 3. OFDM 系統架構圖

3-2.1 OFDM 系統原理 [3]

OFDM 顧名思義就是利用一連串的正交載波來傳送信號，因為相互正交的載波不會互相干擾，因此可以載送很高的資料量。再來因為相同頻寬下每個子載波的 main lobe spacing 相對的變小了，如此在多路徑通道下造成的頻率選擇性衰減對於每一個子載波來說，都可看成一個振幅大小上的改變，對整個子載波的相位影響不大。圖 2-4 是正交載波的示意圖。

可是當這些互相正交的載波個數越多時，容易發生的現象是如果接收器的頻率沒有跟傳送端同步時，那麼載波間的正交性便不存在了，這麼 ICI 的問題便產生了。這是影響 OFDM 系統效能最大的一個問題。而要產生這些相互正交的載波我們現在可以利用 IFFT 來達到一組正交的載波。

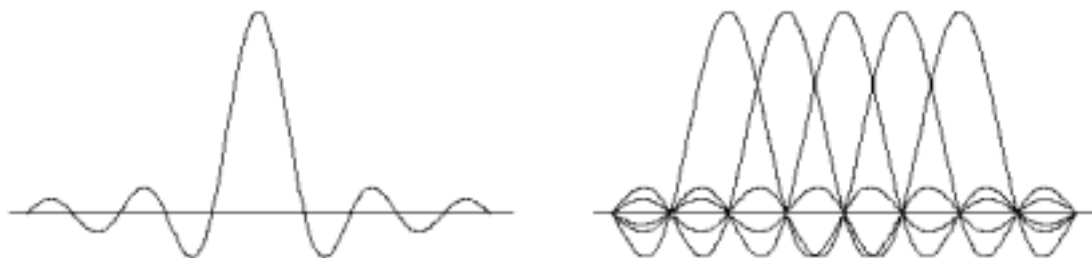


圖 4. (a) 單載波頻譜 (b) 正交多載波頻譜

3-2.2 保護區間(Guard Interval or Cyclic Prefix)

由於 OFDM 系統採用了 IFFT 以及 FFT 作為調變解調的電路，因此為了防止因為通道響應的關係使得每個 OFDM symbol 間的干擾現象(ISI)，於是必須要在兩個相鄰 OFDM symbol 間插入一段循環前置區段(cyclic prefix ; CP)。而 CP 的長度為 T_g ，這個長度必須大於通道的 delay spread 長度才不會產生 ISI 的現象。有關 CP 的運作方式可以參考圖 5。

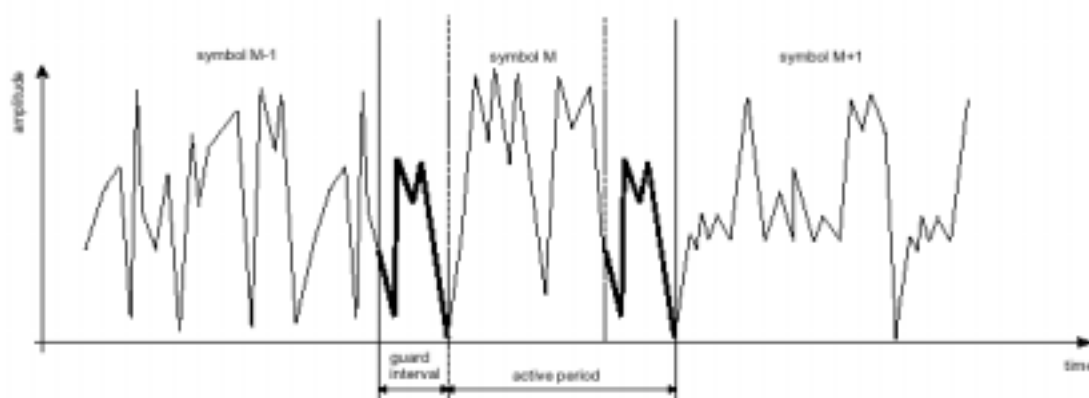


圖 5. Guard Interval 示意圖

3-2.3 Windowing [2]

由於 OFDM 的訊號是由許多的 QAM 子載波所組成，而每個載波在頻域上看來都是一個 sinc 函數，因此在 OFDM 頻譜外邊帶(out-of-band)的能量會衰減得很慢，這容易對旁邊的頻道造成干擾。因此通常我們會在 OFDM 信號上做 window 的動作，讓每個載波的能量盡量集中在 main lobe 上並且讓 side lobe 的能量減少。

Windowing 的另一主要作用就是之前我們提到的 ICI 對系統產生的影響，利用 window 讓 side lobe 能量減少的緣故，這會使得 ICI 的效應降低，增加系統的穩定度。802.11a 中所使用的 window function 如下式表示：

$$w_T(t) = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0.5 + \frac{t}{T_{IR}}\right)\right) & \text{for } \left(-\frac{T_{IR}}{2} < t < \frac{T_{IR}}{2}\right) \\ 1 & \text{for } \left(\frac{T_{IR}}{2} \leq t < T - \frac{T_{IR}}{2}\right) \\ \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\left(0.5 - \frac{t-T}{T_{IR}}\right)\right) & \text{for } \left(T - \frac{T_{IR}}{2} \leq t < T + \frac{T_{IR}}{2}\right) \end{cases}$$

其中 T 是兩個相鄰 OFDM symbol 間的 transition time，如下圖 6 所示

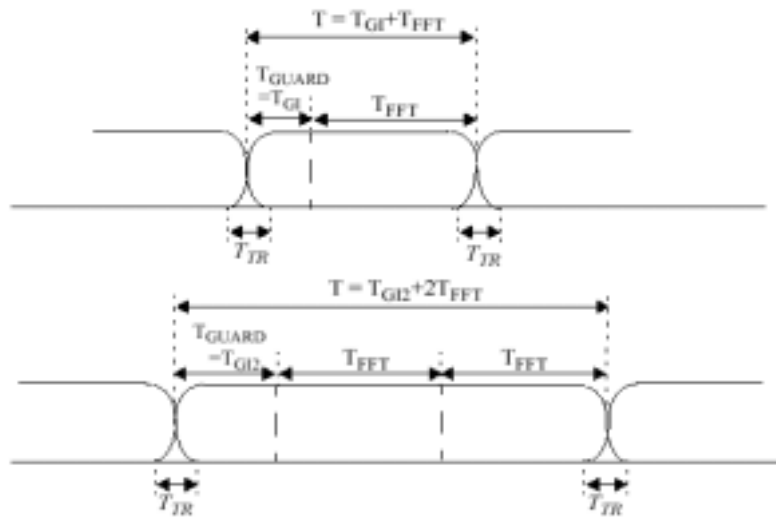


圖 6. 加入 CP 以及 window 的 OFDM symbol 示意圖

Window function 以離散時間的表示法如下：

$$w_T[n] = w_T(nT_S) = \begin{cases} 1 & 1 \leq n \leq 79 \\ 0.5 & 0, 80 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

上式的 n 為 OFDM 的 sample 數，802.11a 的一個 symbol 有 80 個 sample。

3-2.4 Scrambler

Scrambler 的功能是將輸入信號打亂，可以使輸出的信號零與一的一個數幾乎相同讓信號具有隨機性。如此可以模擬出一個假隨機的信號，並且可以方便系統取出時序。在 802.11a 的 Frame 中的 Data field (下一章節我會有詳細的說明)，便需要使用一個 scrambler 來做資料打亂的工作。

而資料隨機的度可以根據 scrambler 的產生多項式(Generator Polynomial)

來決定，此多項式次數越高資料隨機程度也越高。802.11a 所使用的 generator polynomial 為 $X^7 + X^4 + 1$ 。圖 7 為 802.11a 所使用的 scrambler。

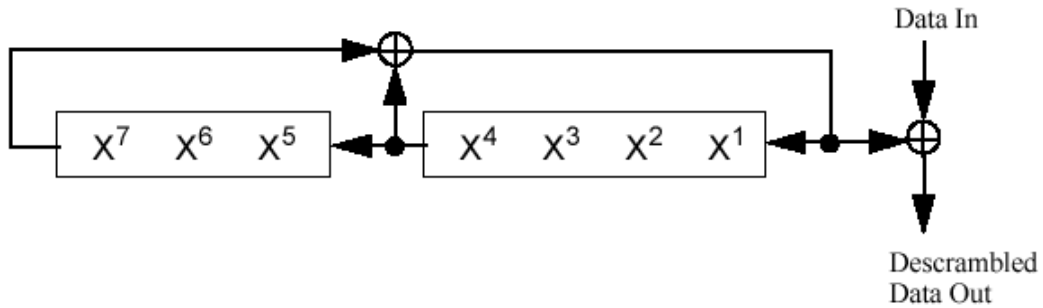


圖 7. Data scrambler

3-2.5 Convolutional Encoder

在錯誤更正碼(Forward Error Correction Code ; FEC)的部分，802.11a 採用了 convolutional code 作為其標準的 FEC。此 convolution code 採用一般業界的標準的 generator polynomial， $g_0 = 133_8$ 以及 $g_1 = 171_8$ ，code rate 為 1/2 的編碼法。在解碼的部分，一般常用的解碼方法是利用 Viterbi algorithm 來進行解碼。Convolutional Encoder 的架構如圖 8 所示。

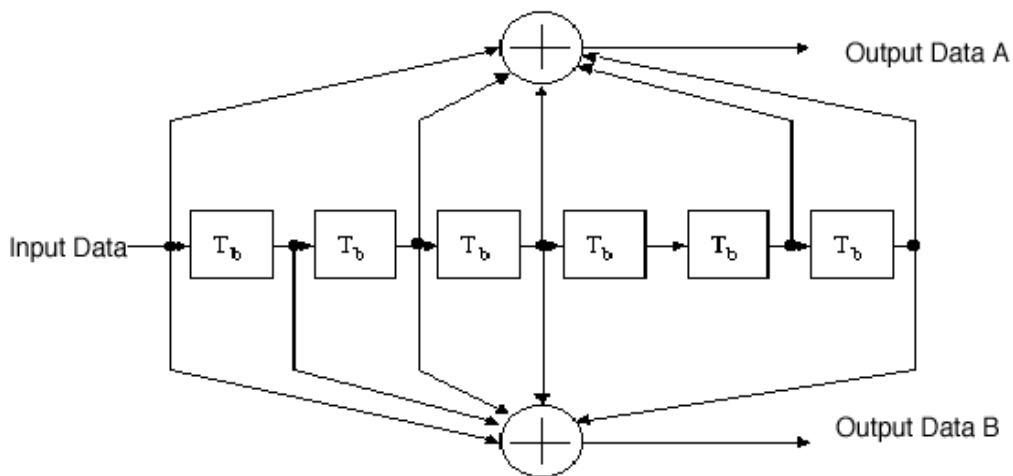


圖 8. Convolutional Encoder (k=7)

根據上圖，編碼出來的 bit 要先取上面資料 A 的輸出，在來才是取資料 B 的輸出，因此 $R = 1/2$ 。而 802.11a 所提供的 R 有 $1/2$ 、 $2/3$ 和 $3/4$ 三種，另外兩種 code rate 的取得需用”puncturing”的方式取得。

Puncturing 就是把 convolutional encoder 編碼出來的 bits 進行取捨，把某些 bits 捨去，只留下一部份的 bits，如此 coding rate 便增加了。使用 Puncturing 電路的好處是可以在不改變傳送端的 convolution encoder 和接收端 Viterbi decoder 硬體架構的情況下，就可以有不同的 code rate，如此跟再去設計另一組不同碼率的編碼和解碼電路相比，可以大幅度的降低電路複雜度。而在效能的比較上，只大約相差約 2dB 的差距。以這 2dB 的效能去換取大量降低電路的複雜度，以硬體設計的角度而言是划算的。

IEEE 802.11a 的 puncturing pattern 可以參考圖 9、圖 10。

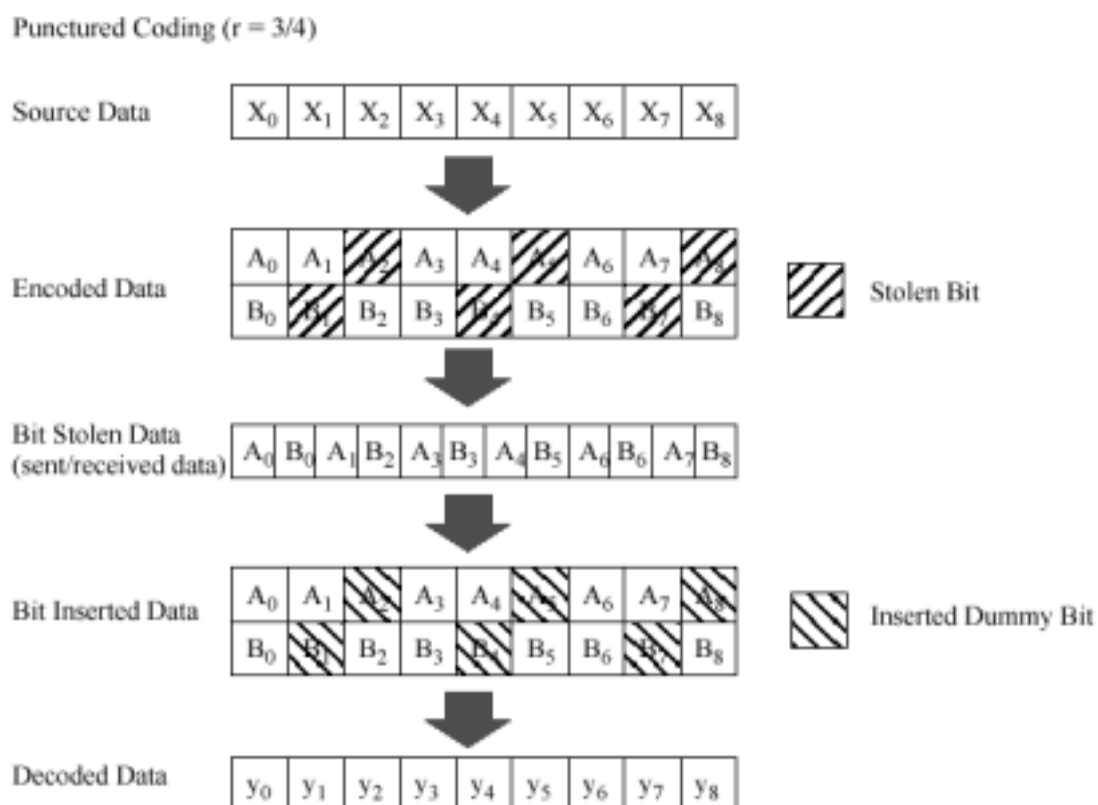


圖 9. Puncturing Pattern ($R = 3/4$)

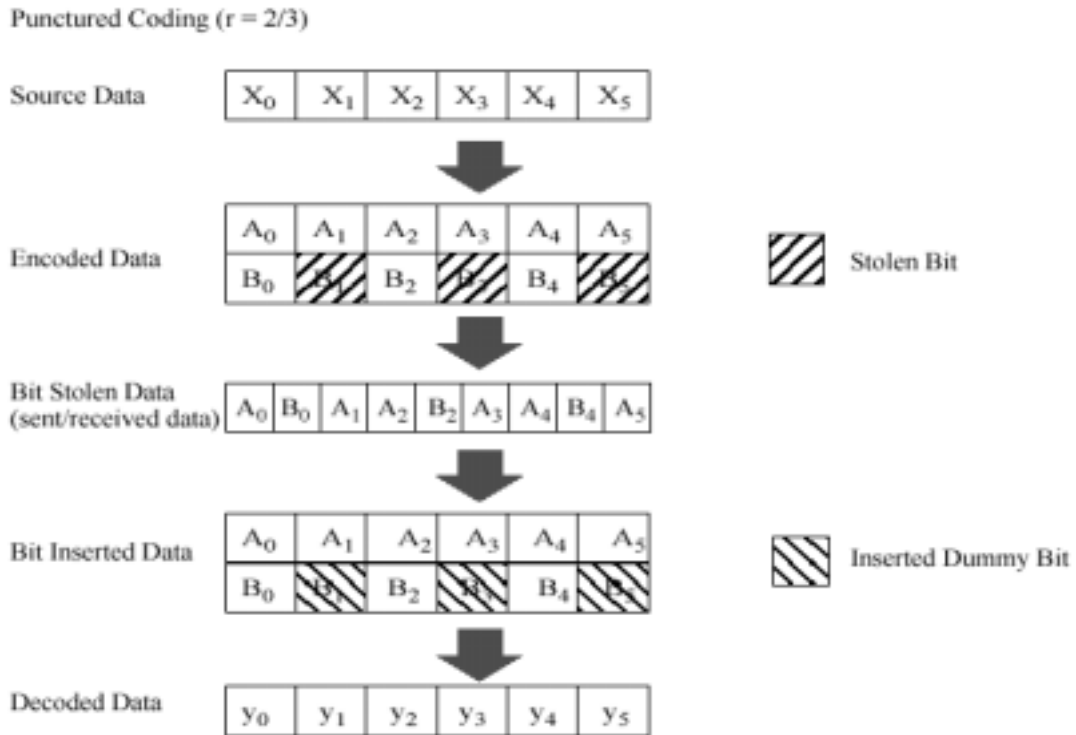


圖 10. Puncturing Pattern ($R = 2/3$)

3-2.6 Interleaver

經過 Convolutional encoder 編碼出來的 bits，為了讓它的效能發揮的更好，通常都會在其後加一個 interleaving 電路稱為"Interleaver"。Interleaver 的功用就是把所輸入的 bits 打散，讓前後相鄰的 bits 散佈在不同的位置，如此每個兩兩相鄰的 bits 便可以視為是互相獨立(independent)，這對於對抗通道造成的 burst error 效應有很好的效果。

在 IEEE 802.11a 裡 Interleaver 的設計方式會因為不同的碼率(R 為 $1/2$ 、 $2/3$ 或 $3/4$)以及不同的調變方式(BPSK、QPSK、16~64QAM)的不同而改變。這是因為這些參數的不同，皆會使得每個 OFDM 符元所傳送編碼後的位元(coded bits per OFDM symbol)有變化。它所設計的 interleaver 方式有兩步驟，第一步驟可以保證每一個相鄰的 coded bit 均可以對應到不相鄰的子載波上傳送出去；第二步驟可以保證相鄰的兩個 coded bits 在 mapping 到 QAM 星座圖上的符元時，可交替的對應到各符元的"less and more significant bit"，這樣可以讓各個位置的 bit 都具有相等重要性以及公平性，以避免有某些位置的 bit 的可靠度(reliability)相較於其他的位置來的低。

以下我們以 IEEE 802.11a 中傳送速率為 24Mbps 為例來說明 Interleaver 的設計方式。在 24Mbps 時參考表 2 的傳輸速率參數，可知每個 OFDM 符元可以傳送的 coded bits 為 192 個，所以 interleaving 第一步驟先將這 192 個 bits 依序排入一個 12x16 的 interleaving table 如圖 11 所示。

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 | c10 | c11 | c12 | c13 | c14 | c15 | c16 |
| c17 | c18 | c19 | c20 | c21 | c22 | c23 | c24 | c25 | c26 | c27 | c28 | c29 | c30 | c31 | c32 |
| c33 | c34 | c35 | c36 | c37 | c38 | c39 | c40 | c41 | c42 | c43 | c44 | c45 | c46 | c47 | c48 |
| c49 | c50 | c51 | c52 | c53 | c54 | c55 | c56 | c57 | c58 | c59 | c60 | c61 | c62 | c63 | c64 |
| c65 | c66 | c67 | c68 | c69 | c70 | c71 | c72 | c73 | c74 | c75 | c76 | c77 | c78 | c79 | c80 |
| c81 | c82 | c83 | c84 | c85 | c86 | c87 | c88 | c89 | c90 | c91 | c92 | c93 | c94 | c95 | c96 |
| c97 | c98 | c99 | c100 | c101 | c102 | c103 | c104 | c105 | c106 | c107 | c108 | c109 | c110 | c111 | c112 |
| c113 | c114 | c115 | c116 | c117 | c118 | c119 | c120 | c121 | c122 | c123 | c124 | c125 | c126 | c127 | c128 |
| c129 | c130 | c131 | c132 | c133 | c134 | c135 | c136 | c137 | c138 | c139 | c140 | c141 | c142 | c143 | c144 |
| c145 | c146 | c147 | c148 | c149 | c150 | c151 | c152 | c153 | c154 | c155 | c156 | c157 | c158 | c159 | c160 |
| c161 | c162 | c163 | c164 | c165 | c166 | c167 | c168 | c169 | c170 | c171 | c172 | c173 | c174 | c175 | c176 |
| c177 | c178 | c179 | c180 | c181 | c182 | c183 | c184 | c185 | c186 | c187 | c188 | c189 | c190 | c191 | c192 |

圖 11. 第一步驟的 Interleaving Table

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| c1 | c2 | c3 | c4 | c5 | c6 | c7 | c8 | c9 | c10 | c11 | c12 | c13 | c14 | c15 | c16 |
| c17 | c18 | c19 | c20 | c21 | c22 | c23 | c24 | c25 | c26 | c27 | c28 | c29 | c30 | c31 | c32 |
| c33 | c34 | c35 | c36 | c37 | c38 | c39 | c40 | c41 | c42 | c43 | c44 | c45 | c46 | c47 | c48 |
| c49 | c50 | c51 | c52 | c53 | c54 | c55 | c56 | c57 | c58 | c59 | c60 | c61 | c62 | c63 | c64 |
| c65 | c66 | c67 | c68 | c69 | c70 | c71 | c72 | c73 | c74 | c75 | c76 | c77 | c78 | c79 | c80 |
| c81 | c82 | c83 | c84 | c85 | c86 | c87 | c88 | c89 | c90 | c91 | c92 | c93 | c94 | c95 | c96 |
| c97 | c98 | c99 | c100 | c101 | c102 | c103 | c104 | c105 | c106 | c107 | c108 | c109 | c110 | c111 | c112 |
| c113 | c114 | c115 | c116 | c117 | c118 | c119 | c120 | c121 | c122 | c123 | c124 | c125 | c126 | c127 | c128 |
| c129 | c130 | c131 | c132 | c133 | c134 | c135 | c136 | c137 | c138 | c139 | c140 | c141 | c142 | c143 | c144 |
| c145 | c146 | c147 | c148 | c149 | c150 | c151 | c152 | c153 | c154 | c155 | c156 | c157 | c158 | c159 | c160 |
| c161 | c162 | c163 | c164 | c165 | c166 | c167 | c168 | c169 | c170 | c171 | c172 | c173 | c174 | c175 | c176 |
| c177 | c178 | c179 | c180 | c181 | c182 | c183 | c184 | c185 | c186 | c187 | c188 | c189 | c190 | c191 | c192 |

圖 12. 第二步驟 Table 偶數行交換的動作

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| c1 | c18 | c3 | c20 | c5 | c22 | c7 | c24 | c9 | c26 | c11 | c28 | c13 | c30 | c15 | c32 |
| c17 | c2 | c19 | c4 | c21 | c6 | c23 | c8 | c25 | c10 | c27 | c12 | c29 | c14 | c31 | c16 |
| c33 | c50 | c35 | c52 | c37 | c54 | c39 | c56 | c41 | c58 | c43 | c60 | c45 | c62 | c47 | c64 |
| c49 | c34 | c51 | c36 | c53 | c38 | c55 | c40 | c57 | c42 | c59 | c44 | c61 | c46 | c63 | c48 |
| c65 | c82 | c67 | c84 | c69 | c86 | c71 | c88 | c73 | c90 | c75 | c92 | c77 | c94 | c79 | c96 |
| c81 | c66 | c83 | c68 | c85 | c70 | c87 | c72 | c89 | c74 | c91 | c76 | c93 | c78 | c95 | c80 |
| c97 | c114 | c99 | c116 | c101 | c118 | c103 | c120 | c105 | c122 | c107 | c124 | c109 | c126 | c111 | c128 |
| c113 | c98 | c115 | c100 | c117 | c102 | c119 | c104 | c121 | c106 | c123 | c108 | c125 | c110 | c127 | c112 |
| c129 | c146 | c131 | c148 | c133 | c150 | c135 | c152 | c137 | c154 | c139 | c156 | c141 | c158 | c143 | c160 |
| c145 | c130 | c147 | c132 | c149 | c134 | c151 | c136 | c153 | c138 | c155 | c140 | c157 | c142 | c159 | c144 |
| c161 | c178 | c163 | c180 | c165 | c182 | c167 | c184 | c169 | c186 | c171 | c188 | c173 | c190 | c175 | c192 |
| c177 | c162 | c179 | c164 | c181 | c166 | c183 | c168 | c185 | c170 | c187 | c172 | c189 | c174 | c191 | c176 |

圖 13. 最後完成的 Interleaving Table

第二步驟的做法就是將第一步驟所排好 12x16 Table 偶數行的位元做兩兩相互交換的動作，如圖 12 所示。這兩個步驟做完之後就會是最後所設計出來的 Interleaving Table，如圖 13 所示。這裡要特別提醒各位的就是這個例子是以 24Mbps 的參數所舉的例子，所以如果改成 48Mbps 的例子則此 Interleaving Table 將會是一個 18x16 的 Table，而第二步驟的換方式也將會有所改變。

4 802.11a 系統參數及特色

802.11a 的 OFDM 系統是採用 64 點的 IFFT 作為其調變器(modulator)，因此會有 64 個正交的子載波(subcarrier)，又因為 802.11a 的每一個頻道的頻寬為 20MHz 因此，每個載波間距(subcarrier spacing)為 $20\text{MHz} \div 64 = 312.5\text{KHz}$ 。這個數字意味著每個 subcarrier spacing 很大，相對的每個 OFDM 符碼週期(symbol period)很短。因此在 802.11a 這個系統設計上，OFDM 系統令人詬病的頻率偏移(frequency offset)產生載波間干擾 ICI(Intercarrier Interference)的問題沒有那麼的嚴重。但是相對的，它對於多路徑的頻率選擇性衰減效應(frequency selective fading)的對抗能力就沒那麼的強了。

雖然 64 點的 IFFT 可以產生 64 個 subcarrier,但為了避免頻率偏移對旁邊的頻道造成干擾,所以 64 個 subcarrier 裡面左邊有 6 個而右邊會有 5 個虛載波(virtual carrier)也就是不送信號的載波作為保護帶(guard band)。另外在 DC 上的載波也不送信號,因此總共有 $64-5-6-1=52$ 個子載波有送資料。不過在這 52 個載波裡其中又有 4 個子載波要送 pilot,所以 802.11a 真正送資料的載波個數只有 48 個而已。見表 1 裡面有詳細的說明。

這 48 個子載波可以依據所需資料傳送率的不同,有不同的調變方式如 BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM,這四種調變方式配不同的 convolutional encoder coding rate 可以有 6 ~ 54 Mbits/s 八種資料傳送速率的組合。在 802.11a 標準中,傳送資料率 6、12 以及 24Mbits/s 是一定要有的規格,其它更高速率的要求是可選擇性地採用。見表 2

| Parameter | Value |
|--|--|
| N_{SD} : Number of data subcarriers | 48 |
| N_{SP} : Number of pilot subcarriers | 4 |
| N_{ST} : Number of subcarriers, total | 52 ($N_{SD} + N_{SP}$) |
| Δ_f : Subcarrier frequency spacing | 0.3125 MHz (=20 MHz/64) |
| T_{FFT} : IFFT/FFT period | 3.2 μ s ($1/\Delta_f$) |
| $T_{PREAMBLE}$: PLCP preamble duration | 16 μ s ($T_{SHORT} + T_{LONG}$) |
| T_{SIGNAL} : Duration of the SIGNAL BPSK-OFDM symbol | 4.0 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$) |
| T_{GI} : GI duration | 0.8 μ s ($T_{FFT}/4$) |
| T_{GI2} : Training symbol GI duration | 1.6 μ s ($T_{FFT}/2$) |
| T_{SYM} : Symbol interval | 4 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$) |
| T_{SHORT} : Short training sequence duration | 8 μ s ($10 \times T_{FFT} / 4$) |
| T_{LONG} : Long training sequence duration | 8 μ s ($T_{GI2} + 2 \times T_{FFT}$) |

表 1. 802.11a 時間參數

| Data rate (Mbits/s) | Modulation | Coding rate (R) | Coded bits per subcarrier (N_{BPSK}) | Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS}) | Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS}) |
|---------------------|------------|-----------------|--|---|--|
| 6 | BPSK | 1/2 | 1 | 48 | 24 |
| 9 | BPSK | 3/4 | 1 | 48 | 36 |
| 12 | QPSK | 1/2 | 2 | 96 | 48 |
| 18 | QPSK | 3/4 | 2 | 96 | 72 |
| 24 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 192 | 96 |
| 36 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 192 | 144 |
| 48 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 288 | 192 |
| 54 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 288 | 216 |

表 2. 802.11a 傳輸速率參數

5 IEEE 802.11a 實體層與 Frame 結構 [2]

在一般的網路架構中，我們會用 OSI 的七層定義來區分每一層的功能。而 PHY 就是這些定義中的最底層，也就是所謂的硬體架構，在 PHY 中所看到的訊號就是最基本的 0 與 1 的數位信號。PHY 這一層的功用便是將我們要送的二位元數位資料經過一些編碼和調變的程序，轉換成電氣訊號後再透過 RF 射頻電路傳送出去。

而 PHY 的再上一層便是所謂的 MAC layer (Medium Access Control Layer)，這一層的功用是用來控制 PHY 層的工作方式。舉例來說像是當整個系統需要較大的資料傳送率時，便要透過 MAC 來控制 PHY 的調變或者編碼方式，來調整傳送率。因此我們需要定義一種能夠使 MAC 和 PHY 這兩層溝通的機制來讓 MAC 的資訊傳達給 PHY。

現在我們討論的 IEEE 802.11a 的 PHY 層包含兩種協定功能：

(1). PMD system function：

PMD (physical medium dependent) system 的功用就是在無線的環境裡，傳送

或接收來自不同基地台資料的系統。簡單來說就是一般我們所謂的 OFDM 傳收機(transceiver)。

(2). PHY convergence function :

這個功能比較抽象，它就是利用 physical layer convergence procedure (PLCP) 就是讓一的符合 IEEE 802.11 的 PHY service data units (PSDU；這就是真正要傳送的資料)能夠型成一種 frame 格式，這種 frame 格式是能夠在不同基地台間利用 OFDM PMD system 傳送接收的格式。

所以剛剛我們談到了有什麼機制能夠讓 MAC 跟 PMD 間連結起來？就是用 PLCP 讓它們之間能夠相互溝通。PLCP 裡面在 802.11a 中定義了什麼，我會在下面幾節中有詳細的介紹。

5-1 IEEE 802.11a frame format

當我們以 802.11a 這個無線區域網路系統來傳送資料(PSDU)時，必須先將 PSDU 資料的前後加上一些可以讓 MAC 層識別的資料，或是增加系統功能穩定度的資料，型成一個屬於 802.11 特有的傳輸資料結構，我們稱之為 802.11a 的”frame format”。

這個 frame format 大略來說包括三個部分：參考圖 14

- (1). PLCP Preamble
- (2). Signal Field
- (3). Data Field

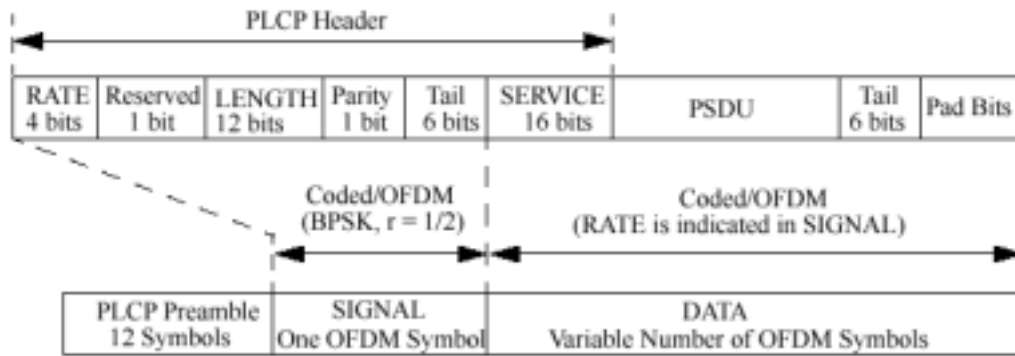


圖 14. 802.11a frame format

這三個部分在後面幾節會有清楚的說明，這裡我先概略的說明一下。PLCP preamble 裡面所傳送的是一些可以幫助整個系統同步的資料，利用這些可以使得系統的穩定可靠度增加。

Signal field 裡面包含的就是 PLCP header。而 PLCP header 的內容就是讓系統的 MAC 層能夠控制及告知 PMD 現在系統所需工作的狀態。因此 PLCP header 的內容有：LENGTH (12 個 bits)、RATE (4 個 bits)、Reserved bit (1 個 bit)、Parity bit (1 個 bit)、Tail bit (6 個 bits)、SERVICE (16 個 bits)。

其中要注意的是 SERVICE 雖然是屬於 PLCP header 但是因為 Signal field 只佔了一個 OFDM symbol 所以 SERVICE bits 放不進 Signal field 中，因此 SERVICE 是屬於 DATA field 中傳送。在圖 14 中可以很清楚明白。

Data field 則包括了 SERVICE (16 bits)、Tail (6 bits)、Pad bits 以及 PSDU (真正需要傳送的資料)。

5-2 Preamble

在一個以 OFDM 為調變架構的系統如 802.11a，對於頻率偏移(frequency offset)是很敏感的。這個頻率偏移造成的原因主因有兩個，第一是因為傳送端的頻率震盪器(oscillator)和接收端的頻率震盪器沒有相同頻率所造成。第二是因為 mobile 端的移動造成都卜勒效應(Doppler Effect)，因為頻率偏移對 OFDM 系統會

產生 ICI，這會使得系統效能大幅降低，因此解決頻率偏移的問題對於 802.11a 等 OFDM 的傳輸系統相當地重要。

在 802.11a 的系統裡，它是採用了 training sequence 的方式來達到頻率同步的目的。它的做法就是在要傳輸真正的資料前先送一段 training sequence 也就是我現在要介紹的 preamble，利用 preamble 在接收端可以偵測出現在頻率的偏移量是多少，再將它予以更正。

Training sequence 的設計方法有很多種，在 802.11a 裡它是把 training sequence 分成兩個部分，第一部份是 short sequence，裡面包含了 10 個相同的小 symbol，而這 10 個小 symbol 可以對 burst mode 的系統作 frame synchronization 以及對頻率粗調(coarse synchronization)。

第二部分是 long sequence，裡面則包含了 2 個相同較長的 symbol。這個 long sequence 可以做通道預估(channel estimation)以及對頻率部分做細調的動作(fine synchronization)。圖 15 可以看出整個 802.11a 的 frame 結構，以及 10 個 short 和 2 個 long sequence 的長度和時間表示。

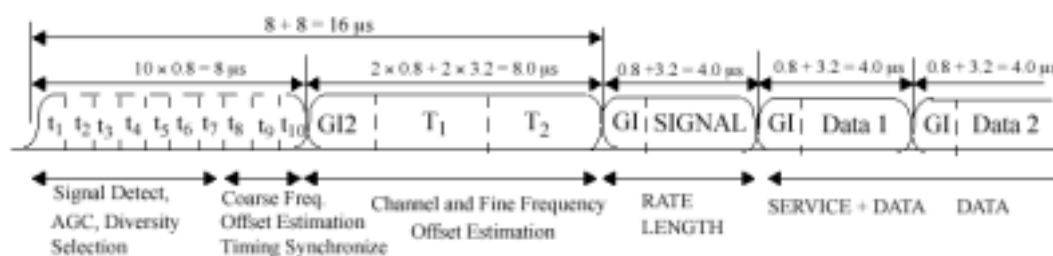


圖 15. 802.11a training sequence 及 frame 結構圖

至於為什麼 short sequence 可以做較大範圍的頻率偏移預估(frequency estimation)，而 long sequence 能做較小較精準的頻率預估，這是因為頻率偏移預估的範圍跟兩兩相同 symbol 間的時間長度有關，預估頻率跟時間長度的關係是等於 $\pm 1/T$ 。因此 short sequence 可估測頻率的範圍為

$$r_{\text{SHORT}}(t) = w_{\text{TSHORT}}(t) \sum_{k=-N_{\text{ST}}/2}^{N_{\text{ST}}/2} S_k \exp(j2\pi k \Delta_F t)$$

其中 $W(t)$ 是 window function 我們在上一章已有介紹。在做一次 IFFT 之後會有 4 的相同的 symbol，每個 symbol 有 16 個數值。又在 IFFT 後我們還會有加 CP 的動作，所以每作一次 IFFT 週期可以產生 5 個 short sequence 的小 symbol。因此一個完整的 short sequence 我們需要兩的 IFFT 週期才可產生 10 的 short symbol。註：一次 IFFT 的週期為 $3.2 \mu \text{ sec}$ ，而 CP 是使用 $1/4$ IFFT 週期。

5-2.2 Long preamble 的做法

Long training sequence 的做法跟上一節 short sequence 的做法相似。Long sequence 是要產生 2 個相同的 long symbol，並且有一個長度為 $1.6 \mu \text{ sec}$ 的 guard interval (GI2)。相對於 short sequence 的序列 $S_{-26,26}$ ，long sequence 也有一個 $L_{-26,26}$ 的序列表示如下：

$$L_{-26,26} = \{1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 0, \\ 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1\}$$

此序列經過 IFFT 之後的輸出為：

$$r_{\text{LONG}}(t) = w_{\text{TLONG}}(t) \sum_{k=-N_{\text{ST}}/2}^{N_{\text{ST}}/2} L_k \exp(j2\pi k \Delta_F (t - T_{\text{GI2}}))$$

同樣地，一個 long sequence 也需要 2 個 IFFT 的週期來產生，而且 CP 同樣也是 $1/4$ 的 IFFT 週期。但是這裡需要注意的是 long sequence 的 CP 的加入方法並不像

一般 IFFT 之後就把後面 OFDM symbol 的 1/4 複製的前面去，它是要先產生一個長為 $1.6 \mu\text{sec}$ 的 CP 之後接著才是產生 2 的相同的 long symbol。有關 long sequence 的更詳細例子請參考 IEEE 802.11a Standard 的 Annex G。

5-2.3 802.11a 的 IFFT 調變方法

OFDM 在做 IFFT 調變時每個 subcarrier 對應的都是一個 QAM 的 mapping 數值，而在 802.11a 中它有自己的特殊的 subcarrier 的對應方式，跟我們平常習慣按照 QAM mapping 順序對應的方式不同。802.11a IFFT 的各個 subcarrier 對應 QAM mapping 方式如圖 16 所示。

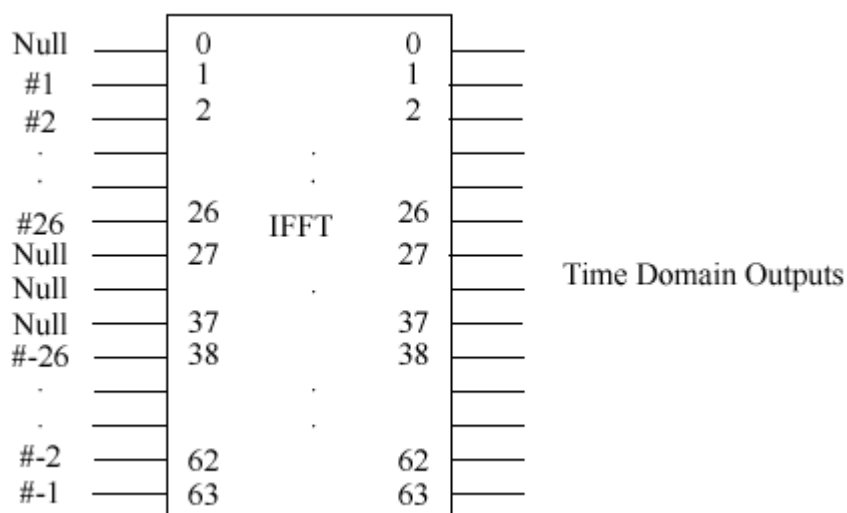


圖 16. 802.11a 中 IFFT 各子載波對應方式

在上圖中 Null 表示的是傳送 $0+0j$ 的 QAM symbol，也就是不傳送資料的意思。所以可以看出在 subcarrier 為 0 也就 DC 的地方，802.11a 就是不傳送資料。在第 27 到 37 中有 11 個 subcarrier 不傳送資料，這就 802.11a 的保護頻帶(guard band)，所以可以知道 64 個 subcarrier 裡面左邊和右邊各有 6 個和 5 個 guard band，作用是降低對旁邊頻道(channel)的干擾。還有一個在 DC 的 subcarrier 也不能傳送資料，所以只有 52 個 subcarrier 有在傳資料。但是在這 52 個裡面其中又必須

利用 4 個來送 pilot 信號以利系統作通道預估(channel estimation)以及同步，所以真正有在送資料的只有 48 個 subcarrier。下圖 17 可以很清楚的說明 802.11a 中各個 subcarrier 的分布情形。

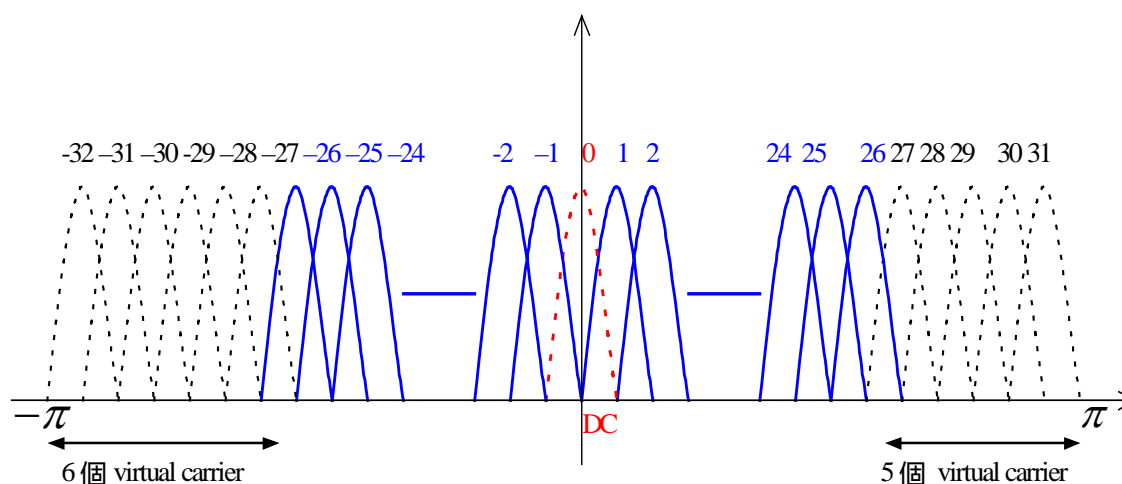


圖 17. 802.11a 子載波分布示意圖

至於“為什麼 DC 上的子載波不傳送資料？”，這個問題在 802.11a 的 standard 中有用一句話來說明”To avoid difficulties in D/A and A/D converter offsets and carrier feed through in the RF system, the subcarrier falling at DC (0th subcarrier) is not used.”

因此在上兩節說明如何產生 short 以及 long sequence 時所說的 IFFT 都一定要使用本節說明的 802.11a 規定的 IFFT 子載波對應規則。

5-3 Signal field

這一節要介紹的就是 signal field, 在 signal field 裡面包含了 MAC 層和 PMD 溝通的 PLCP header, PLCP header 在 signal field 裡面有 LENGTH, RATE, Reserved bit, Parity bit, Tail bit, SERVICE 四種控制訊號。它們傳送的順序和 bit 個數可以在圖 18 中有清楚的表示。以下會一一將他們的功用作一個簡單的大略介紹。

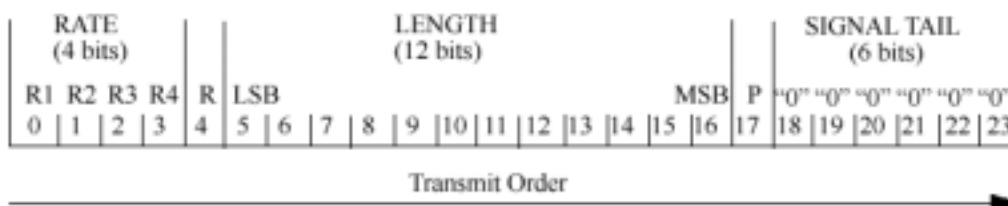


圖 18. Signal field 的 bit 分配圖

5-3.1 Data rate (RATE)

因為高速無線區域網路 802.11a 的資料傳送率有 6、9、12、18、24、36、48、54Mbps/sec 八種選擇，當 MAC 層要控制 PHY 層目前系統想要傳送的資料率時，就需利用 RATE 來告知 PHY。

RATE 這個控制訊號使用了 4 個 bits 來表示這八個系統資料速率，由表 3-1 可以知道 RATE 的定義。

| Rate (Mbits/s) | R1-R4 |
|----------------|-------|
| 6 | 1101 |
| 9 | 1111 |
| 12 | 0101 |
| 18 | 0111 |
| 24 | 1001 |
| 36 | 1011 |
| 48 | 0001 |
| 54 | 0011 |

表 3-1. RATE field 的定義內容

5-3.2 PLCP length field (LENGTH)

當 802.11a 傳輸系統傳輸資料時，在 5-1 節中說明的 802.11a frame 裡面傳送資料 PSDU 的長度是多少呢？PLCP length field (LENGTH)用了 12 個 bits 定義了 PSDU 的傳送數目。當傳送或接收資料時，PHY 和 MAC 間就是以 LENGTH 所指示的數目來得知所要傳送 PSDU 的大小長度。

5-3.3 Parity (P), Reserved (R), 以及 Signal tail (SIGNAL TAIL)

在 signal field 中有 24 個 bits 其中 Bit 4 (第 5 個 bit)是 reserved bit，這個 bit 事先預留下來以供未來有需要時才使用的，所以 default 值我們預設為”0”。

Parity (P)也就是 Bit 17 (第 18 個 bit)的作用是前面 16 個 bits 的 even parity check bit。

SIGNAL TAIL 是 bits 18 ~ 23，這 6 個 bits 規定必須要設為”0”，作用是把 convolutional encoder 的狀態(states)設為 0。

5-3.4 SIGNAL field 的產生方法

因為 signal field 所傳送的是 MAC 層對 PHY 層的溝通資料，因此這 24 個 bits 的重要性相對於其它的 bits 有較高的重要性。因此 802.11a 中規定了 signal field 的傳送必須只能用 BPSK 調變，並且 convolutional encoder 的 code rate 為 1/2。

Signal field 信號的編碼步驟依序為 convolutional encoding，interleaving，BPSK mapping，pilot insertion，OFDM modulation。下圖 19 有 signal field 更詳細的產生過程說明。(Signal field 需一個 OFDM symbol 來傳送這 24 個 bits)

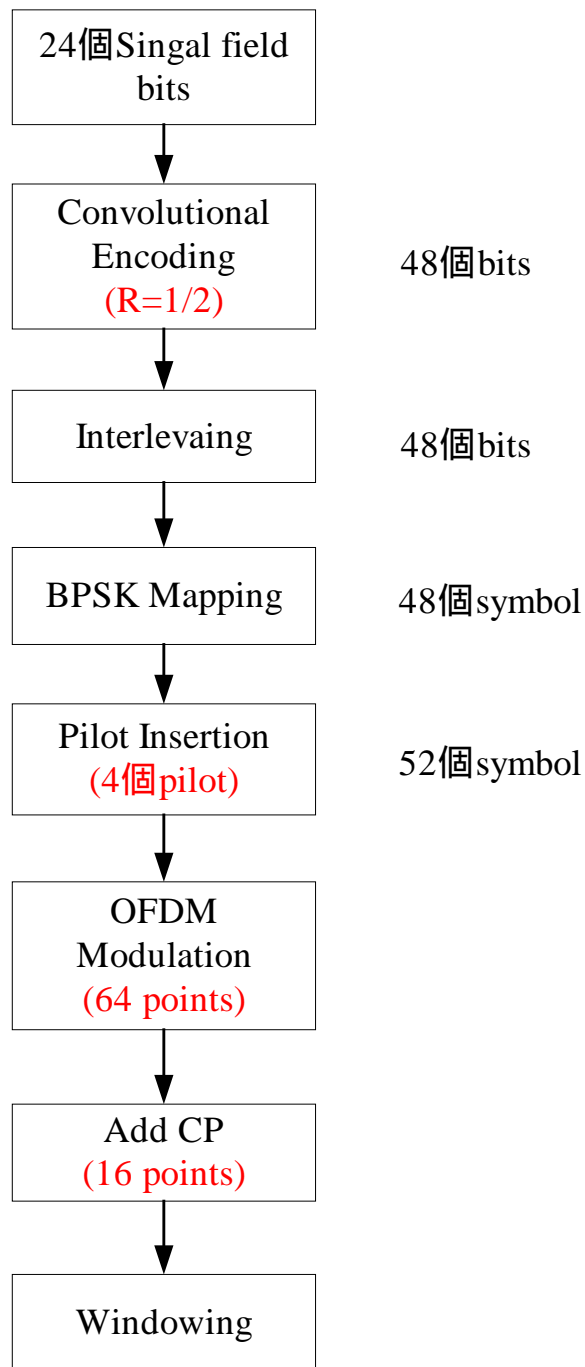


圖 19. Signal Field 信號產生過程

5-4 Data field

Data field 內包含了 PLCP header 的 service field (SERVICE)、傳送的真正資料 PSDU、TAIL bits 以及 PAD bits , 以下將作簡單說明。

5-4.1 Service field (SERVICE)

在 IEEE 802.11 中 SERVICE field 有 16 個 bits，如圖 20 所示。Bits 0 ~ 6 被設為” 0 ”，是最先被傳送出去的，它用途是在做接收器端 descrambler 的同步。其餘的 9 個 bits 先被保留起來，等未來有需要用時再拿來使用。所以目前 default 值則是全部設為零。

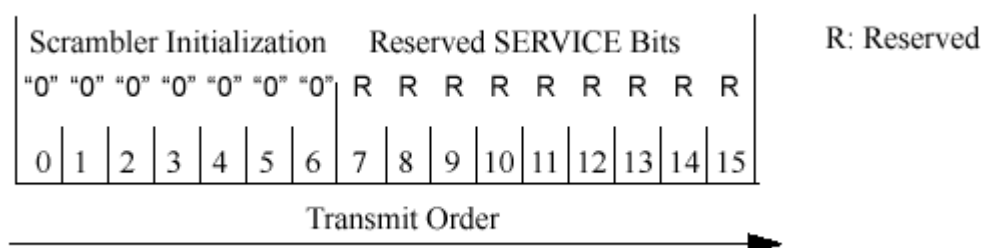


圖 20. SERVICE field 的 bit 分布圖

5-4.2 PPDU tail bit field (TAIL)

TAIL 有 6 個 bits，這 6 個 bits 都必須設為” 0 ”，它的用途是要把 convolutional encoder 上的 6 個暫存器(register)的狀態都回復到” 0 ”的狀態。這個程序可以改進 convolutional decoder 的錯誤機率。

5-4.3 Pad bits (PAD)

因為 Data field 的 bit 數目一定要是編碼過後 OFDM symbol 的整數倍，所以為了要達到這個目標，在傳送完 PSDU 以及 TAIL bits 之後還有不足的 bit 數就由 PAD bits 將其補足。有關於要補多少 PAD bits，在 802.11a standard 的 Annex G 中有個例子，裡有詳細的說明。

References

- [1] 新電子科技雜誌 2002 年 3 月 192 期;
<http://www.mem.com.tw/serial/2002-3-192/m19214.html>
- [2] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, *IEEE standard, supplement to standard 802 part 11: wireless LAN*, New York, NY, 1999.
- [3] Duan Matiae, “OFDM as a possible modulation technique for multimedia applications in the range of mm waves”
- [4] Anibal Luis Intini, “Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks”