

LTE 媒體存取控制 (Medium Access Control)

通訊協定(1)

工研院資通所新興無線應用技術組 林佑恩 王淑賢

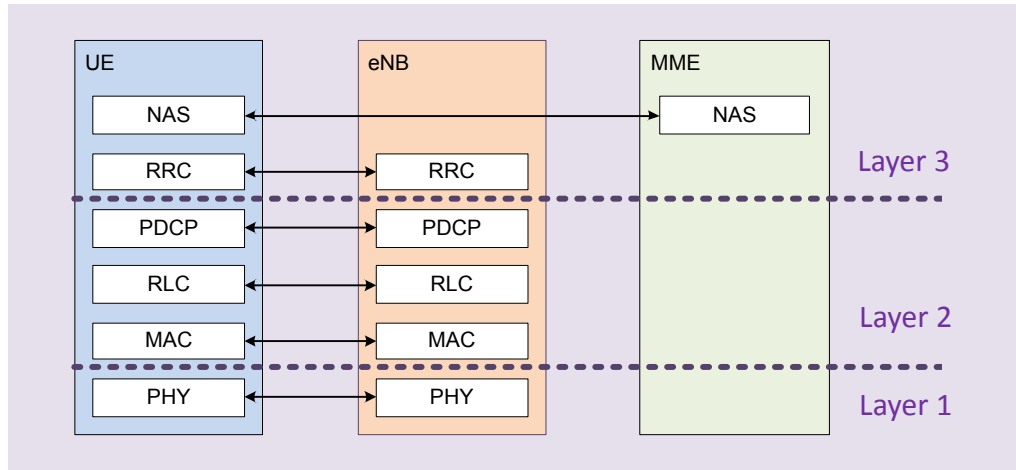
摘要

在傳統的 OSI 網路架構中，Medium Access Control (MAC)提供存取網路媒介的方法，讓網路節點或是終端設備可以連上網路並進行資料交換。而在 3GPP 所提出的 LTE 無線通訊協定規範中，MAC Layer 除了管理網路節點的隨機存取程序(random access procedure)、資料的傳輸、快速錯誤重傳機制、資料的多工處理(multiplexing)與解多工處理(de-multiplexing)之外，亦針對通道狀況與資料的優先順序來進行排程(scheduling)，以最大化傳輸效率。在 3G 系統中，每個使用者的最大連線速率約為數百 kbps 至數個 Mbps，然而在 2013 年 LTE Release 12 中使用者的連線速率將上看數百 Mbps 等級。對於指數成長的連線速率需求，除了提升實體層的信號處理技術之外，MAC Layer 所提供的連線管理與資料排程服務亦成為提升 LTE 系統效能的關鍵。我們將在這兩個月的技術專欄中，陸續介紹 LTE MAC Layer 的特色與其提供的服務內容。

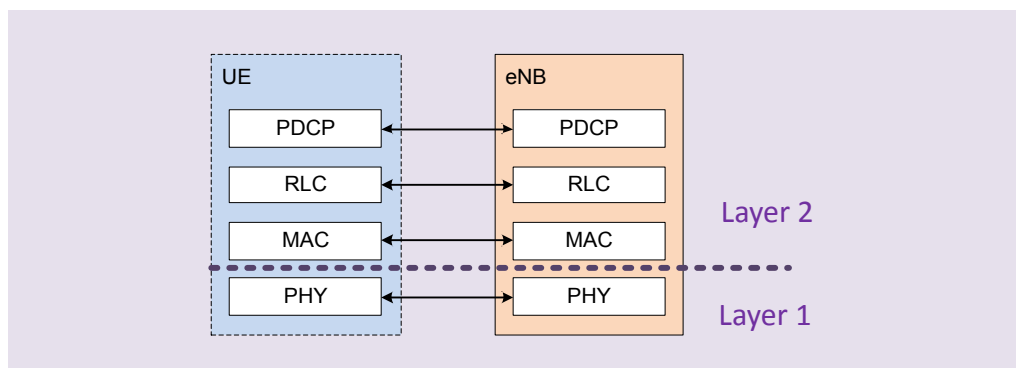
一、LTE 通訊協定簡介

在 2014 年 6 月的新興技術應用文章「LTE 無線電資源管理(1)」[1]中我們已經介紹過 LTE 的基本網路架構，其中與使用者(User Equipment, UE)直接相關聯的就是基站(Evolved Node B, eNB)與眾多基站組成的演進統一陸面無線接入網路(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN)。E-UTRAN 與使用者間的溝通介面稱為 uu 介面，用來傳遞 E-UTRAN 與使用者間的訊息，其中控制訊息的交換與管理的部分稱呼為 Control Plane，而普通資料的處理部分稱呼為 User Plane。Control Plane 與 User Plane 的通訊協定架構如圖 1 所示，在 Control Plane 上的通訊棧(protocol stack)區分為 3 層，而 User Plane 則只包含第一與第二層。屬於 Control Plane 獨有的第三層(Layer 3)通訊協定包含了 NAS(Non Access Stratum)與 RRC(Radio Resource Control)兩個子層，主要進行使用者連線管理、組態管理、換手(handover)、安全控制.....等等功能；第二層(Layer 2)包含了 PDCP(Packet Data Convergence Control)、RLC(Radio Link Control)與 MAC(Medium Access Control)三個子層，負責訊息的編號、壓縮、排程、傳遞、組合或拆解、與錯誤重傳.....等等；

第一層(Layer 1)則是處理訊號在實際的無線環境中如何收發的實體層(Physical Layer)。在這次的技術文章中，我們將說明 Layer 2 的 MAC 子層在 LTE uu 介面中所提供的服務內容與特色。



(a) Control-plane protocol stack



(b) User-plane protocol stack

圖1 使用者與基站間的通訊棧(protocol stack)

根據 3GPP 所規範的 MAC 子層協議，MAC 的功能可細分如下[2]：

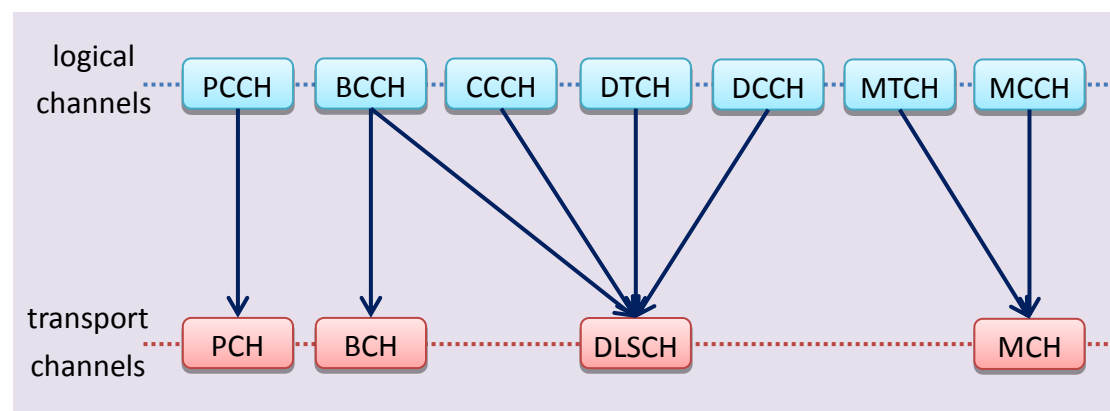
1. 邏輯通道(logical channel)與傳輸通道(transport channel)的匹配；
2. 將一個或多個邏輯通道上的 MAC service data unit (SDU)封包多工轉換為 PHY 層可傳送的 Transport Blocks (TB)，透過傳輸通道傳送給 PHY 層；
3. 將 PHY 層送給 MAC 的 Transport Blocks 解多工為 MAC SDU；
4. 排程訊息報告；
5. 混合式錯誤重傳機制(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)；
6. 不同使用者的優先序排程管理；
7. 同一使用者但不同邏輯通道的優先序排程管理；
8. 計算邏輯通道的優先序；

9. PHY 層傳輸格式(transport format)的決策。

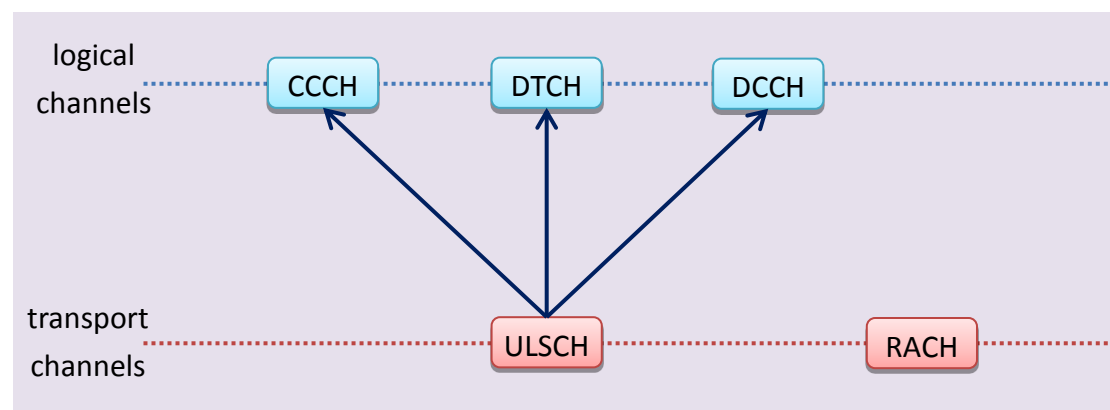
其中 1 至 3 項說明了 MAC 提供了資料傳輸、多工與解多工的服務，針對資料傳送錯誤的部分 MAC 提供了混合式錯誤重傳機制，除此之外，後 5 項說明了 MAC 也提供了資料排序與排程的服務。在接下來的幾章，我們將先針對資料傳輸、混合式錯誤重傳、與 MAC 控制單元(Control Element)的功能做基本的介紹，而在下個月的專欄中，將繼續介紹關於 MAC 排程的功能與使用者管理的功能。

二、 LTE MAC 資料傳輸

此節全部



(a) Downlink Channel Mapping



(b) Uplink Channel Mapping

圖2 Logical Channel & Transport Channel Mapping[3].

LTE MAC 層與 PHY 層的資料載在 transport channels 上收送，而 MAC 與 RLC 層的資料則是載在 logical channel 上收送，所謂的 transport channel 與 logical channel 可視為 LTE MAC 層與上下層的資料傳送介面，他們依資料的特性、重要性、優先順序進行分類。圖 2 顯示 transport channel 與 logical channel 在下行(downlink)方向與上行(uplink)的對應關係，而各種 channel 上載送的資料用途與

類別條列如下[2]。

- Logical channels
 - Broadcast Control Channel (BCCH)：發送系統控制訊息(system control information)給基站範圍內的所有使用者，諸如此基站的身分標誌、實體層頻譜的分配狀況等等重要訊息與參數。
 - Paging Control Channel (PCCH)：當基站需要尋找特定的使用者時，會利用 PCCH 發送傳呼訊息給此使用者。
 - Common Control Channel (CCCH)：為基站與使用者初次建立 RRC 連線所使用的特別通道。
 - Multicast Control Channel (MCCH)：用於發送使用者接收廣播訊息時所需要的控制參數。
 - Dedicated Control Channel (DCCH)：當使用者與基站建立 RRC 連線後，DCCH 將載送 Control Plane 的控制訊息。
 - Dedicated Traffic Channel (DTCH)：當使用者與基站建立 RRC 連線後，DTCH 將載送 User Plane 的資料訊息。
 - Multicast Traffic Channel (MTCH)：發送媒體廣播群播服務(Multimedia Broadcast/Multicast Service, MBMS)相關的訊息。在 LTE 支援 E-UTRAN 向其涵蓋的使用者設備發送廣播或是群播的訊息，其資料就是載送在 logical channel 的 MTCH 上。
- Transport Channels
 - Broadcast Channel (BCH)：發送 transport channel BCCH 的主要資料，例如 Master System Information Block (MIB), System Information Block (SIB) 1, 2, ...等等。
 - Downlink Shared Channel (DL-SCH)：用於大部份下行方向的資料傳輸，由圖 2(a)中可發現有多條 logical channel 上的下行資料都可以匹配至 DL-SCH。
 - Paging Channel (PCH)：發送 transport channel PCCH 上的傳呼訊息。
 - Multicast Channel (MCH)：發送 transport channel 上 MBMS 的訊息。
 - Uplink Shared Channel (UL-SCH)：用於大部份上行方向的資料傳輸，由圖 2(b)中亦可發現有多條 logical channel 上的上行資料都可以匹配至 UL-SCH。
 - Random Access Channel (RACH)：當使用者設備向基站端進行隨機接入程序進行 RRC 連線時，在 RACH 上發送 random access preamble。

傳送(Transmitter)端的資料就是由 MAC 透過 logical channel 向上層索要，經過多工處理(multiplexing)後再透過 transport channel 傳送至 PHY 層；而接收

(Receiver)端的資料也是由 MAC 從 transport channel 上取得，經過解多工(de-multiplexing)後由 logical channel 往上層傳遞。MAC 可謂是 PHY 層與 RLC 層中間訊息溝通的橋梁。

三、 LTE MAC 混合式錯誤重傳

3.1 RLC 與 MAC 不同的重傳機制與目的

在 LTE 協議中，對於錯誤或遺失的資料有雙重的機制來負責處理，一是位於 Layer 2 上層的 RLC 層所提供的自動重傳請求機制(Automatic Repeat reQuest, ARQ)，另一個是位於 Layer 2 下層的 MAC 層所提供的混合式自動重傳請求機制(Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ)。

LTE 協議採用雙重錯誤重傳機制的好處之一就是能提供較低的錯誤重傳延遲，以及適應不同類型的承載資料。當傳送的資料發生錯誤或遺失時，位於較下層的 MAC 層最快可以在 4 個系統子幀(4 subframes, 即 4 ms)，得知傳送的資料有無正確達到接收端，接著最快可以在 4 個 subframes 後，對於該筆錯誤的資料進行重傳的動作，換言之，接收端最快可以在 8 個毫秒後獲得重傳的資料，比起等待 RLC 層的錯誤報告後，再進行重傳，MAC 的重傳機制要大幅減少重傳資料的延遲。相較於 MAC 層的重傳機制著重於重傳資料的時間延遲，RLC 層的重傳機制提供對於不同資料類型的適應性及兼容性，若一條資料通道被設定成 AM (Acknowledged Mode)模式，則 RLC 會對該通道上的資料再進行一層把關，即若 MAC 層的快速重傳機制無法克服物理通道上稍長時間的衰弱與錯誤時，則 RLC 層的重傳機制可提供額外的錯誤重傳保障。另一方面，若一條資料通道被設定成 UM(Unacknowledged Mode)模式時，則暗示該邏輯通道上的資料傳輸是較著重傳輸的延遲，而非可靠可性，因此，RLC 層在 UM 模式下則會略過錯誤資料的重傳，加速資料的遞送，對於錯誤資料處理則完全交由 MAC 層的混合式自動重傳請求。

由於不論 RLC 層運作在 AM 模式或是 UM 模式，MAC 層的錯誤重傳機制都是啟動的，因此以下將再進一步詳述 MAC 層的錯誤重傳機制。

3.2 自動重傳機制簡介

當發送端傳送資料經由物理通道到接收端時，可能因為物理通道上的訊號衰減、被干擾等因素而造成資料無法完好無缺地抵達接收端。傳統在通訊理論上，對於會衰減、錯誤的通道，克服方式大致可分為兩大類：向前式錯誤修正(Forward Error Correction, FEC)，及向後式錯誤修正(Backward Error Correction, BEC)。

在向前式錯誤修正中，傳送端會在資料傳送之前，對要傳送的資料進行通道編碼(**Channel Coding**)，即對於原始的資料加入冗餘的資料，以提供接收端復原、替換錯誤的資料區段，使得即使傳送的資料是以錯誤形式抵達接收端，接收端也能自行還原原本完整無錯的資料，不需傳送端再將整筆資料進行重傳。在物理通道經常發生小區段的資料錯誤時，向前式錯誤修正制機就可大幅發揮其優勢，相較於向後式錯誤修正可節省許多用於重傳的頻寬。相反地，在物理通道良好完全無錯誤，或是有大量錯誤超過通道編碼的復原能力時，向前式錯誤修正所加入的冗餘資料就變成浪費通道頻寬的兇手之一。

在向後式錯誤修正中，傳送端在傳送資料前只會對資料進行簡單的通道編碼，使得接收端足夠以來判斷接收到的資料是否正確無誤而已，對於資料錯誤的處理方式主要是依賴接收端向傳送端要求重新傳送該筆錯誤的資料一次。一般常見的向後式錯誤修正的重傳機制有三種：**停止並等待**、**回退 N 步**、**選擇重傳**。

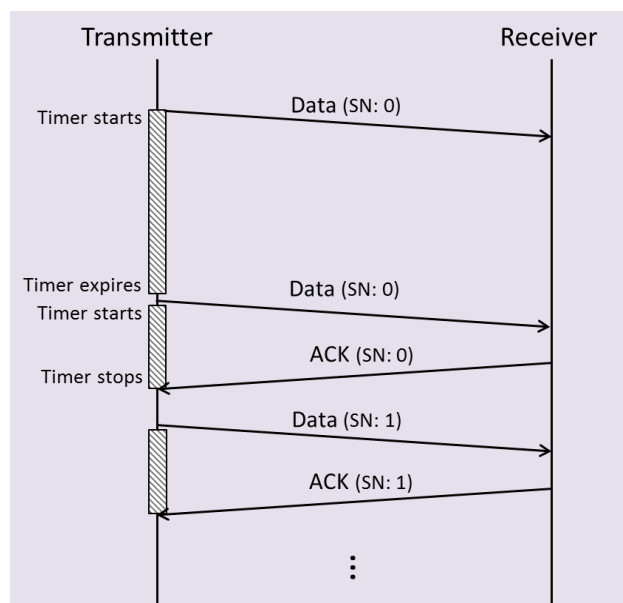


圖 3 停止並等待的重傳機制

如圖 3 所示，在**停止並等待**的重傳機制中，傳送端在發送一筆資料後就開始計時並等待接收端的確認回應(**Acknowledge** , **ACK**)。若接收端正確接到資料就會回覆 **ACK**，否則不回應。傳送端若收到來自接收端的 **ACK**，就會再傳送下一筆資料，否則傳送端就會持續等待直到計時器到期，這時傳送端就會認為上次傳送的資料發生錯誤或遺失，因此就會重新傳輸上次的那筆資料。停止並等待的傳送機制優點在於簡單的運作機制，以及確保資料可以依序被接收端正確收到。相對地，停止並等待的傳送機制會讓通道經常發生閒置的情況，使得通道的使用效率不彰及吞吐量下降的問題。

在第二種重傳機制「**回退 N 步**」的設計中，傳送端將依序發送傳送區間內的資料，而不會一直等待 **ACK** 回覆後才進行下一筆的資料傳送。如圖 4 所示，

在此例子中，假設傳送區間的寬度為 3 筆資料，因此傳送端依序送出編號 0、1、2 的資料。在資料 0 所對應的 ACK 回到傳送端之前，傳送端就已經送出資料 1 了。同理，在資料 1 所對應的 ACK 回到傳送端之前，傳送端已經送出資料 2 了。在傳送端送出一筆資料後，會為其開啟一個相對應的計時器，以等待 ACK 的回應。在回退 N 步的傳送機制中，可以發現傳送端同時會有多個計時器在計數。換句話說，回退 N 步的傳送端(和接收端)必需具備多條重傳程序(Retransmission Process)的能力，相較於停止並等待的重傳機制要來得複雜。此外，回退 N 步的重傳機制顧名思義就是在第 N 筆資料發生錯誤時，退回到第 N 筆資料，重新傳送第 N 筆資料後的所有資料，即使有些資料已在接收端被正確接收到，如圖 4 中的例子，資料 1 所對應的 ACK 被沒有被傳送端收到，因此發生重傳，而重傳的資料包含資料 1 本身及其後的資料 2。回退 N 步重傳機制這樣設計的好處在於可簡化接收端的設計，因為正確的資料如同停止並等待的重傳機制一般會依序到達，接收端不需要重新排列資料。相對地，回退 N 步的重傳機制會浪費部分頻寬來傳送已正確接收的資料。

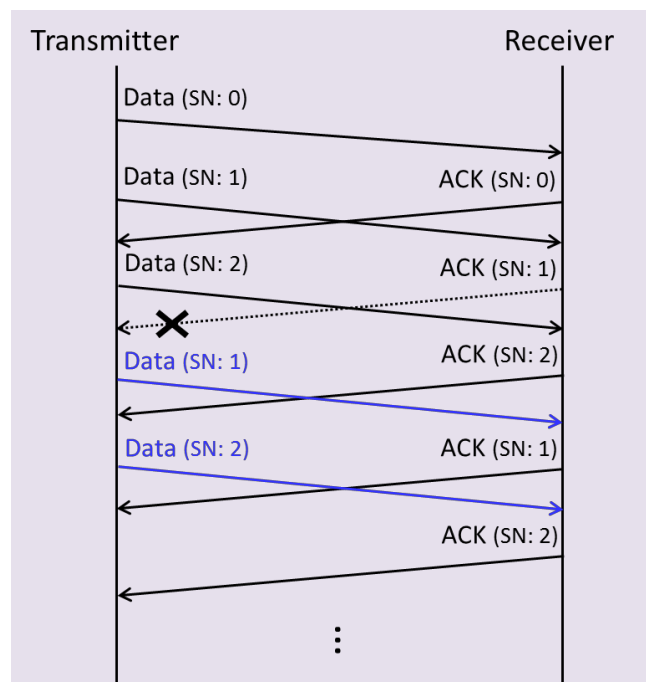


圖 4 回退 N 步的重傳機制：重新傳送資料 1 及資料 2

為了改善回退 N 步會浪費頻寬來傳送已正確收到的資料，第三種重傳機制是**選擇重傳**。如圖 5 所示，選擇重傳在傳送端基本的運作機制類似於回退 N 步，即在收到接收端回應的 ACK 之前就會進行下一筆資料的傳送，因此需要同時處理數個重傳程序。比較圖 4 和圖 5 可以發現：選擇重傳與回退 N 步的不同點在於，選擇重傳只會重傳沒收到 ACK 的那筆資料而已，並不會全部重新傳送所有錯誤資料以後的資料。選擇重傳在接收端就會比較複雜，接收端需處理資料重新排

列的問題。這是由於一筆重傳的資料可能會比初次就傳輸的資料來得晚抵達到接收端，如圖 5 的例子中，接收端在正確接收到資料 1 的時間點比正確接收到資料 2 的時間點來得晚，因此接收端需要彙整資料的順序後才能把資料遞送給上層。

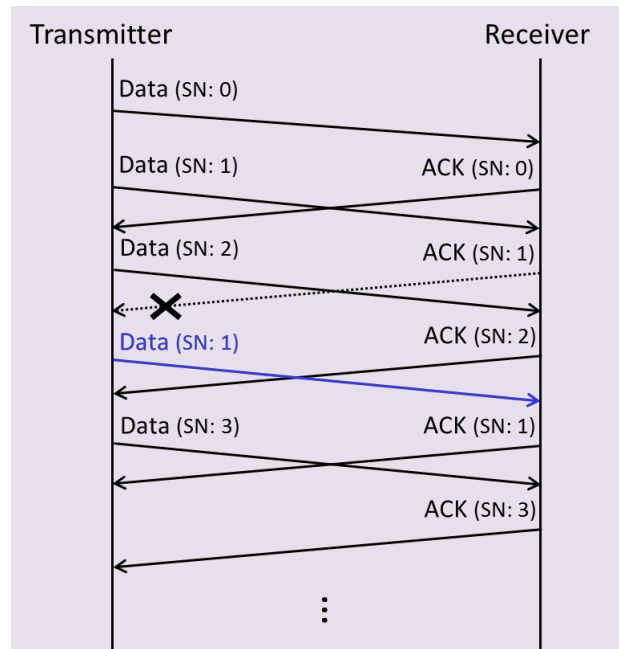


圖 5 選擇重傳：只重新傳送資料 1

總結上述不同的向後式錯誤修正機制，可以發現向後式錯誤修正只會在資料發生錯誤時發生重傳，額外佔用通道頻寬，而不像向前式錯誤修正是經常性地佔用通道頻寬。但若接收到的資料只是小部分有錯誤時，向後式錯誤修正仍然需要重傳整筆資料，這時又顯得過於浪費通道的頻寬。

3.3 LTE MAC 的混合式自動重傳

在上一小節中我們可以發現不論是向前式錯誤修正或是向後式錯誤修正都有其優點和缺點，向前式錯誤修正平時就會佔用一些頻寬，對於小區段的資料錯誤不用重新傳送整筆資料；向後式錯誤修正只會在發生重傳時佔用頻寬，但對於小區段的資料錯誤仍然需要重新傳送整筆資料。在 LTE MAC 層結合向前式錯誤修正和向後式錯誤修正的優點，以提供錯誤資料的快速修正，同時減少頻寬的浪費，因此稱作「混合式自動重傳」。

在混合式自動傳中，傳送端如同向前式錯誤修正會先對要傳送的資料進行通道編碼，以加入冗餘讓接收端在有錯誤時可自行修復。傳送端在此時會產生 4 種不同的冗餘版本(Redundancy Version, RV)，並選擇其中一種傳送給接收端，並

在傳送後開始計時器等待接收端的 ACK/NACK 回應。接收端在收到傳送包 (Transport Block, TB) 後進行解碼，若傳送的資料有錯誤時，可有利用向前式錯誤修正碼 (Forward Error Correcting Code, FEC Codes) 進行修復。若資料正確或能透過錯誤更正碼更正，則接收端回傳 ACK 給傳送端。若錯誤的資料無法透過錯誤更正碼來更正時，接收端就會向傳送端回應 NACK (Negative Acknowledgement)，要求傳送端重新傳送資料。值得注意的是，混合式自動重傳與一般向後式錯誤修正機制不同的點在於，接收端並不丟棄先前已解碼失敗的錯誤資料，而是放在一個 HARQ 緩衝器 (HARQ Buffer) 內，等待與下次重新傳送的資料進行軟合併 (Soft Combine)，再次重新解碼，以希求能在較少次數的重傳下，能解出正確的資料。在傳送端收到 NACK 或發生 ACK 回應過期時，傳送端會重新發送該筆資料的下一種冗餘版本 (RV) 給接收端。圖 6 描述一個混合式自動重傳的例子，在此例子中傳送端先傳送了冗餘版本 0 的資料給接收端，但接收端因物理通道錯誤無法正確解碼接收到的資料，於是接收端回傳 NACK 要求傳送端以不同的冗餘版本重新傳送該筆資料。接收端會將收到的資料放置在 HARQ 緩衝區內，以累計不同冗餘版本的資料，待軟合併能成功解出正確的資料後，接收端回應 ACK 給傳送端，完成此筆資料的傳遞。

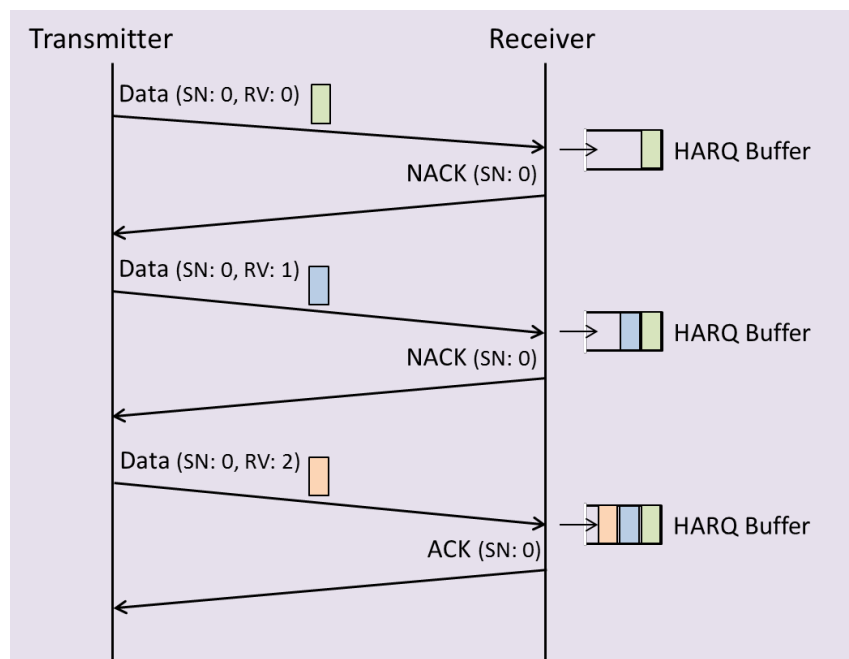


圖 6 混合式自動重傳：接收端會將初傳與重傳的資料進行軟合併

由圖 6 的例子可知，接收端會對緩衝區內的傳送包 (TB) 視為同一筆資料，進行軟合併再解碼，因此一個接收端的緩衝區一次只能處理一筆資料。傳送端也一次只會送出一筆不同冗餘版本的資料，因此混合式自動重傳中在向後式的錯誤修正中，採用的是停止並等待的重傳機制。為了提升通道的使用效率，在 LTE MAC 中採用了 N 個平行的混合式自動重傳程序 (N Stop-and-Wait HARQ Processes)，每

個混合式自動重傳程序有各自獨立的緩衝區供軟合併和解碼。如此一來，傳送端就可連續發送不同的資料，而不必等待接收端的 ACK 回應或計時器到期，使得 N 個平行的混合式自動重傳程序可達到類似選擇重傳協議，而不是停止並等待的重傳機制。至於需要幾個平行的混合式自動重傳程序取決於傳送端的處理延遲、通道的傳輸延遲及接收端的處理延遲。在圖 7 的例子中有三條混合式自動重傳程序，傳送端在發送資料 0 時使用程序 0，接收端以 HARQ Buffer 0 暫存，在資料 0 的 ACK 還沒回到傳送端之前，傳送端就可利用程序 1 來傳送下一筆資料(即資料 1)，如此進行直到所有的混合式自動重傳程序用完。然而當 ACK 從接收端回到傳送端時，其相對應的混合式自動重傳程序將可再被用來傳送新的資料，如圖 7 中的資料 3 是由已回覆過資料 0 ACK 的重傳程序 0 來處理。

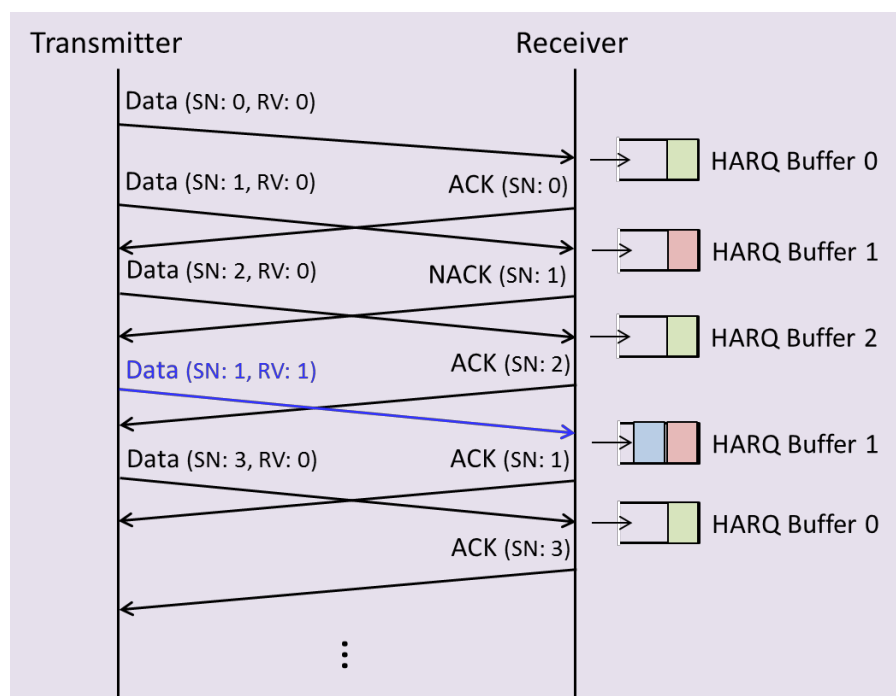


圖 7 三個平行的混合式自動重傳程序的例子

由以上混合式自動重傳機制可得知，所謂的初傳(新傳)與重傳是對同一個混合式自動重傳程序(同一筆資料)才有意義，不同的重傳程序之間並無直接相關。

3.4 HARQ 重傳時機

由於傳送端有多條混合式自動重傳程序可供選擇使用，所以傳送端在選擇使用那一條混合式自動重傳程序上，又可區分為：同步(Synchronous HARQ)與異步(Asynchronous HARQ)；在重傳所使用的資源調度上又可區分為：自適應(Adaptive)與非自適應(Non-adaptive)。

LTE MAC 在上行的部分使用同步的混合式自動重傳，即重傳程序的號碼是與系統的子幀號碼(subframe number)有一對一的關係，UE 端只要知道目前所在的子幀號碼就可決定出要使用那一條混合式自動重傳程序進行上傳的動作。同步的混合式自動重傳機制較為簡單，但缺乏調整的彈性。LTE MAC 在下行的部分則是採用異步的混合式自動重傳，即系統子幀號碼與重傳程序的號碼之間並無一定的關係，基站端可優先選擇已收到 ACK 的混合式自動重傳程序來進行下一筆新資料的傳送，使得資源的調度更有彈性，以提升下行的通道使用率。相對地，異步的混合式自動重傳機制較為複雜。

在重傳所使用的資源調度上，若是自適應重傳，則傳送端不需被告知重傳時所需使用的物理通道資源，而是直接在上次相同的頻域位置上來進行重傳，以節省控制信令的發送，但較缺乏彈性，因此自適應重傳只用於上行的情況。對於非自適應重傳，重傳所使用的物理通道資源可重新被指定在不同的地方，在時間上也可以被延後，富有彈性，因而被用於下行的重傳，以避開系統資訊(System Information)的發送。在一些情況下，上行也可以採用非自適應重傳。同步與異步、自適應與非自適應的混合式自動重傳整理如表 1 所示。

表 1 混合式自動重傳分類

混合式自動重傳	下行	上行
重傳程序選擇	異步	同步
重傳資源調度	非自適應	自適應或非自適應

3.4.1 下行 HARQ 重傳時機

表 2 UE 回饋 ACK/NACK 所對應的下行資料子幀號碼([4] Table 10.1.3.1-1)

TDD UL-DL Configuration	Subframe N									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	6	-	4	-	-	6	-	4
1	-	-	7, 6	4	-	-	-	7, 6	4	-
2	-	-	8, 7, 4, 6	-	-	-	-	8, 7, 4, 6	-	-
3	-	-	7, 6, 11	6, 5	5, 4	-	-	-	-	-
4	-	-	12, 8, 7, 11	6, 5, 4, 7	-	-	-	-	-	-
5	-	-	13, 12, 9, 8, 7, 5, 4, 11, 6	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	7	7	5	-	-	7	7	-

在基站端(傳送端)送出一筆資料後，由於經通道延遲加上接收端解碼處理的時間，UE 端(接收端)最快於資料送出後的第 4 張子幀回饋 ACK/NACK。在 FDD 模式下，UE 端回饋 ACK/NACK 固定在資料送出後的第 4 張子幀上傳，但在 TDD 模式下，資料送出後的第 4 張子幀不見得為可供上傳的子幀，因此回饋 ACK/NACK 會被延期至最近的下一次上傳子幀。不同的 TDD 上、下傳子幀設定會造成不同的回饋時機，假設基站端在子幀 N 收到來自 UE 的回饋，則該回饋所對應的下行資料子幀號碼為： $N-k$ ，其中 k 值整理如表 2 所示。

以下以 TDD UL-DL Configuration 2 做為例子來說明，如圖 8 所示，在此例子中有兩個上行的子幀，分別是：子幀 2 及子幀 7。由表 2 可得知，上行子幀 2 可用來回覆 8、7、6、4 張子幀前下行資料的 ACK/NACK，因此分別對應到上一張系統幀(System Frame)中的下行子幀 4、5、6、8。同理，上行子幀 7 可用來回覆上一張系統幀中的下行子幀 9，以及同一張系統幀中的下行子幀 0、1、3。

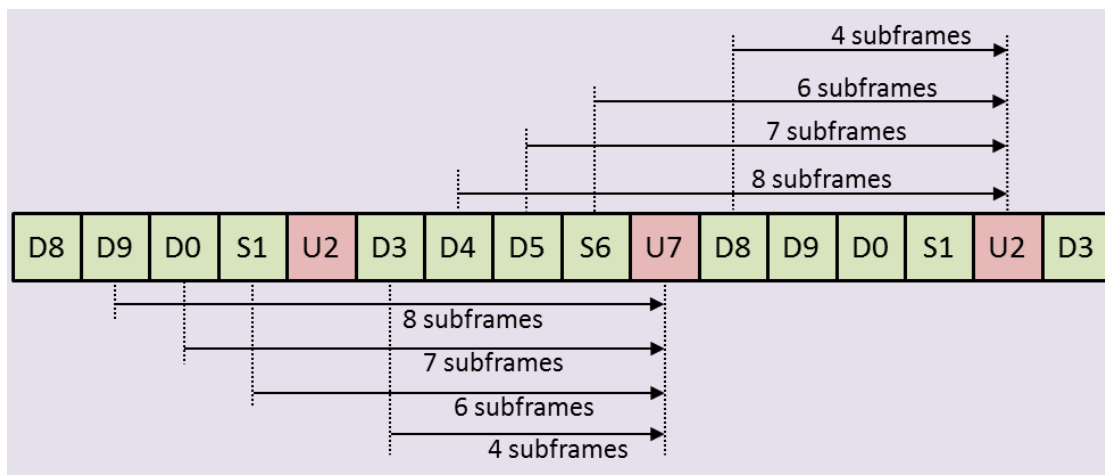


圖 8 ACK/NACK feedback of TDD UL-DL configuration 2

在傳送端的一條混合式自動重傳程序接收到來自接收端的回應後，若是 ACK，則此條混合式自動重傳程序可再接受下一筆新資料進行傳輸。若是 NACK，則此條混合式自動重傳程序可在至少 4 張子幀後進行重傳不同冗餘版本的資料。間隔至少 4 張子幀的由理與回應 ACK/NACK 延遲 4 張子幀的原因類似，必需考慮傳送端、接收端的處理時間及通道的傳輸延遲。

以下 TDD UL-DL configuration 2 為例子說明，在圖 9 中，假設資料 0 於混合式自動重傳程序 0 在系統幀 0 下行子幀 9 進行傳輸，之後於系統幀 1 上行子幀 7 得知錯誤。若混合式自動重傳程序 0 要進行重傳，則必需至少在 4 張子幀後進行重傳，即是在系統幀 2 下行子幀 1 進行重傳。

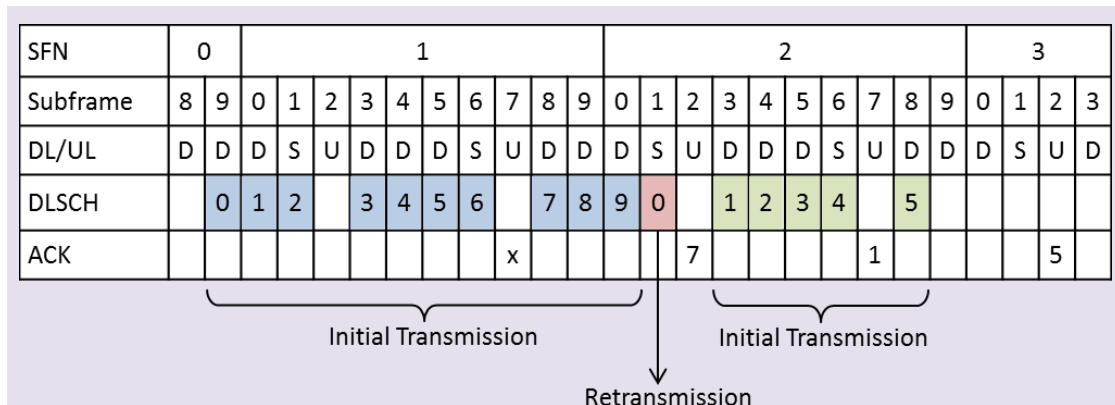


圖 9 TDD UL-DL configuration 2 下，資料 0 (HARQ 程序 0)發生重傳的例子

由表 2 可得知在 TDD UL-DL configuration 2 下，基站端(傳送端)得到 ACK/NACK 的回饋最長是 8 個系統子幀，若發生錯誤而重傳，則會再加上 4 個系統子幀，同一條混合式自動重傳程序才可以被用來傳輸(新傳或重傳)。為了讓傳送端可連續傳送資料而不必等待接收端的回應，在 TDD UL-DL configuration 2 下最多需要 10 條獨立的混合式自動重傳程序。而在其他不同的 TDD UL-DL configuration 模式下，可使用的混合式自動重傳程序數量則依上行、下行子幀數量不同而不同，整理如表 3 所示。在 FDD 模式下，MAC 層所可以使用的混合式自動重傳程序數量固定為 8 條。

表 3 TDD 模式下，下行可用的重傳程序最大數量([4] Table 7-1)

TDD UL/DL configuration	Maximum number of HARQ processes
0	4
1	7
2	10
3	9
4	12
5	15
6	6

3.4.2 上行 HARQ 重傳時機

在上一小節中我們提到與上行 HARQ 的機制與下行 HARQ 不同，上行方向地 HARQ 使用同步，上行方向的資料所對應的 HARQ Process ID 具有固定的順序，而重傳的時間也有固定的間隔，如此一來，使用者設備端在每次初傳或重傳上行資

料時都不需向基站指定所使用的 HARQ Process ID，也因此節省了這部分訊息的頻寬。

上行方向除了採用同步 HARQ 之外，LTE 亦提供 Transmission Time Interval (TTI) bundling 的傳輸模式來降低上行錯誤重傳的延遲時間。當使用者位於基站服務範圍的邊緣時，上行方向的資料在基站端會有較大的錯誤率，而造成上行(uplink)方向使用混合式重傳(HARQ)的次數增加、傳輸延遲也拉長。為了降低上行資料重傳造成的傳輸延遲，LTE 允許上行資料傳輸使用 TTI bundling 的傳輸模式，也就是說，使用者設備端會把同一份資料以不同的冗餘版本在上行子禡內連發送四次，由於基站端會進行軟合併，因此這份上行資料的錯誤率就可以降低，而由於重複發送的動作是在連續的上行子禡內進行，不需要等待 ACK/NACK 的回應才能準備下一次的重傳，上行方向的重傳延遲也可以大幅降低。上行方向所需要的混合式自動重傳程序數量，在 FDD 系統中為 8 條或 4 條(當使用 TTI Bundling 時)，而 TDD 系統中的 HARQ 程序數量則如表 4 所示會隨著上下子禡的配置數量不同而異。

表 4 TDD 模式上行方向可用的重傳程序最大數量([4] Table 8-1)

TDD UL/DL configuration	Number of HARQ processes	Number of HARQ processes (TTI bundling)
0	7	3
1	4	2
2	2	N/A
3	3	N/A
4	2	N/A
5	1	N/A
6	6	3

由於 LTE 的上下行資料排程都是由基站提供，在下行方向的資料傳輸的同時是會將此筆資料的控制訊息(諸如 HARQ process ID，編碼方式，可用頻帶配置等等)傳送給使用者設備端，讓使用者設備端可以依此對收到的下行資料正確解碼。然而在上行方向，使用者設備端需先被告知資料的排程與控制訊息，才能正確地把上行資料編碼並在合適的頻段上傳送。因此 3GPP 規範使用者設備端要傳送上行資料的 4 個子禡前，基站必須先發送上行方向的傳輸控制訊息給使用者設備端，而使用者設備端才能依此進行後續的傳送與錯誤重傳動作。當發送完下行資料後，使用者設備端也會在 4 個子禡後的下行子禡內回覆 ACK 與 NACK 訊息。

對於 FDD 系統不使用 TTI bundling 的狀況，由於每個子禡都有上行與下行的資源，因此對於一筆在子禡 $n+4$ 要傳送的上行資料來說，其排程控制訊息是固定

在下行子禎 n 由基站發送給使用者，而 HARQ 的回應則固定在 $n+8$ 的下行子禎由基站發送給使用者，若為 NACK，則使用者會在 $n+12$ 的上行子禎重傳上行資料。

對於 TDD 系統，根據不同的上行下行子禎組態，當使用者在子禎 n 發送排程控制信令時，使用者須在 $n+k_1$ 的子禎發送上行資料，而這筆上行資料的 HARQ 回應會在 $n+k_1+k_2$ 的子禎上收到，若收到的是 NACK，則使用者會在 $(n+k_1+k_2)+k_1$ 的子禎時再次發送資料， k_1 與 k_2 的值分別如表 5-(a)¹與表 6。另外，由於 TDD UL/DL 組態 0、1、6 是可以支援 TTI bundling，在 TTI bundling 啟動時，若使用者在子禎 $n-m$ 收到 NACK 回應，則會在 $n+k_1$ 時才會傳送下一次的 bundle， m 的數值如表 5-(b)。

表 5-(a) 上行初傳或 HARQ 重傳(無 TTI bundling)對應的 k_1 值 ([4] Table 8-2)

TDD UL/DL Configuration	subframe number n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4	6				4	6			
1		6			4		6			4
2				4					4	
3	4								4	4
4									4	4
5									4	
6	7	7				7	7			5

表 5- (b) 上行 HARQ 重傳對應的 m 值，有 TTI bundling ([4] Table 8-2a)

TDD UL/DL Configuration	subframe number n									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	9	6				9	6			
1		2			3		2			3
6	5	5				6	6			8
2~5	TTI bundling is not supported.									

¹ 在 TDD UL/DL Configuration 0 的組態時，由於上行子禎數量的配置比下行子禎的數量配置還多，同一個下行子禎所發出的上行排程控制信令可能會對應到多個上行子禎的資料傳送，此時使用者設備端須根據上行排程控制信令內的欄位資訊來決定每個上行排程控制信令所對應的上行資源配置，其詳細說明請見[4]第 8-0 節。

表 6 回饋 ACK/NACK 所對應的 k_2 值([4] Table 9.1.2-1)

TDD UL/DL Configuration	subframe index									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0			4	7	6			4	7	6
1			4	6				4	6	
2			6					6		
3			6	6	6					
4			6	6						
5			6							
6			4	6	6			4	7	

四、MAC 控制單元(Control Element)的功用

LTE MAC 子層負責傳遞某些系統控制單元給使用者，這些控制單元都有其固定的欄位與意義，在本章中我們將簡略說明各種控制單元的作用。

1. 上行(Uplink)方向控制單元

■ Buffer Status Report (BSR)

使用者端向基站通報上行方向的待傳資料量，基站端的 MAC 層可借由此項訊息來決定眾多使用者在上行方向的排序與時間排程。

■ Power Headroom Report (PHR)

使用者端向基站通報目前信號發送的功率與最大可發送功率等參數，基站端可借由此項訊息了解使用者設備的信號收發能力，亦可調整使用者的排程與發送功率。

■ C-RNTI

C-RNTI(Cell Radio Network Temporary Identifier)是使用者設備端向基站進行隨機接入程序時，由基站配給使用者設備的區域性辨識碼，長度為 16 位元，作為基站對其範圍內的使用者管理用途，使用者的資料收送都需要以這個 C-RNTI 對其資料進行編解碼。當使用者端具有 C-RNTI 但發現與基站的連結中斷、被中斷、或是接到換手(Handover)要求時，會在下次向基站進行隨機接入程序(Random Access Procedure)時將自己的 C-RNTI 發送給基站，基站可從 C-RNTI 的管理資料庫中將此使用者的資訊快速地找出來、幫助重新建立連線。

2. 下行(Downlink)方向控制單元

■ SCell Activation/Deactivation

發送載波聚合(Carrier Aggregation, CA)的啟動與停止參數。在 LTE 規範中提供了將多個頻段聚合在一起的信號處理技術，稱為載波聚合，每個使用者最多可以使用 5 個不同頻段來傳送資料，使用者必定會有一個 Primary Cell (PCell)負責傳遞主要的控制訊息，額外可能會搭配四個 Secondary Cell (SCell)來增加資料的傳輸量。這個控制單元就是讓使用者了解有哪些 SCell 可以使用。

■ UE Contention Resolution Identity

當使用者利用隨機接入程序完成後向基站發送第一筆正式的訊息(帶有使用者設備端的辨識號碼，通稱為 Msg3)後，基站會發送 UE Contention Resolution Identity (CRID)通知使用者 Layer 2 連線建立完成。

■ Timing Alignment Command

用於同步使用者設備端與基站的收發時間。由於基站同時會面多種多的使用者設備，當使用者設備們的位置不同，信號傳輸延遲(Propagation Delay)就會造成不同使用者設備的資料抵達基站端的時間不同步、互相干擾。基站藉由距離或是傳輸延遲(Propagation Delay)計算出使用者設備與基站端的時間差，週期性地將這個時間差由 Timing Alignment Command 控制單元發送給使用者設備，以進行基站端的時間同步。

■ DRX Command

用於傳送 Discontinuous Reception (DRX)的命令。在 LTE 規範中，為了讓使用者設備端可以更省電，設計了讓使用者設備可以週期性的關閉接收器以達到省電的效果，當使用者設備被告知了 DRX 的訊息與參數後，就可以在資料收送告一段落後進入 DRX 狀態，每隔一段時間才會再打開接收器看是否有資料須要收送。

五、 結論

在這次的技術文章中，我們介紹了 LTE MAC 子層在 LTE 通訊協定中的定位、重要性、與其提供的服務內容。這篇文章先針對 LTE MAC 的資料傳輸、錯誤重傳機制、與 MAC 控制單元做整體介紹，在下一次的技術文章中，我們將對 MAC 層最重要的使用者管理與資料排程的功能做詳細的說明。

參考文獻

- [1] LTE 無線電資源管理(1), 工研院資通所新興無線應用組技術支援, June, 2014.
Website: <http://wireless.itri.org.tw/>
- [2] 3GPP TS 36.300: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Overall description," v12.0.0, December, 2013.
- [3] 3GPP TS 36.321: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 12)," v12.0.0, December, 2013.
- [4] 3GPP TS 36.213: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Physical layer procedures (Release 12)," v12.0.0, December, 2013.