

IEEE 802.11ax 技術介紹白皮書

五.引言:

IEEE 802.11 是 IEEE 工作小組研發無線區域網路的規格。該小組在 20 世紀 90 年代後期開始工作，並從那時起創建幾個成功的標準/修正案，包括 802.11a, b 和 g 等技術。無線區域網路現在已無處不在，大多數筆記型電腦和智慧型手機中都包含一種或多種無線區域網路技術作為標準功能。隨著 802.11n 在 2009 年和 802.11ac 在 2013 年的正式發布，IEEE 802.11 組織在早期的 a / b 和 g 標準上持續建立和完善。然而，成功背後亦有隱憂，由於無線區域網路已無處不在，在人口密集地點如公寓大樓和體育場找到許多接入點(Access points, AP)和站點(Stations)並不罕見。由於無線區域網路使用無須授權的 ISM 頻段，多個連接之間可能會相互干擾並導致通道容量縮減。目前的無線區域網路中並沒有調度程序，且通道存取使用的載波偵聽多路存取架構(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)在通道高佔用情況下存在一些缺點。此外，用戶還將無線區域網路用於許多不同的應用，如影音串流和卸載(WLAN Offloading)等。

為了適應具有挑戰性的應用情境和人口密集處的高密度無線區域網路用戶，802.11 工作小組於 2013 年成立了 HEW (高效無線, High Efficiency Wireless) 研究小組，以尋求改善這些情境下的用戶體驗，並更有效率地使用 2.4 和 5 GHz 頻譜。2014 年 3 月，HEW 研究組成為正式任務小組 (Task Group 11ax)，開發針對 802.11-2012 的 802.11ax 修正案。

本篇技術介紹文件包含 4 個主要部分：1.用於 11ax 修訂版開發的核心文件，2. 11ax 目標和特性，3.涵蓋 IEEE 802.11ax 草案關鍵新部分的技術概述以及 4.重要測量指標的測試要求如 EVM 和鄰道抑制等。值得注意的是，802.11ax 修正仍處於早期開發階段，直到最終版本確定前都有可能發生變化。通常，802.11 修正案的草案 v2.0 被認為是穩定的版本，並且 802.11ax 草案 v2.0 預計將在 2017 年 3 月完成。

六. IEEE 802.11ax 核心文件:



本文的大部分資訊來自兩個關鍵的 802.11ax 核心文件。802.11ax 草案版本 0.4 和 802.11ax 規範框架文件 17 版。

802.11ax 修訂草案 v0.4 [1] 包含對 802.11mc 草案版本 7 的建議修改，以滿足 802.11ax 的要求和目標。這些更改包括硬體層 (PHY) 規範的新條款以及支持新硬體層特性的新 MAC 條款。另外，11ax 修正版包含對當前 802.11 MAC 層的修改，以保持與傳統設備的相容性。802.11ax 草案版本 0.4 於 2016 年 8 月 30 日發布。最終修訂版的預計完成日期為 2018 年底。

802.11ax 規範框架文件包含 802.11ax 任務小組成員同意的特性和要求，並用於作為“框架”或 802.11ax 修正案的大綱。儘管 802.11ax 工作草案僅適用於 IEEE 802.11 工作組的投票成員，但規範框架文件可以透過以下連結獲得：

<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0132-17-00ax-SPEC-framework.docx>。此外，802.11 任務小組還提供公開的工作狀態更新。802.11ax 最新狀態可在以下網址獲得：

http://www.ieee802.org/11/Reports/tgax_update.htm。

七. IEEE 802.11ax 目標與特性:

802.11ax 的主要目標是改善 2.4 和 5 GHz 頻段密集部署中的使用者體驗和網路性能。具體目標 (如計畫授權需求[2]中所定義) 為：

- 在密集部署的情境中，每個站點的平均吞吐量 (在 MAC 數據服務接入點測量) 至少提高四倍，同時保持或提高每個站點的功率效率
- 與操作在同一頻段的傳統 802.11 的設備具有向下相容性和共存性

802.11ax 將使用頻譜效率，區域吞吐量和性能改進等指標來針對多種使用模式，包括：(詳見[3])：

1. 機場/火車站
2. 電子教育機構
3. 公共交通機構
4. 用戶密集的公寓大樓
5. 小區塊的街道部署 (Pico cell street deployments)

下表詳細介紹了 11ax 的新功能及其主要優點



特性	主要優點
上行 多用戶 MIMO	更高的上行吞吐量
下行 OFDMA	減少冗餘 (Overhead)
上行 OFDMA	更高的總體吞吐量 拓展上行鏈路範圍 減少冗餘 (Overhead)
4 倍的符碼週期	增強室外操作的抗干擾性
1024 QAM	更高的最大數據速率
擴展範圍前導碼和 MCS0 rep2	拓展應用範圍

八. 802.11ax 高效率硬體層:

高效率 (High Efficiency, HE) 設備將被要求符合傳統無線區域網路硬體層的強制性要求。也就是說，工作在 2.4 GHz 的高效率設備需要符合 802.11n 硬體層的規範，並且工作在 5 GHz 頻段的高效率設備將需要符合 802.11n 和 802.11ac 硬體層規範。

儘管符合上述要求，802.11ax 和前一世代 802.11 仍有重大變化。主要區別之一是在上行鏈路和下行鏈路同樣支援了多用戶 MIMO (Multi User MIMO, MU-MIMO)，以及支援了正交分頻多工存取 (OFDMA)。11ax 的另一項改變是符元時間增加為 12.8 us，是傳統符元時間 3.2 us 的四倍。

增加符元時間的三個主要原因是[4]：

- 增加室外通道的穩健性
- 對上行鏈路 MU-MIMO/OFDMA 用戶的時序顫動 (Timing Jitter) 有更好的容忍度
- 更高的室內效率 (降低冗餘循環前綴)

隨著符元時間的增加，11ax 要求支援三個循環前綴 (Cyclic Prefix, CP) 時間：

- 0.8 us：使用這個傳統循環前綴時間和更長的符元時間可以提高效率，因為循環前綴造成的冗餘較小
- 1.6 us：針對戶外通道和室內上行鏈路 MU-MIMO / OFDMA 的高效率情境
- 3.2 us：針對戶外上行鏈路 MU-MIMO / OFDMA 等高穩健性需求的情況

由於符元時間較長，子載波間距從 312.5 KHz 縮小到 78.125 KHz，而 20 MHz 通道頻寬的 FFT 個數從 64 個增加到 256 個。較窄的子載波間距允許更好的等化

(Equalization)，從而實現更高的通道穩健性。雖然可以使用更多的 FFT 個數，但隨著 FFT 個數的增加，實現複雜性也會增加。另外，隨著子載波間距變小，載波頻率偏移 (Carrier Frequency Offset, CFO)校正亦需要更加精確。



	802.11n	802.11ac	802.11ax
Channel Bandwidth (MHz)	20, 40	20, 40, 80, 80+80, 160	20, 40, 80, 80+80, 160
Subcarrier Spacing (KHz)	312.5	312.5	78.125
Symbol Time (us)	3.2	3.2	12.8
Cyclic Prefix (us)	0.8	0.8, 0.4	0.8, 1.6, 3.2
MU-MIMO	No	Downlink	Uplink and Downlink
Modulation	OFDM	OFDM	OFDM, OFDMA
Data Subcarrier Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM
Coding	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Optional)	BCC (Mandatory) LDPC (Mandatory)

4.1 封包協議數據單元格式

802.11ax 通過引入四個新的封包協議數據單元(Packet Protocol Data Unit, PPDU)格式，來區別自身與傳統訊框 (Frame) 的硬體層：

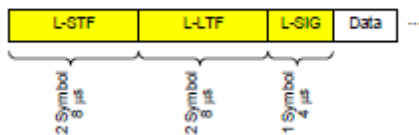
- 單用戶 (Single User) PPDU (HE_SU) ，用於向單一用戶傳輸時使用。
- HE 延伸範圍 PPDU (HE_EXT_SU) 。同樣應用於單一用戶傳輸，但是針對可能離 AP 更遠的用戶，例如室外情境。HE_EXT_SU 只會在 20 MHz 通道頻寬中傳輸，此外，HE_EXT_SU 將僅使用 1 個空間串流和 MCS0 (BPSK1 / 2) ，MCS1 (QPSK1 / 2) 或 MCS2 (QPSK4) 等信號格式。
- 多用戶 (Multi User) PPDU (HE-MU) 攜帶一個或多個資料向一個或多個用戶進行傳輸。
- HE 基於觸發 (Trigger-Based, HE_Trig) PPDU ，攜帶單個傳輸，並回應觸發訊框發送。該訊框格式是在 OFDMA 和 / 或多用戶 MIMO 上行鏈路傳輸中發送的。多用戶上行傳輸通常需要仔細校準的設備，並且能夠滿足嚴格的功率和測量精度要求。然而，802.11 規範允許 ax 設備實現於廣泛的應用情境，為了適應高端和低端設備，支持 HE_Trig 的設備將被要求聲明它們是否是經過仔細的校準並且能夠滿足嚴格的功率和測量精度要求的 A 類設備，或者較低成本，功能有限，需求較為寬鬆的 B 類設備[5]。

雖然還需要確定 ax 設備是否需要支援上述所有 PPDU 格式，但所有設備都需要了解任何傳輸模式的前導碼 (Preamble) 。



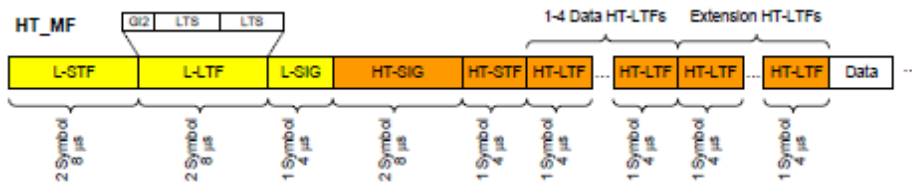
Field	Description
L-STF	Legacy Short Training Field
L-LTF	Legacy Long Training Field
L-SIG	Legacy Signal Field
RL-SIG	Repeated Legacy Signal Field
HE-SIG-A	HE Signal A Field
HE-SIG-B	HE Signal B Field
HE-STF	HE Short Training Field
HE-LTF	HE Long Training Field
Data	Data
PE	Packet Extension Field
GI	Guard Interval
LTS	Legacy Training Sequence

NON_HT (Legacy)



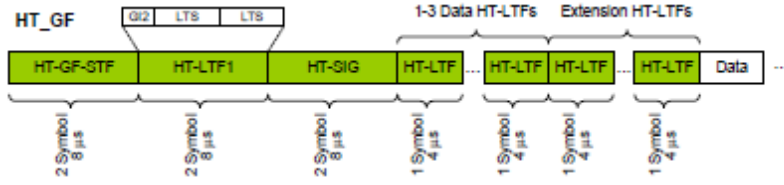
(NON_HT - SISO only) } 11a
11g
11p
11j

HT_MF



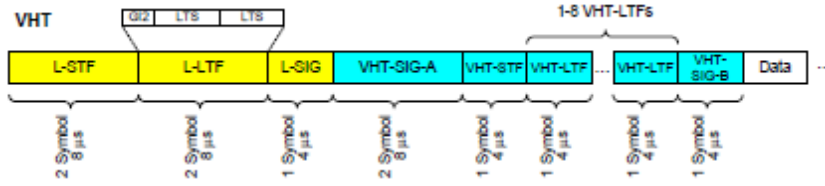
(HT - single user MIMO only) } 11n

HT_GF

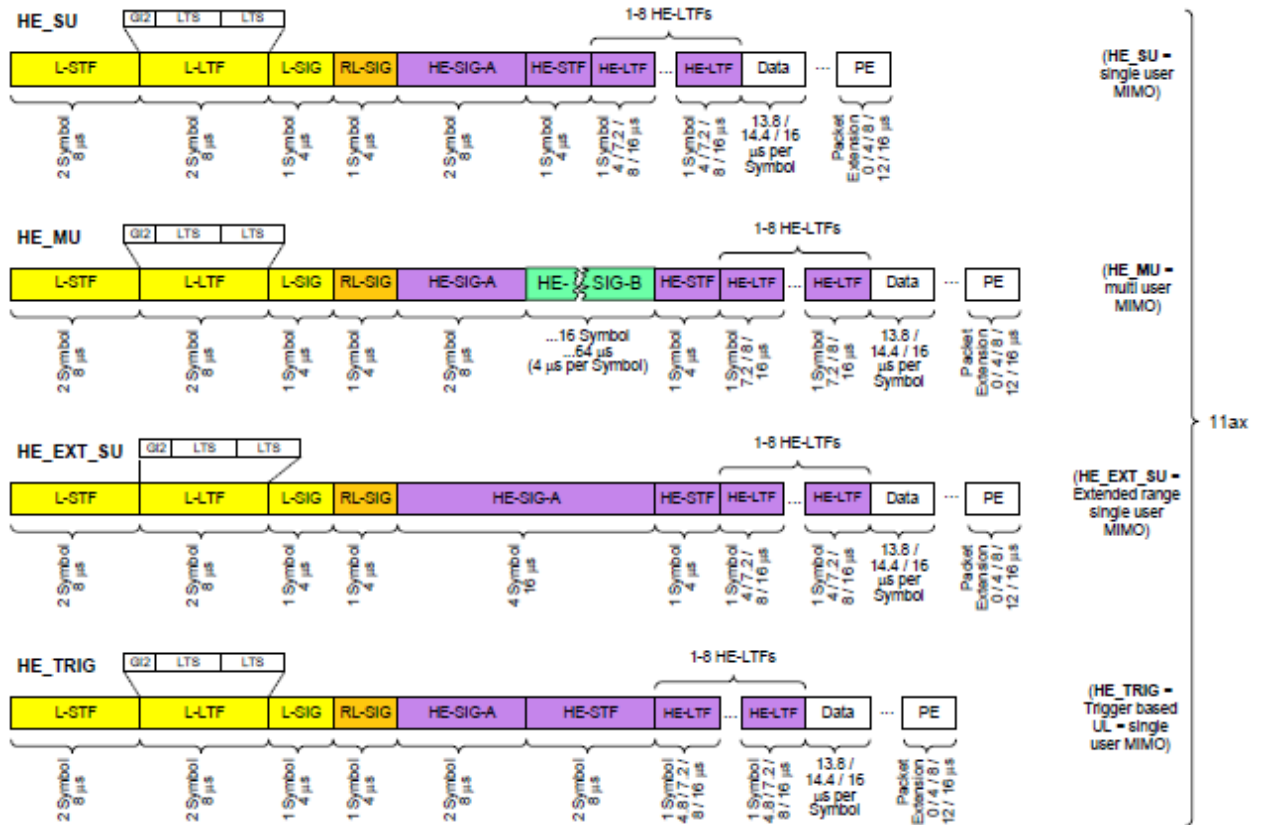


(HT - single user MIMO only) } 11n

VHT



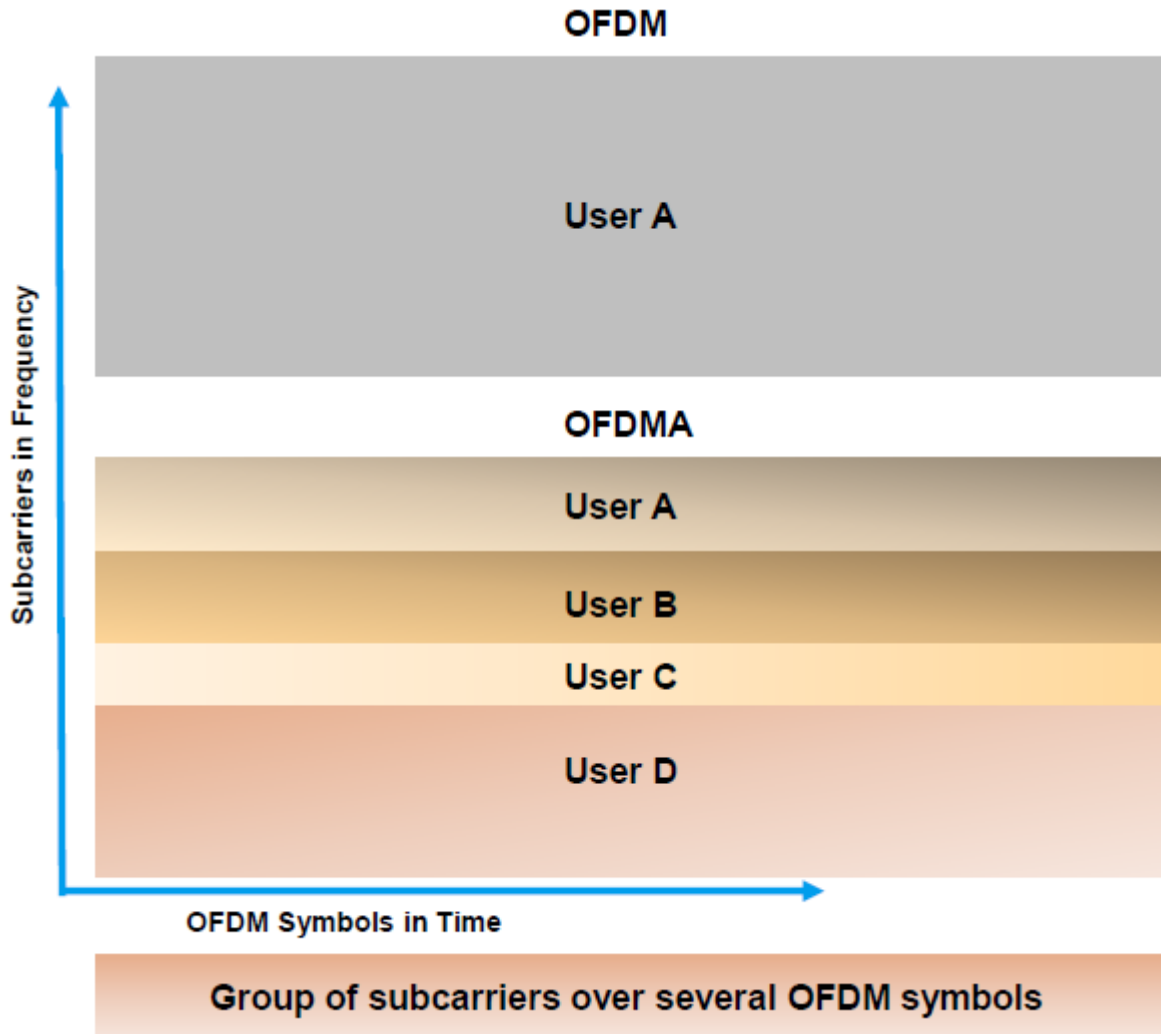
(VHT - single user MIMO or multi user MIMO) } 11ac



4.2 從單一用戶到多用戶 (MU)

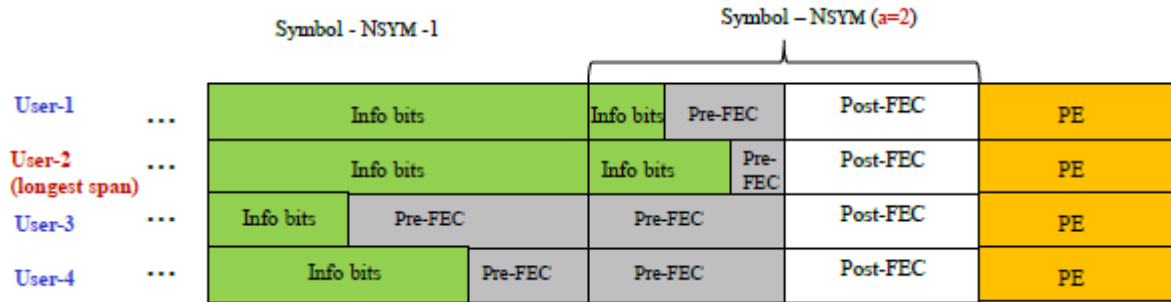
傳統 802.11 技術使用正交分頻多工(OFDM)技術，傳輸是針對單一用戶進行。11ac 透過 MU-MIMO 技術，增加對下行鏈路中多用戶傳輸的支援，802.11ax 則增加了上行鏈路 MU-MIMO 的支援，並且還為上行鏈路和下行鏈路中的多用戶情境增加了 OFDMA 技術。最初的 11ax 設備將被要求在上行鏈路和下行鏈路上支援 OFDMA，但可能不需要上行鏈路的 MU-MIMO。因此，本節的重點將放在 OFDMA 上。

在 OFDMA 中，資源按時間和頻率在兩個區域內分配，稱為資源單元。因此，OFDM 信號不同組的子載波被分配給不同的用戶，如下圖所示。



11ax OFDMA 中所有用戶將具有相同的時間分配，且將於相同時間結束。在下行鏈路中，這將透過向較短的封包添加填充位元，並且要求額外位元做為封包的數據部分以相同的功率位準傳輸來實現。雖然這降低了效率，但它使得與傳統 802.11 網路向下相容的要求更易於實現。

透過回顧傳統 802.11 設備使用 CSMA 技術來確定通道是否可以使用，可以理解這一點。例如，如果其中一個用戶的封包長度比其他三個用戶長，那麼當較長信號的剩餘部分單獨傳輸時，感測到的信號功率將低於所有用戶一起傳輸時的信號功率。在這種情況下，傳統設備確定該通道可以使用並開始傳輸。除了向下相容性之外，它還將降低信號同步的複雜度，並減少前導碼中所需的冗餘資訊量。下圖顯示了時域中下行 OFDMA 的圖示。



在多用戶上行鏈路的情況下，AP 不知道各用戶必須傳輸多少數據。因此，AP 使用稱為觸發訊框的控制訊框來提供資訊，使用戶知道上行鏈路封包需要多長時間。

對於 OFDMA (下行與上行) 頻率分配，資源單元 (Resource Unit, RU) 可以包含 26, 52, 106, 242, 484 或 996 個子載波並且處於固定位置。除了存在於通道中間的 DC 空載波，資源單元中的子載波是相鄰且連續的。下面三個圖示分別對於 20MHz、40MHz、80 MHz 展示出相對應於通道頻寬的 26, 52, 106, 242, 484 和 996 子載波資源單元的位置。雖然資源單元本身的位置是固定的，但可能會混合使用不同的資源單元大小。

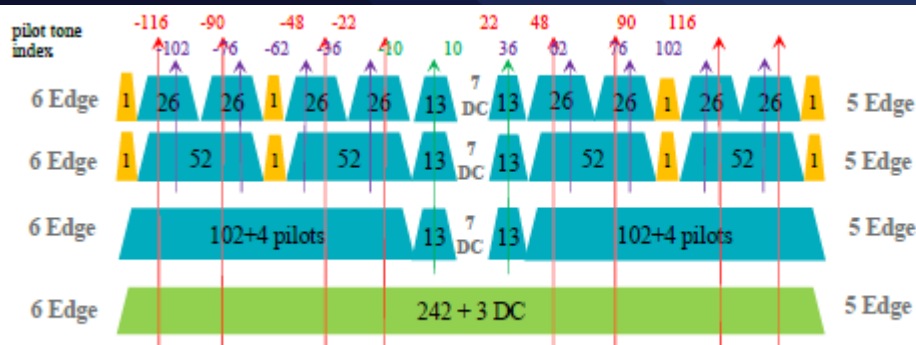


Fig. 4-4: 20 MHz Resource Units and Tone Allocation [7]

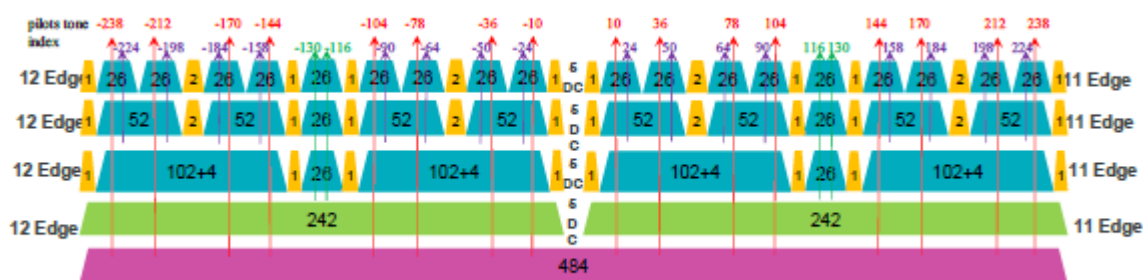


Fig. 4-5: 40 MHz Resource Unit and Tone Allocations [7]



Fig. 4-6: 80 MHz Resource Unit and Tone Allocations [7]

4.2.1 子載波類型

4.2.1.1 未使用的子載波

11ax 存在三種子載波類型：數據子載波，導頻子載波（Pilot Subcarriers，用於相位資訊和參數追蹤）和未使用子載波。未使用的子載波包含直流（DC）子載波，保護頻帶（Guard Band）子載波和空（Null）子載波。雖然它們不傳輸資訊，但這些未使用的子載波在 OFDMA 信號的傳輸中確有用處。如上三圖所示，在 20 MHz 的通道邊緣有 11 個保護頻帶子載波，在 40 和 80 MHz 情況下有 23 個保護頻帶子載波。這些保護頻帶有助於防止鄰近通道的干擾。

如果進行數學運算（例如，在 20MHz 資源單元分配中：256 個子載波 - 11 個保護頻帶子載波 - 9 個資源單元 x 26 個子載波 / RU = 11），則在每 242 個子載波區塊中有 11 個子載波未被計數，這 11 個子載波不會傳輸能量。11 個子載波中一些被聰明地放置資源單元之間用作間隔，尤其是較小尺寸的資源單元，以減少來自相鄰區塊的能量洩漏（在

上三圖中以黃色標示出 [7])。另外，這些子載波中一些被用作直流子載波。空直流子載波對於恢復 OFDMA 信號是重要的，特別是在直流附近的較小資源單元的情況。在下行鏈路中，附加直流子載波有助於緩解由接收機本地震盪洩漏和載波頻率偏移 (Carrier Frequency Offset, CFO) 引起的問題。在上行鏈路中，由於 STA 需要與 AP 的載波頻率同步，所以空直流子載波甚至更為關鍵。如果頻率補償是在數位處理中完成的，傳送端載波洩漏可能不會處在發送的 OFDMA 波形中心，這可能會導致數據信號受到干擾。AP 接收信號時，由於無法得知 STA 傳輸的頻率或幅度，將有可能無法校準這些載波洩漏。

[8]

4.2.1.2 資料子載波

11ax 中的數據子載波將使用來自 11ac 的調製和編碼方案(MCS)，並添加兩個具有 1024QAM 的新 MCS。在 11ac 中使用四種編碼率作為研究 1024QAM 調製的可能性，並且選擇了其中兩個 (3/4 和 5/6)，因為使用另外兩種編碼速率 (1/2 和 2/3) 的 1024 QAM 不會增加 11ac 已經可實現的資訊位元吞吐量。兩個新的 1024QAM 是 MCS 10 和 11，256 QAM MCS 8 和 9 亦可能是選項之一。1024 QAM 將僅用於具有 242 個或更多子載波的資源單元。下表提供了 11ax MCS 的調製和編碼速率。

根據模擬結果，在大多數室內情境中，選擇 1024 QAM MCS 的概率很高，並且平均吞吐量增益超過 20%。然而，1024 QAM 也對真實設備提出了額外的挑戰，例如

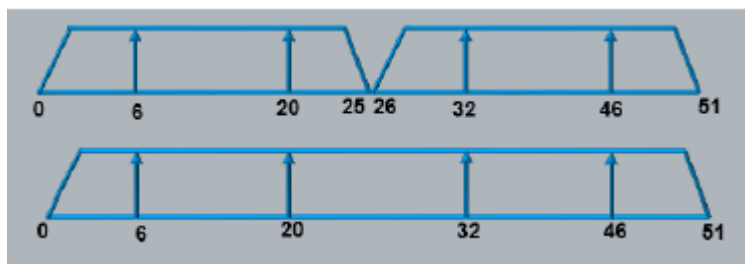
- 功率放大器的非線性效應
- 更高的波峰因數 (Crest Factor) 或峰值與平均功率比 (Peak-to-Average power ratio)
- 類比數位轉換器 (ADC) 的量化誤差
- 本地振盪器的相位雜訊和 I / Q 不匹配
- 贅餘中心頻率偏移 (CFO) 影響

MCS	Modulation	Coding Rate
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6
10	1024-QAM	3/4
11	1024-QAM	5/6

4.2.1.3 導頻子載波

導頻子載波是傳輸 OFDM 解調器使用的已知信號以補償頻率誤差等資訊的子載波，並且對接收信號的正確解調是關鍵的，是傳輸的重要組成部分。由於它們沒有傳輸數據資訊，所以導頻子載波的數量應該保持在最小，同時仍然足以讓信號正確解調。由於 11ax 支持多種頻寬和資源單元大小，因此 11ax 小組需要認真考慮導頻子載波的最佳位置，以便盡可能簡化實現與計算要求。為了實現這一目標，11ax 將使用在所有資源分配大小的位置固定和對齊的導頻子載波。

要了解這意味著什麼，下圖顯示了 26 和 52 個資源單元的導頻子載波放置的簡化圖。26 個子載波的資源單元將使用 2 個導頻，而 52 個子載波的資源單元將使用 4 個。注意在兩種情況下的導頻子載波位置是一致的。



對於 106 個子載波的情況，可能會猜測將使用 8 個導頻，以匹配 52 個子載波資源單元中的導頻，但實際上只需要 4 個導頻子載波。因此，導頻子載波'定位'完成。為了確定在 106 個子載波情況下 4 個導頻子載波中哪個是需要定位的，有必要考慮剩下的導頻子載波如何與 80MHz 的 242 個子載波情況對齊。結果，導頻子載波的位置選擇完成，且將更均勻地分佈在 242 子載波資源單元中。確切的導頻位置可以在下表中找到，並且分別對應於上圖中的 20 / 40 / 80 MHz 頻寬的各種資源單元。



Channel Width	RU Size	Pilot Tone Indices
20 MHz	26, 52	$\pm 10, \pm 22, \pm 36, \pm 48, \pm 62, \pm 76, \pm 90, \pm 102, \pm 116$
	106, 242	$\pm 22, \pm 48, \pm 90, \pm 116$
40 MHz	26, 52	$\pm 10, \pm 24, \pm 36, \pm 50, \pm 64, \pm 78, \pm 90, \pm 104, \pm 116, \pm 130, \pm 144, \pm 158, \pm 170, \pm 184, \pm 198, \pm 212, \pm 224, \pm 238$
	106, 242, 484	$\pm 10, \pm 36, \pm 78, \pm 104, \pm 144, \pm 170, \pm 212, \pm 238$
80 MHz	26, 52	$\pm 10, \pm 24, \pm 38, \pm 50, \pm 64, \pm 78, \pm 92, \pm 104, \pm 118, \pm 130, \pm 144, \pm 158, \pm 172, \pm 184, \pm 198, \pm 212, \pm 226, \pm 238, \pm 252, \pm 266, \pm 280, \pm 292, \pm 306, \pm 320, \pm 426, \pm 440, \pm 454, \pm 468, \pm 480, \pm 494, \pm 334, \pm 346, \pm 360, \pm 372, \pm 386, \pm 400, \pm 414,$
	106, 242, 484	$\pm 24, \pm 50, \pm 92, \pm 118, \pm 158, \pm 184, \pm 226, \pm 252, \pm 266, \pm 292, \pm 334, \pm 360, \pm 400, \pm 426, \pm 468, \pm 494$
	996	$\pm 24, \pm 92, \pm 158, \pm 226, \pm 266, \pm 334, \pm 400, \pm 468$