

## LTE 射頻介面關鍵特性

本文主要介紹最近剛被 3GPP 核准的 LTE (Long-term Evolution: 長期演進) 技術在射頻介面的幾個關鍵技術。在峰值傳輸速率 (Peak Data Rate)、時延 (Delay)、頻譜效率 (Spectrum Efficiency) 等方面，展現了史無前例的高效能表現。

文中針對了頻譜使用彈性 (Spectrum Flexibility)、多重天線技術 (Multi-antenna Technologies)、排程 (Scheduling)、鏈路自適性 (Link Adaptation)、功率控制 (Power Control)、重傳處理 (Retransmission Handling)...等都有討論。

### 1. 背景說明

基於高速封包接取 (HSPA: High-Speed Packet Access) 技術的行動寬頻服務已獲致極大的成功。但即便如此，為了滿足未來行動寬頻服務的需求，業界必須要能更進一步改善服務的遞送 (Service Delivery)，例如透過更高的傳輸速度，更短的時延，甚至是更大的網路容量。這些都是 3GPP 制定射頻接取網路規格時一開始所設定的目標，特別是對 HSPA Evolution 與 LTE。

易利信已承諾並確定要發展 HSPA 與 LTE 技術，這由易利信積極地扮演標準化推手與技術原型公開的角色即可證明。相較於之前的 3G 系統，LTE 所強化的效能，包括了超過 300 Mbps 的峰值傳輸速率、少於 10ms 的時延、以及數倍的頻譜使用效率。LTE 可以在既有，或者是新增的頻段上佈建，這使得系統的維運變得簡單。此外，LTE 的目標是希望無論是舊有 3GPP 或 3GPP2 的系統，均能平滑地演化，這構成了邁向 IMT-Advanced (International Mobile Telecommunication – Advanced, 亦被稱為 4G) 重要的一步。事實上，LTE 包含了許多未來 4G 系統所考慮的特性。

### 2. 射頻介面基本原理

射頻通訊的本質特性就是射頻通道品質 (Radio Channel Quality) 在時間、空間、以及頻域上會快速地變化。這包括了因為多路徑傳輸 (Multipath Propagation) 所導致的快速變化。因此，射頻通道品質 (Radio Channel Quality) 與反射波的結構有絕對關係 (見圖一)。

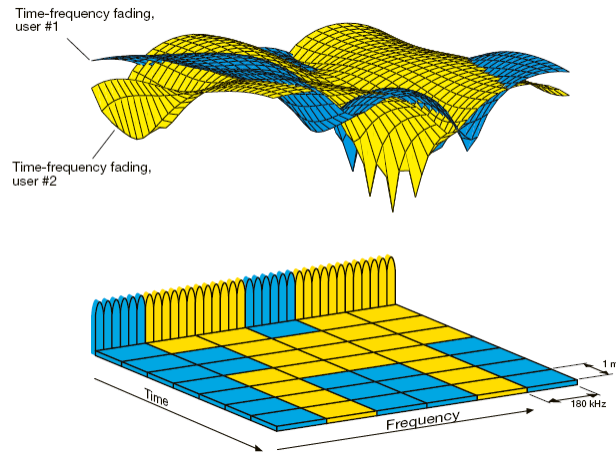
許多傳統的技術，如各種不同的分集傳輸技術 (Diversity Transmission) 被用來

解決這種快速變化的問題，以使射頻鏈路能保持固定的傳輸速率。然而對於封包資料服務而言，終端用戶通常不會去注意到這種在瞬間傳輸速率上，短暫而快速的變化。因此，LTE 射頻接取的基本原理是要以“利用”取代“抑制”這種通道品質 (Channel Quality) 的快速變化，以便更有效率地使用可獲得的射頻資源。這裡的射頻資源包含了利用 OFDM 為射頻接取技術基礎的時域與頻域的資源。

傳統利用多個平行的子通道做資料傳輸的 OFDM 技術，構築了 LTE 下行射頻鏈路傳輸的核心技術。相對窄頻的子通道 (Subcarrier) 搭配循環字首 (CP: Cyclic Prefix) 的使用，使得 OFDM 傳輸在射頻通道上對抗時間離散 (Time Dispersion) 的效應上，本質上更加強固，能有效減少在接收機端音通道等化 (Channel Equalization) 所造成的複雜度。在下行鏈路上，這是一向非常吸引人的特性，因為它能簡化接收機的基頻處理，降低終端設備的製造成本與功率耗損。這對使用大頻寬傳輸 (Wide Transmission Bandwidth) 的 LTE 尤其重要，特別是配合多重串流傳輸使用時。

在上行鏈路中 (相較於下行鏈路，上行鏈路在傳輸功率等射頻資源更為稀少)，最重要的特性之一就是高效率功耗傳輸機制 (Power-efficient Transmission Scheme)。為求最大涵蓋、降低終端設備的成本與功率損耗，LTE 在上型鏈路採用 DFT OFDM 展頻形式的單載波傳輸 (single-carrier in the form of DFT-spread OFDM) 技術，又稱作單載波 FDMA (Single-carrier FDMA)。這種解決方案會使上行鏈路的功率消耗比起傳統的 OFDM 方式有較小的峰均值比 (Peak-to-average ratio)，從而使終端設備有較高效率的功耗傳輸機制與較低的複雜度。

在 OFDM 傳輸技術中，對射頻資源可以透過二維的時域-頻域平面 (Time-Frequency Grid) 來描述。這個平面是對應到時域與頻域上，OFDM 信號的訊符 (Symbol) 及子載波 (Sub-carrier)。在 LTE 技術規格中，資料傳輸的最基本單位是一對資源區塊 (Pair of Resource Block)，這相當於 180 KHz 的帶寬與 1 ms 的子訊框 (Subframe) (圖一)。因此，利用集成 (Aggregating) 這些射頻資源，以及調整傳輸參數，如調變機制 (Modulation Order)、通道碼比例 (Channel Code Rate) 等，便能動態地支援不同的資料傳輸速率。



圖一. 頻域軸與時域軸上的通道品質變化。

### 3. 關鍵特性

要達到 LTE 技術規格所設定的高網路效能的目標，有幾個關鍵的技術特性是必要的。在以下的文章裡，我們將針對幾個重要的關鍵特性，作基本的描述，包括了這些特性所要達成的特殊目標（如：涵蓋、容量、傳輸速率、時延）。

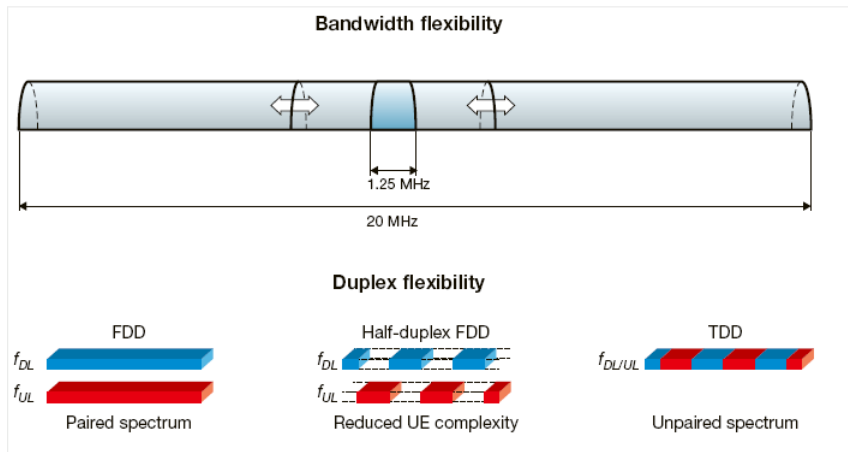
#### 頻譜彈性 (Spectrum Flexibility)

根據不同地區的法規，行動通訊可運用的頻譜，是位於不同的頻帶，有不同的頻寬，並且有可能是成對或非成對的。頻譜彈性 (Spectrum Flexibility) 是 LTE 射頻接取重要的關鍵特性之一，使得 LTE 能在各種不同的頻譜條件下順利運作。

除了可以運作在不同的頻帶 (Frequency Band) 上外，LTE 還可以用不同帶寬 (Bandwidth) 來佈建，其帶寬範圍從 1.25 Mhz (適用於如由 CDMA2000/1xEVDO 系統而來的初始升級) 到 20MHz。此外，LTE 支援建構在成對，或是非成對的頻譜上，提供了同時支援 FDD 與 TDD 運作模式的單一射頻接取技術。

配合終端裝置的能力，LTE 的 FDD 操作模式可以以全雙工 (Full-Duplex) 或半雙工 (Half-Duplex) 的模式進行。所謂半雙工是指終端設備同時利用頻率及時間將資料的傳送和接收分開，以何種雙工模式操作則視終端裝置的能力而定 (圖二)。半雙工模式的優點是能使終端裝置在較寬鬆的雙工濾波器 (Duplex-filter) 的要求條件下運作。這會降低終端設備在原先上下鏈間隔過窄的 FDD 頻段上要

能運作所需要的成本，從而使 LTE 的解決方案適用於任何的頻帶配置。



圖二. LTE 頻譜彈性 (帶寬與雙工模式)。半雙工模式是終端能力而定。

在設計具頻譜彈性的射頻接收技術時，挑戰之一便是保持在不同頻譜與雙工模式間的共通性。LTE 無論是 FDD 或 TDD 及在不同的帶寬均具有類似的訊框架構 (Frame Structure)。

### 多重天線發射 (Multi-antenna Transmission)

多重天線發射的使用能加強行動通訊系統的系統效能或服務能力 (或是兩者兼具)。LTE 充分運用了多重天線發射技術，在分類上可分成：

- 天線發射分集 (Transmit Diversity)，與
- 已前置編碼為基礎 (Pre-coder-ased) 的多重資料流傳輸，包括了天線波束賦形 (Beamforming) 技術這個特例。

在圖一中，代表兩個使用者的衰減模式亦可等同代表來自兩根不同發射天線的同一個使用者的接收信號。因此，發射分集 (Transmit Diversity) 可被視為將來自兩根不同發射天線接收信號均化 (Averaging) 的技術，從而避免發生在每根天線傳播路徑上的嚴重信號衰落 (Deep Fading Dips)。

LTE 的天線發射分集 (Transmit Diversity) 技術是植基於“空頻分組編碼 (SFBC: Space-Frequency Block Coding)”的技術。如果分集的天線支數到四支，則須搭配“頻移時間分集 (FSTD: Frequency-Shift Time Diversity)”。

射分集主要是應用在一般無法根據通道狀況排程 (Channel-Dependent Scheduling) 的下行通道上。然而，發射分集的技术亦可以使用者服務層的傳輸上：例如 VoIP，因為雖然 VoIP 服務在使用者資料所需的傳輸頻寬雖然相對較小，但卻無法彌補因通道品質有關的排程卻所需額外增加的表頭 (Overhead)。簡言之，天線發射分集 (Transmit Diversity) 技術能增加系統容量與細胞涵蓋。

多重資料流傳輸 (Multistream Transmission) 是利用在發射端 (網路) 與接收端 (終端裝置) 的多根天線，提供在同一個射頻鏈路上，多個同時的平行資料流的傳送。這種技術能大幅增加射頻鏈路的峰值速率 – 舉例來說，如果在發射端和接收端各有四支天線，最高將可以同時有四條平行的資料流再同一個射頻鏈路上傳遞，使傳輸速率的增加達到四倍。

對於網路負載不大或細胞涵蓋範圍較小的佈建，多重資料流傳輸 (Multistream Transmission) 技術將可達到極高的傳輸速率，使射頻資源的利用更有效率。在高網路負載或較大的細胞涵蓋範圍的網路佈建場景中，其通道品質 (Channel Quality) 並不容許有太多多重資料流傳輸的空間。在此情況下，多根發射天線的單一資料流之天線波束賦形 (Beamforming) 會是最適於用來加強信號品質的技術。利用圖一能夠配合解釋，天線波束賦形 (Beamforming) 技術可以被看作是利用對發射信號做前置編碼 (Pre-coding) 以控制信號衰落的模式，使信號能在接收端得到最大值。

簡言之，為了要能在不同的應用場景下都能有良好的效能表現，LTE 提供了自適性多重資料流傳輸 (Adaptive Multistream Transmission) 機制，也就是平行傳輸的資料流數目，會持續調整，以符合不斷變動的瞬時通道品質情況的要求：

- 當通道品質非常好時，最多可達四個資料流可以同時平行地被傳送，在 20 MHz 的帶寬下產生高達 300Mbps 的傳輸速率。
- 當通道品質沒有那麼好時，同時被平行傳送的資料流數目會減少，多重天線則會部份挪來供天線波束賦形 (Beamforming) 傳輸機制使用，以改善接收品質，進而改善系統容量與涵蓋。
- 可以利用天線波束賦形 (Beamforming) 傳輸機制及發射分集 (Transmit Diversity) 技術，達到良好的覆蓋，無論是更大的涵蓋範圍，或者是在細胞邊界能支援更高的傳輸速度。

### 排程與鏈路的自適性 (Scheduling and Link Adaptation)

一般而言，所謂的排程指的是，分割並指配網路資源給正在傳送資料的網路使用

者。對 LTE 而言，無論是上下鏈路，均支援每 1 ms 的動態排程 (Dynamic Scheduling)。

排程的目的，是要能在用戶的預期品質與整體系統效能間取得平衡。通道品質相關排程 (Channel-dependent Scheduling) 可以倍用來達成更高的細胞傳輸速率 (Cell Throughput)。在相對較好的通道品質條件下，資料的傳輸可用較高階的調變機制，較少的通道編碼，額外的平行資料流，較少的重傳...等，來傳送頻域或是時域上的資源，以達到更高的傳輸速率。此種方式能使同等的資訊量在傳送時消耗較少的射頻資源 (較少的時間)，進而改善整體的系統效率。圖一亦說明了在兩個使用者的情況下，射頻通道因快速衰落 (Fast Fading) 的變化情形。OFDM 的頻域-時域平面 (Time-frequency Grid) 清楚解釋了在頻域與時域上的資源的選擇。

對於小使用者資料承載 (Small Payload) 的資料封包而言，動態排程 (Dynamic Scheduling) 所需的控制信令相對於所要傳送的使用者資料而言，可能不成比例的大。因為這個原因，除了動態排程 (Dynamic Scheduling) 外，LTE 亦支援固定式排程 (Persistent Scheduling)。固定式排程 (Persistent Scheduling) 表示，射頻資源會在特定的一組子訊框 (Subframe) 被指配給某一特定使用者。

自適性鏈路調整技術 (Link-adaptive Techniques) 可以因應最及時的通道品質變化。基本上，自適性鏈路調整會根據當下的通道品質狀況，選擇調變與通道編碼的機制，從而決定了每條鏈路的傳輸速率或誤碼率 (Error Probability)。

### 上行鏈路的功率控制 (Uplink Power Control)

功率控制是對發射功率的大小作調節，其目的是要能：

- 改善系統容量，涵蓋，與使用者的接收品質 (傳輸速率或語音品質)，以及
- 降低功率消耗

要達成上述目標，標準的功率控制機制一方面要使得主接收信號最大，另一方面則要抑制干擾信號。

LTE 的上行鏈路是正交的 (Orthogonal)，也就是在理想狀況下，同一個細胞內不同的使用者彼此不會有干擾產生。而來自鄰細胞的干擾則會視行動終端的位置而定 – 如果更進一步地說明的話，是視行動終端至那些細胞基站間，傳播路徑的增益(或衰減)而定。一般而言，越靠近鄰細胞基站的行動終端，對那個鄰細胞

所產生的干擾就越強。因此，離鄰細胞較遠的行動終端，會比離鄰細胞較近的行動終端以更高的功率作信號的發射。此外，主細胞的服務區塊跟與鄰細胞的距離亦有連動關係。

LTE 上行鏈路的功率控制考量了所有上述的特性。LTE 上行鏈路的正交特性，使得在同一細胞內，來自不同終端，不同上行接收功率的信號的多路接收成為可能。就瞬時的變化來說，這意謂了利用排程 (Scheduling)與自適性鏈路調節 (Link Adaptation)，多路徑衰落 (Multiple Path Fading)可反過來被用來增加傳輸速率，而不需藉由降低功率來減少信號干擾。就較長的時間區間而言，根據至主細胞 (Serving Cell) 的傳播路徑增益(或衰落)，產生較小干擾的行動終端，可以設定成在主細胞 (Serving Cell)具有較大的接收功率。在圖一中，這對應到平均信號強度的上昇。

### 重傳機制的管理 (Retransmission Handling)

實務上，在任何的通訊系統中，偶發性的資料傳送錯誤會因為諸如雜訊、干擾、及衰落等因素而發生。重傳機制 (Retransmission Scheme) 則是被用來補救這些錯誤的發生，進而保障傳送資料的正確性。重傳機制管理 (Retransmission Handling) 越有效率，則射頻資源可以被更有效地利用。為了有效地利用其高效能的射頻介面，LTE 支援一種動態且有效率的雙層重傳機制 (Two-layered Retransmission Scheme)：快速 HARQ (Fast HARQ: Fast Hybrid Automatic Repeat Request) 協定。它是一種利用遞增冗餘 (IR: Incremental Redundancy) 演算法的低附加表頭的反饋/重傳協定 (Feedback/Retransmission Protocol)。

HARQ 協定給予接收機冗餘的資訊 (Redundancy Information)，使其能避免一定程度的錯誤產生，也就是當初使傳送 (Initial Transmission) 不足以避免錯誤產生時，HARQ 重傳機制提供額外的冗餘資訊 (Redundancy Information) 減低錯誤發生的機率。此外，當 HARQ 協定無法完全修正錯誤時，ARQ 協定則提供了錯誤封包的完全重傳的。

這樣的設計能在不犧牲可靠度 (Reliability) 的情形下，減低時延 (Latency) 與冗餘位元 (Overhead)。大部分的錯誤均可被這種「無足輕重」的 HARQ 協定發現並修正；而較「昂貴」(以時延及冗餘位元來衡量的話) 的 ARQ 重傳，則僅在很少的機會發生。

在 LTE 中，HARQ 及 ARQ 協定均止於 (Terminated) 基地台，方便二者能有較緊密的結合。這種架構的好處是多重的，包括了 HARQ 殘餘錯誤的快速處理

(Fast Handling of Residual HARQ Errors)，以及變動的 ARQ 傳送大小 (Variable ARQ Transmission Size)。

#### 4. 結論

構成 LTE 射頻介面的基本技術，是 LTE 能夠擁有高網路效能的關鍵。

頻譜使用的彈性 – 在不同的頻段、不同的帶寬、以及同時支援 FDD 及 TDD 運作模式等方面 – 使 LTE 適用於幾乎任何可用的頻譜。

LTE 所支援的幾個關鍵特性，均是以積極的方式利用射頻條件的瞬時變化來增加系統效能：通道品質相關排程 (Channel-dependent scheduling) 會以最佳方式將射頻資源指配給使用者；多重天線技術 (Multi-antenna Technologies) 則充分利用傳播衰落來增加效能；而鏈路自適性調節技術 (Link-adaptation Techniques) 則會根據信號品質，調整調變與通道編碼的機制 (Modulation and Coding Scheme)。在上行鏈路部分，則會利用功率控制的機制 (Power-control Mechanism) 來提高信號品質，並抑制干擾。

由資料快速重傳 (Rapid Retransmission) 與傳輸過程軟結合 (Soft-combing) 相結合所產生的遞增冗餘 (IR: Incremental Redundancy)，使上述的數個關鍵特性被更積極地充分利用。