

## LTE PDCP 和 RLC 通訊協定

工研院資通所新興無線應用技術組 劉純宇

### 摘要

承接之前所介紹的 MAC 子層，本文旨在介紹 LTE 通訊協定第二層當中另外兩個子層：PDCP 和 RLC。PDCP 子層的主要功能為協助傳輸第三層的資料，並對資料進行：加/解密，完整性保護/驗證，檔頭壓縮，及過時資料丟棄等處理。而 RLC 子層的主要功能在於對封包進行切割/組裝，重新排序以確保資料的順序性，並利用自動重傳請求機制確保資料的正確性。

### 1、前言

在傳統的 OSI(Open Systems Interconnection)模型[1]中，第二層(Layer 2)又稱為資料鍊結層(Data Link Layer)，其主要功能在為相鄰的網路節點建立資料通道，並提供可靠的資料傳輸[2]。而 LTE 在第二層當中又定義了三個子層：PDCP，RLC 和 MAC。

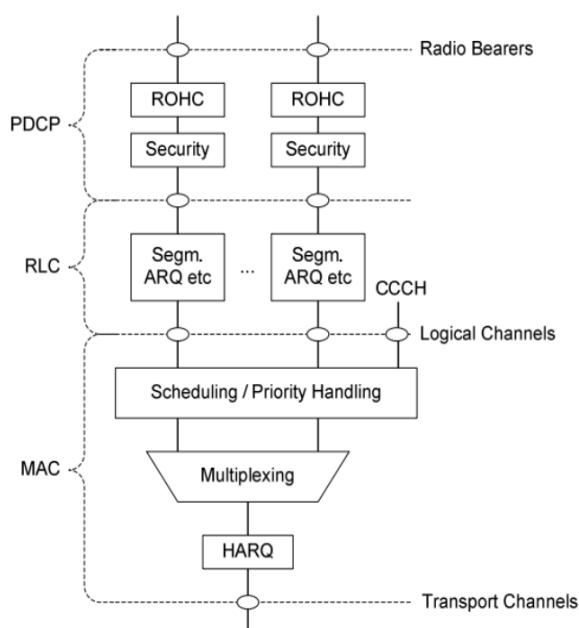


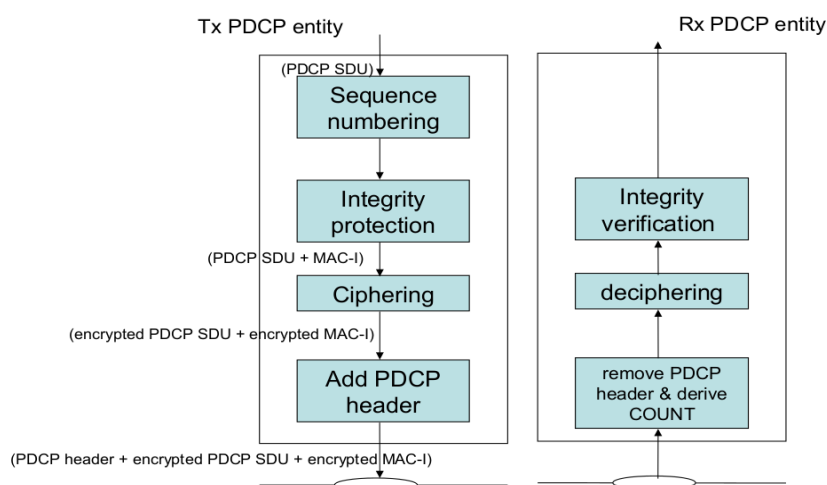
圖 1 LTE 第二層架構圖[3]

圖 1 為 LTE 第二層的架構圖。其中，PDCP 和 RLC 子層係由許多資料通道所組成，這些資料通道在 PDCP 子層中被稱作 Radio Bearer(以下簡稱 RB)，在 RLC 子層則被稱作 Logical Channel(以下簡稱 LCH)，每一條 RB 會對應一條 LCH。這些資料通道最後會在 MAC 子層匯總。而 PDCP 和 RLC 子層的標準規格就是在描述

這些資料通道的功能。關於 MAC 子層的介紹，讀者可參閱前面兩期的技術文章 [4][5]，以下僅針對 PDCP 和 RLC 兩個子層的功能，為讀者作一概括性介紹。

## 2、 PDCP

PDCP 名稱為 Packet Data Convergence Protocol 的縮寫，其規格描述於 3GPP 標準文件 36.323[6]當中。PDCP 子層的主要功能為傳輸第三層的資料。在 LTE 中，第三層指的是 RRC 層或是 IP 層。為了處理這兩種不同來源及特性的資料，PDCP 的 RB 可分為 SRB 和 DRB 兩類。



### (1) SRB

圖 2 PDCP SRB 功能示意圖

Signaling RB 的縮寫，用來傳輸 RRC 層的資料。圖 2 說明了 RRC 層資料進入 SRB 後會做的處理。SRB 主要會對 RRC 層的資料進行完整性保護(Integrity Protection)/完整性驗證(Integrity Verification)及加密(Ciphering)/解密(Deciphering)，以確保資料的安全性。

### (2) DRB

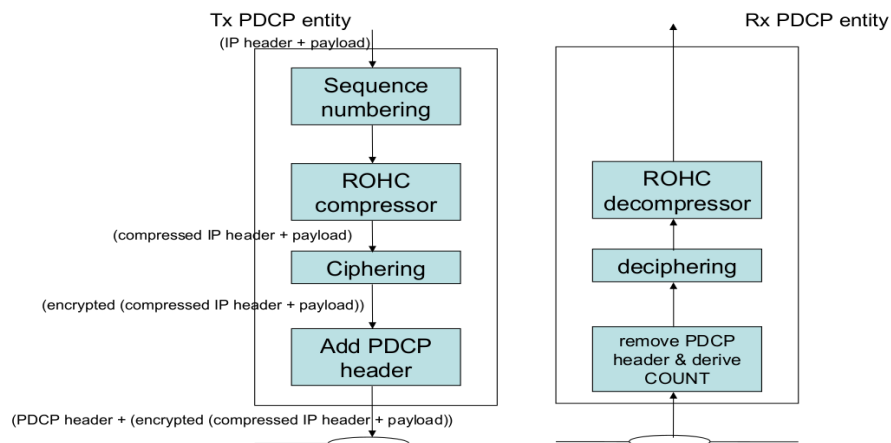


圖 3 PDCP DRB 功能示意圖

Data RB 的縮寫，用來傳輸 IP 層的資料。圖 3 則說明了 IP 層資料進入 DRB 後會做的處理。DRB 和 SRB 功能上主要的不同在於：DRB 會使用 ROHC 標準[7] 對 IP 層的資料進行檔頭壓縮(Header Compression)/解壓縮(Header Decompression)，但不會對 IP 層的資料進行完整性保護(Integrity Protection)/完整性驗證(Integrity Verification)。

## 2.1 PDCP 功能

### 2.1.1 檔頭壓縮/解壓縮

在 LTE 的網路中，語音資料是透過 IP 封包傳送；這類語音封包的特性就是：相較於檔頭長度，一個封包所承載資料的比例不高。因此，若是能縮減檔頭的長度，語音傳輸的效率就能提高。在 LTE PDCP 規格裡便引入 ROHC 標準來作為檔頭壓縮的方法。儘管支援 ROHC 標準並非必要功能，但若是 LTE 設備有語音相關的應用，就必須支援 ROHC 標準。

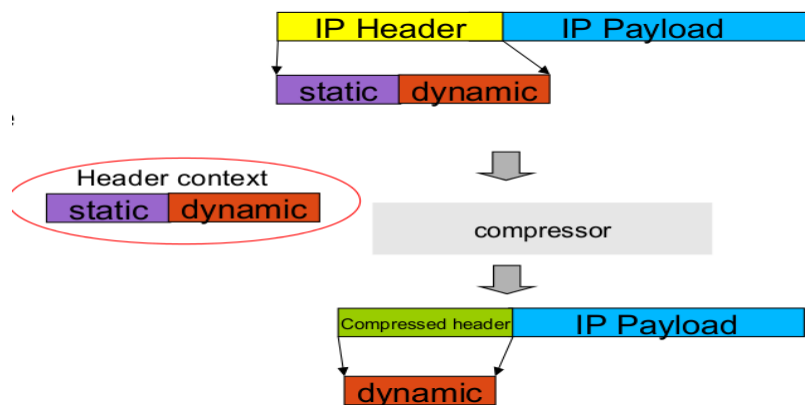


圖 4 檔頭壓縮原理示意圖

圖 4 說明了如何利用檔頭欄位的特性進行壓縮。一般來說，IP 封包檔頭的欄位依變動程度可區分為靜態(Static)欄位與動態(Dynamic)欄位。靜態欄位指的是該欄位在每個 IP 封包都幾乎帶相同的值(如"Version"欄位)；而動態欄位指的是該欄位在每個封包都不盡相同(如"Time To Live"欄位)。由於靜態欄位所帶的資訊變動不大，因此只有剛開始的時候需要送，其餘時間可以省略不送，僅傳送動態欄位的資訊。如此便可以增加頻寬使用的效率。

### 2.1.2 完整性保護/驗證

完整性保護/驗證是用來確保所傳輸的資料內容不會被自然或人為因素所破壞。方法是透過在原有的資料後面附加一串檢查碼來達成保護的效果。在 PDCP 子層中，僅有 SRB 的資料需要作完整性保護/驗證。

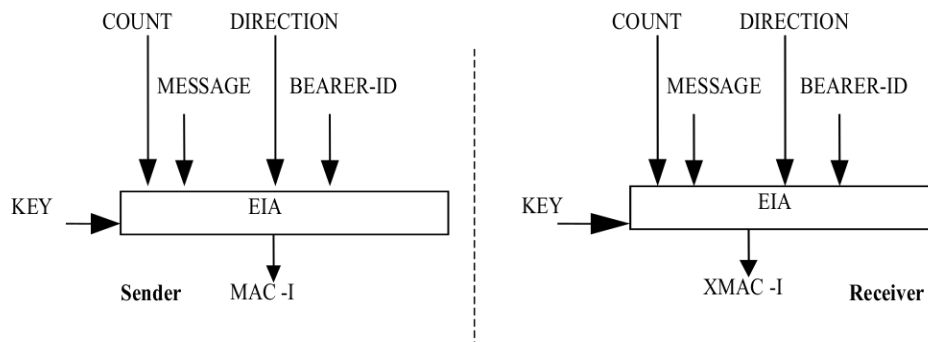


圖 5 完整性保護/驗證運作示意圖[8]

圖 5 為完整性保護/驗證運作的示意圖。MAC-I 為最後要附加在資料後面的檢查碼，長度為 32 位元。EIA 是指用來計算 MAC-I 的演算法，在 PDCP 子層中定義了三種 EIA 演算法：

- (1) EIA0：完全不做運算，所產生的 MAC-I 為 0
- (2) EIA1：SNOW3G 演算法
- (3) EIA2：AES 演算法

而 EIA 演算法所需要的輸入參數有：

- (1) MESSAGE：需要作完整性保護/驗證的資料
- (2) BEARER-ID：RB 的識別碼
- (3) KEY：完整性保護運算所需的密鑰
- (4) DIRECTION：資料的方向為上行(0)或是下行(1)
- (5) COUNT：資料的序號

當 PDCP 要對準備送出的資料作完整性保護時，會將上列這些參數輸入至 EIA 演算法，經過運算後便會產生 32 位元的 MAC-I，然後附加在原有資料的後面傳輸出去；相對的，當 PDCP 要對一筆帶有完整性保護檢查碼的資料作完整性驗證時，只要將收到的資料扣除 32 位元的 MAC-I 檢查碼後，連同上述的其他參數一起輸入 EIA 演算法，所得出的 32 位元驗證碼 XMAC-I 再與原本的 MAC-I 檢查碼比較，若是相同表示驗證成功，否則必須將驗證失敗的事件通知 RRC 層。

### 2.1.3 加密/解密

加密/解密是用來保護在無線環境中傳輸的資料內容不會被輕易地截取破解。在 PDCP 子層中，所有資料(不管是透過 SRB 或是 DRB 傳輸)都需要作加密/解密運算。

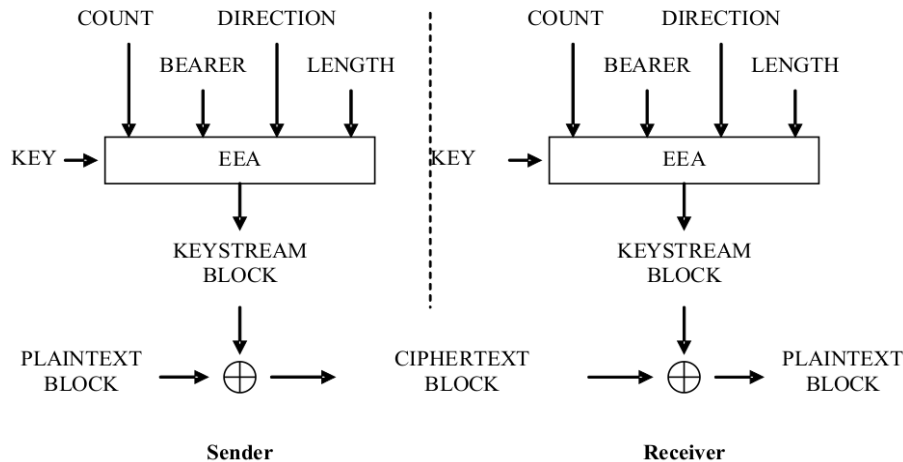


圖 6 加密/解密運作示意圖[9]

圖 6 為加密/解密運作的示意圖。EEA 為加密/解密所用的演算法，在 PDCP 子層中也定義了三種 EEA 演算法：

- (1) EEA0：完全不做運算
- (2) EEA1：SNOW3G 演算法
- (3) EEA2：AES 演算法

EEA 演算法所需的輸入參數有：

- (1) BEARER-ID：RB 的識別碼
- (2) KEY：加密/解密運算所需的密鑰(與完整性保護運算所需的密鑰不同)
- (3) DIRECTION：資料的方向為上行(0)或是下行(1)
- (4) COUNT：資料的序號
- (5) LENGTH：資料的長度

這些輸入參數經過 EEA 的運算後便會產生一串與原始明文資料(PLAINTEXT)相同長度的 KEYSTREAM，KEYSTREAM 再跟明文資料作 XOR 運算便得到密文資料(CIPHERTEXT)。當需要解密時，將密文資料與接收端算出的 KEYSTREAM 再做一次 XOR 運算即可還原成明文資料。

#### 2.1.4 過時資料丟棄

這項功能的目的常為一般人所不解：如果可以把資料處理完送出去，當然是盡量送出去最好，為什麼要將資料丟棄？

在 TCP 層中，若是偵測到某個封包傳遞所需時間較長，便會降低傳送速度以配合下層實際的資料處理速度。所以，若是硬要將已經延遲許久的資料送出，表面上看起來資料沒有漏失，但卻犧牲了整體的傳輸表現；與其延遲送出，倒不如提早丟棄，讓 TCP 層啟動重傳來作補救。所以，這個功能其實是在避免第二層的處理延遲過大而設計的機制。

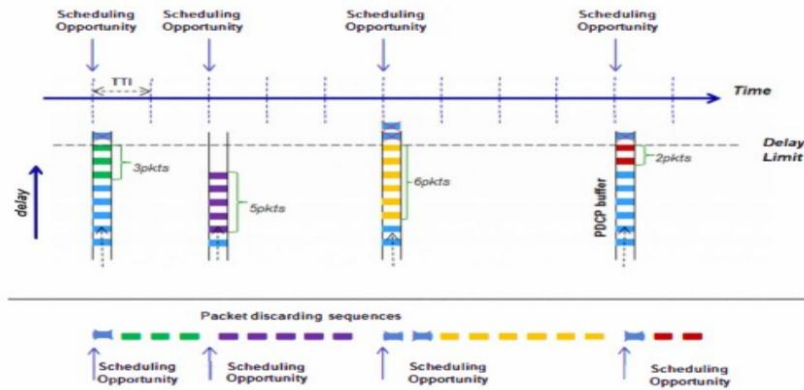


圖 7 過時資料的丟棄機制[10]

圖 7 說明如何以時間為基準來決定是否丟棄資料。當資料從上層進入後，若來不及處理，便會先放入內存；同時並啟動計時器(Discard Timer)。若是在計時器所指定的時間內，該筆資料還在內存中沒送出去，則此筆資料就會被丟棄移出內存；若是在 PDCP 子層當中還沒處理，則由 PDCP 子層移除；若是 PDCP 子層已處理完送至 RLC 子層，但 RLC 子層還沒處理的資料，則由 RLC 子層移除。

當然，這個功能並非必要功能，上層可以根據需求選擇是否開啟此項功能。至於這項功能對於傳輸效能的影響，有興趣讀者可以參閱相關文獻[10]。

### 3、 RLC

RLC 名稱為 Radio Link Control 的縮寫，其規格描述於 3GPP 標準文件 36.322[11]當中。RLC 子層的主要功能為傳輸上層(RRC 層或是 PDCP 子層)的資料。根據 RLC 子層內 LCH 所傳輸資料的特性，其運作模式可分為三種：

(1) TM：Transparent 模式

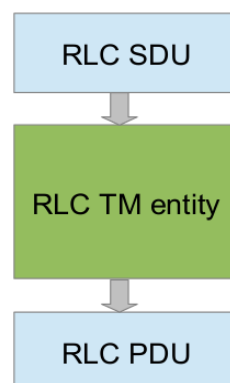


圖 8 TM 運作示意圖

顧名思義，這個模式就是不對資料作任何處理。圖 8 說明：運作於 TM 的 LCH，

其輸出資料內容完全等於輸入資料的內容。TM 主要用於傳輸某些 RRC 層的控制資料。

## (2) UM : Unacknowledged 模式

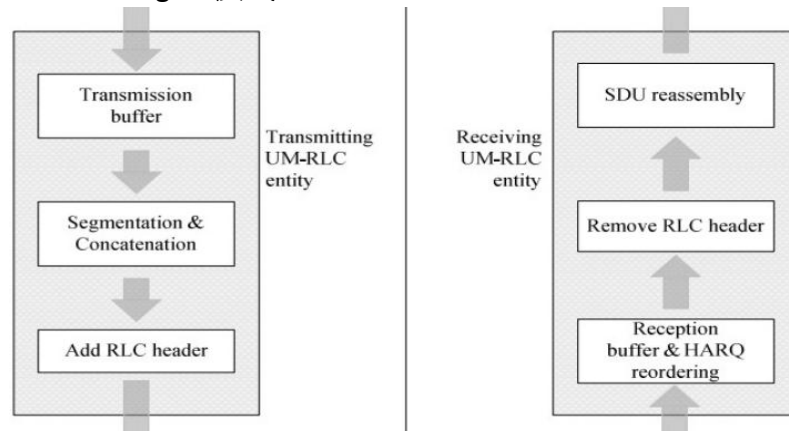


圖 9 UM 功能示意圖[11]

圖 9 說明了運作於 UM 的 LCH，其資料的處理過程。這個模式主要用於傳輸 PDCP DRB 資料的 LCH，由於不需要確認對方是否收到，主要應用在有即時性需求的資料(如 VoIP)。其主要功能有：

- 對資料進行切割/串接/重組
- 封包排序
- 偵測重複的封包

## (3) AM : Acknowledged 模式

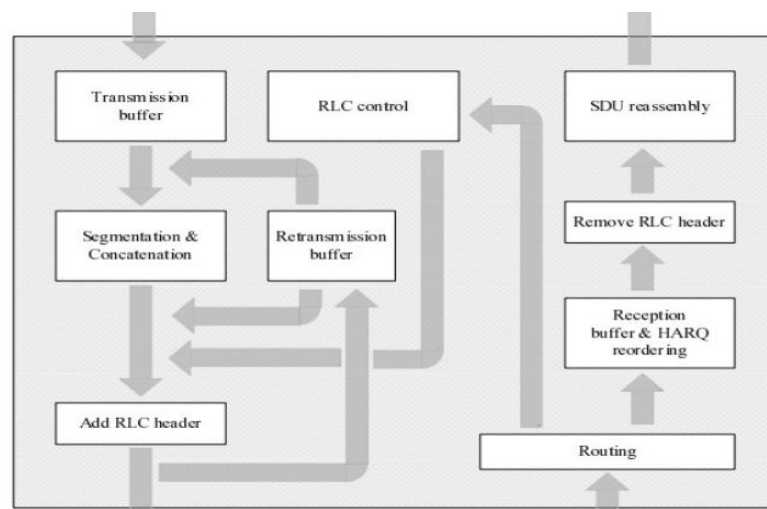


圖 10 AM 功能示意圖[11]

圖 10 說明了運作於 AM 的 LCH，其資料的處理過程。這個模式可用於傳輸 PDCP SRB 或 DRB 資料的 LCH。透過這種模式傳輸的資料，需要確認接收端是否



收到；當有可靠性資料傳輸的需求時，就可以使用這種模式傳輸。其功能除了 UM 原有的功能外，另外加上：

- 自動重傳請求(以下簡稱 ARQ)

### 3.1 RLC 功能

#### 3.1.1 切割/串接/重組

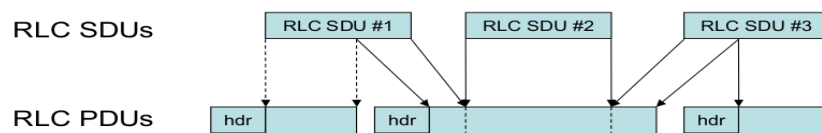


圖 11 RLC 的切割與串接功能示意圖

從上層進來等待 RLC 處理的原始資料被稱為 RLC SDU，處理過後的 RLC SDU 被稱為 RLC PDU。若要將 RLC SDU 傳送出去，RLC 必須等待下層配置適當的無線資源後才能傳送；但由於所配置的可傳送長度跟 RLC SDU 的長度不一定相等，因此便需要對 RLC SDU 作切割或是串接。圖 11 顯示 RLC 如何對 SDU 作切割/串接。當所配置的可傳送資源不足以傳送一筆 RLC SDU 時，原本的 RLC SDU 就會被切割，等待下次配置的資源再送；若所配置的可傳送資源大於 RLC SDU 的長度，就可以將多筆 RLC SDU 串接起來在同一筆 RLC PDU 內。

#### 3.1.2 封包排序

當接收端收到 RLC PDU 時，其順序有可能會亂掉。因此，RLC 需將順序亂掉的 RLC PDU 進行重新進行排序。

只是，明明發送端是照順序送出 RLC PDU，為何到達接收端順序就會亂掉？

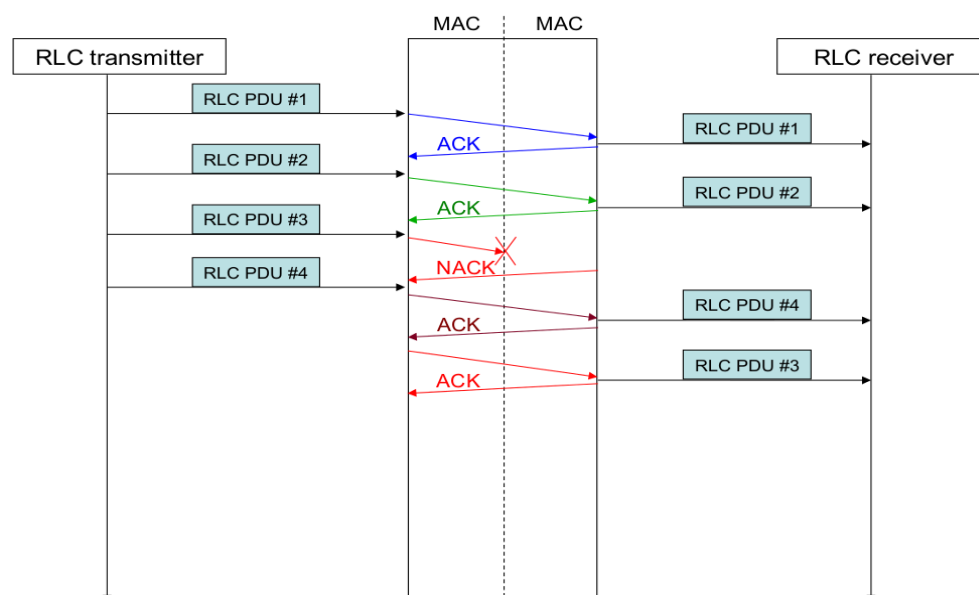




圖 12 RLC PDU 亂序示意圖

圖 12 說明為何接收端有可能收到順序錯亂的 RLC PDU。原因在於 MAC 子層的 HARQ 機制[4]。由於承載 RLC PDU 的 MAC PDU 有可能因為接收端沒收到而需要重傳，因此便有可能：比較晚送出的 RLC PDU，因為不需要重傳或是重傳次數較少，反而比送出時間較早，卻經歷比較多次重傳的 RLC PDU 還要早抵達接收端；因而造成接收端收到的 RLC PDU 順序錯亂的情形。

### 3.1.3 偵測重複的封包

當接收端收到重複的 RLC PDU 時，RLC 可以偵測出來並丟棄。至於為何會發生重複的封包，其原因也與 MAC 子層的 HARQ 機制有關。

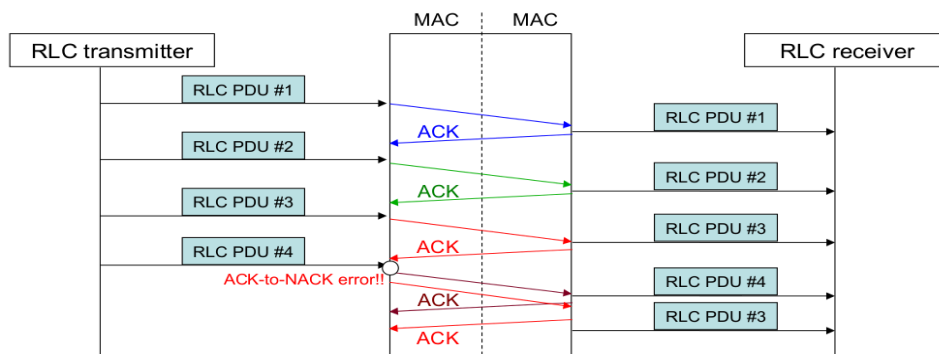


圖 13 RLC PDU 重複示意圖

圖 13 說明為何接收端有可能收到重複的 RLC PDU。由於 MAC 子層發送端的誤判，將原本接收端所回報的確認收到訊息(ACK)，誤判成沒有收到(NACK)；由於 ACK/NACK 資訊僅用 1 位元表示，所以有一定的機率會發生錯誤；而這會導致發送端又重傳一次，從而使接收端收到重複的封包。因此，RLC 子層必須要能偵測重複的封包並丟棄，以修正這樣的錯誤。

### 3.1.4 ARQ

ARQ 是一種用來降低資料錯誤率的機制；當接收端發現封包錯誤時，可以透過重傳要求來修正錯誤。

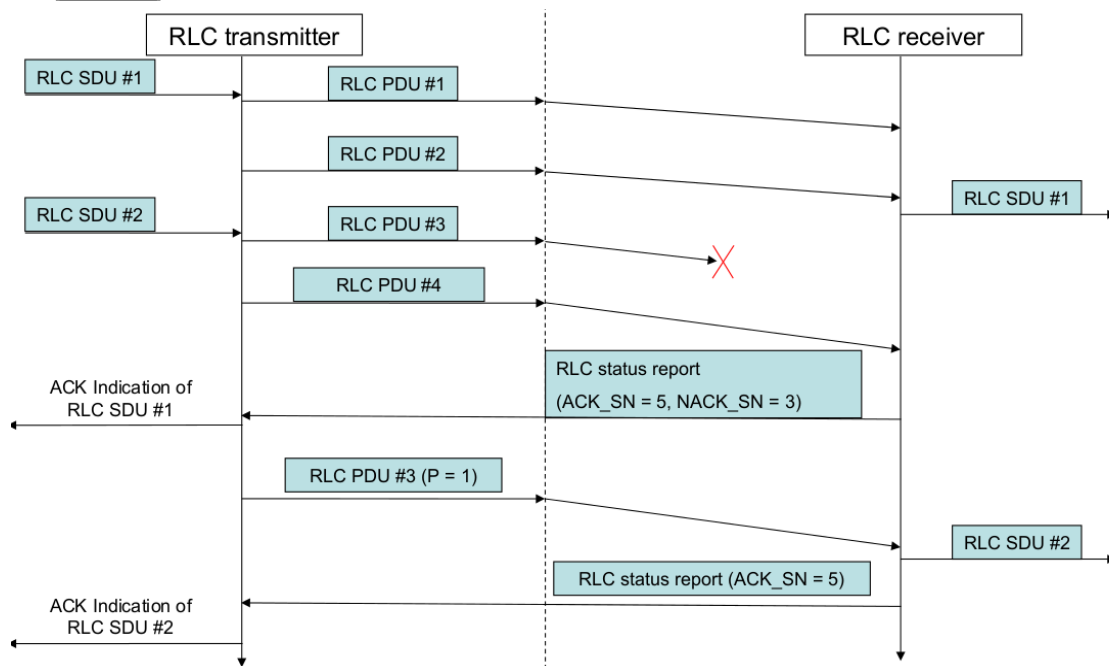


圖 14 RLC 的 ARQ 流程範例圖

圖 14 說明一個簡單的 RLC 的 ARQ 範例。流程如下：

- (1) 發送端將組好的 RLC PDU 作備份暫存以備重傳，然後送出；而此筆 RLC PDU 的檔頭會夾帶 1 位元的 Polling 資訊。
- (2) 接收端收到 RLC PDU 後，除了對 PDU 作處理以外，也會檢查 Polling 位元；若 Polling 位元為 1，表示接收端需要作狀態回報(Status Report PDU)，告知發送端有哪些 RLC PDU 已經收到，哪些 RLC PDU 需要重傳；若 Polling 位元為 0，表示接收端不需要作狀態回報。
- (3) 當發送端收到狀態回報後，即根據狀態回報的內容，從原本的備份中取出接收端沒收到的 RLC PDU 作重傳；至於接收端已經收到的 RLC PDU，則從備份當中移除。

此外，一些 ARQ 機制的細節說明如下：

#### (1) 發送端可傳送區間

由於 RLC 的 ARQ 可以允許傳送一段時間後再請接收端一次回報，而無須接收端每收到一筆 PDU 都回報一次；但這有範圍上限。

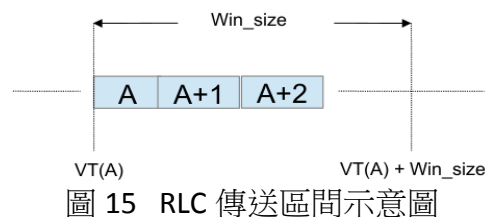


圖 15 RLC 傳送區間示意圖

圖 15 說明一個 RLC 發送端的可傳送區間。 $(VT(A) - 1)$ 代表最近一次接收端回報收到的 RLC PDU 序號。只要狀態回報內含有收到的 RLC PDU 序號，則  $VT(A)$  就會更新。 $Win\_size$  為可傳送區間的大小。也就是說，發送端能夠傳送的 RLC PDU 序號範圍為  $VT(A) \sim (VT(A) + Win\_size)$ ；若是資料一直送但接收端沒有作狀態回報更新  $VT(A)$ ，則發送端能送的範圍只允許到  $(VT(A) + Win\_size)$ ；若此時還有資料要送，RLC 便無法再送。

## (2) Polling 的啟動時機

為節省無線頻寬，RLC 子層並不會隨時要求接收端作狀態回報；只有限定在某些條件下，RLC 才會將 Polling 位元設為 1，夾帶於某個 RLC PDU 送出，要求接收端回報。Polling 的啟動時機如下：

- 當傳送的 RLC PDU 超過一定數目時(該數值會由上層設定)
- 當傳送的資料量超過一定數目時(該數值會由上層設定)
- 當內存的資料以及重傳的資料都已經送出時
- 當送出的 RLC PDU 序號已經抵達可傳送區間的上限
- 每當有一筆 Polling 位元為 1 的 RLC PDU 送出，RLC 便會啟動計時器(Poll Retransmit Timer)；若在計時器指定時間內沒有收到接收端發的狀態回報，則重新啟動 Polling

## (3) 狀態回報

狀態回報是用來告知發送端目前的接收狀況，並要求重傳沒收到的 RLC PDU。回報時機有兩種：

- 被動回報：當收到 RLC PDU 檔頭的 Polling 位元值為 1 時，即行回報
- 主動回報：當發現 RLC PDU 有漏失的情況，不待 Polling 即主動回報

此外，為了避免過多的狀態回報佔用了寶貴的無線資源，RLC 會利用一個計時器(Status Prohibit Timer)限制回報的頻率；每當一個狀態回報送出，該計時器便會啟動；在計時器指定的時間範圍內，不得再發送狀態回報。

## (4) 重傳

當狀態回報中內含有某些 RLC PDU 沒收到的訊息，則發送端會啟動重傳。但重傳次數並非無限，一旦重傳次數超過某個上限(該值由上層設定)，則回報給 RRC 層處理。此外，由於 RLC 在送資料時需根據下層所告知的無線資源大小來決定 RLC PDU 的大小；所以，若是重傳時所配置的無線資源不足以重傳一筆 RLC PDU，則 RLC 會對該筆 RLC PDU 重新切割以符合目前無線資源的大小。

# 4、 結語

在 LTE 的第二層中，PDCP 和 RLC 子層都是用來建立資料的通道，讓上層的資料可以藉由這些通道傳輸。PDCP 子層主要功能是：對進入通道的資料進行加

/解密，完整性保護/驗證，檔頭壓縮/解壓縮，及過時資料丟棄等處理；而 RLC 子層的主要功能則是：對資料進行切割/組裝，重新排序以確保資料的順序性，並利用自動重傳請求機制確保資料的正確性。藉由這兩個子層的功能，資料才得以可靠地傳輸。

## 參考文獻

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/OSI\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/OSI_model)
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Data\\_link\\_layer](http://en.wikipedia.org/wiki/Data_link_layer)
- [3] 3GPP TS 36.300 V8.12.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Overall Description; Stage 2"
- [4] LTE MAC 通訊協定(1)，工研院資通所新興無線應用技術組，2014.08
- [5] LTE MAC 通訊協定(2)，工研院資通所新興無線應用技術組，2014.09
- [6] 3GPP TS 36.323 V8.6.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification"
- [7] IETF RFC 4995, "The RObust Header Compression (ROHC) Framework"
- [8] 3GPP TS 33.401 V8.4.0, Fig. B.2-1
- [9] 3GPP TS 33.401 V8.4.0, Fig. B.1-1
- [10] "LTE system performance optimization by discard timer based PDCP buffer management", Vmar Toseef, Thushara Weerawardane<sup>1</sup>, Andreas Timm-Giese, Carmelita Gorg
- [11] 3GPP TS 36.322 V8.7.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification"