

# A PHY-MAC Cross-Layer Approach for Sleep Scheduling in LTE/LTE-A Uplink

Jen-Jee Chen, Shuang-Cheng Yang\*, I-An Wang, Simon Cimin Li, and Chien-Kai Liu

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Tainan 70005, Taiwan

**Abstract** — *To support mobility, wireless mobile devices are powered by batteries; however, a battery can only store a limited amount of energy. Take a 3G handheld device for example, according to the real test, the wireless interface consumes the largest proportion of the total amount of power (up to 40%). In particular, the 4G wireless communications adopt OFDMA and MIMO as the wireless access technology, where the former improves the bandwidth efficiency and the latter enhances throughput. In this case, the wireless interface in a mobile device will consume much more power than that for 3G devices. To save power, we have designed a PHY-MAC cross-layer sleep scheduling method which considers power saving, energy efficiency, and QoS at the same time over the 4G LTE/LTE-A wireless networks. Several papers have been published or submitted and three master theses have been accomplished. In this paper, we discuss a cross-layer design of sleep scheduling in 3GPP LTE/LTE-A wireless networks. The design jointly considers the Medium Access Control (MAC) layer multi-user sleep scheduling (via the settings of DRX/DTX parameters) and the physical layer power and radio resource allocations. The new approach enables UEs to gain longer battery life time and better utility of radio resource while guarantee the delay, packet drop rate, and maximum transmit power constraints. The design is validated through comparisons with simulation results and we find significant improvement on power saving.*

**Index Terms** — 4G, LTE/LTE-A, cross-layer design, QoS(Quality of Service), sleep scheduling, power allocation, DRX(Discontinuous Reception), wireless networks



\* Corresponding author: leehom300@gmail.com

DOI : 10.6159/IJSE.2015.(5-4).03

# 在 LTE/LTE-A 上行網路下的一個跨層睡眠排程方法

陳建志, 楊雙丞\*, 王禕安, 李世明, 劉建凱  
國立臺南大學電機工程學系

## 摘要

無線行動裝置支援行動性，使用電池供給裝置電力，但只能維持裝置有限時間的運作；以 3G 手機為例，根據實際測試，手機運作時以無線通訊介面損耗的電力最為可觀，佔全部耗電比例的 40%（處理器為 20%，顯示螢幕則為 13%），而最新的 4G 無線存取技術採用高效率的 OFDMA(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) 搭配 MIMO(Multi-input Multi-output) 增進傳輸速率，無線網路介面的耗電因此更多。在本論文中，我們討論了在 3GPP LTE/ LTE-A(3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution/ Long Term Evolution -Advanced) 的無線網路下，睡眠調度的跨層設計。設計同時考慮了媒體存取控制 (Medium Access Control; MAC) 層的多用戶睡眠調度 (藉著 DRX/ DTX (Discontinuous Reception/ Discontinuous Transmission) 參數的設置) 和實體層功率和無線電資源分配。本論文提出的方法還同時考慮了延遲時間、封包遺失率和最大發射功率的限制下，使行動裝置能夠獲得更長的電池續航時間和提升無線資源的使用率。本研究的設計透過模擬進行比較與驗證，可以發現對省電效能有很大的改善。

關鍵詞 — 4G, LTE/LTE-A, 跨層設計, 服務品質, 睡眠排程, 功率分配, DRX, 無線網路

## 一、前言

多媒體無線通訊以及各項雲端應用服務已變成越來越多使用者生活中重要的一部份，根據 2013 年聯合國 ITU(International Telecommunications Union) 最新的統計資料可知，全球的行動用戶 (mobile subscribers) 已達到 70 億 [1] (平均每人持有一支手機)，由此可知，無線通訊產業之蓬勃發展及技術不斷提升之必要性，已成一可預見及不可逆的趨勢。無線行動裝置 (如智慧型手機與平板電腦) 具有可行動性，使用電池供給裝置電力，但是無線行動裝置的電池，其體積與重量皆受到限制，可供應的電量有限，往往只能維持裝置在有限時間下的運作，許多研究已經指出，如何提供手持式無線行動裝置，更長的連續不充電時間，是這樣型態的裝置的首要議題 [2, 3]；如果我們逐一分析手機中各項元件的耗電量，一支 3G 手機運作的過程中，最耗電的三項元件依序為：無線存取介面 (40%；WiFi、3G 或 GSM/ EDGE(Global System for Mobile Communications/ Enhanced Data rates for GSM Evolution)、處理器 (20%) 和顯示螢幕 (13%) [4]，其中以無線存取介面所耗損的電力最為可觀，尤其第四代 (4G) 無線通訊系統，採用 OFDM/ OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiplexing/ Orthogonal Frequency-Division Multiple

Access) 搭配 MIMO(Multi-input Multi-output) 做為無線通訊端的存取技術，提供寬頻存取 [5]，比 3G 晶片耗用更高的電力 [6, 7]，從參考文獻 [7] 的實際測試可以看出，與 3G 和 WiFi 網路比較，LTE/LTE-A 網路可提供行動裝置更高的傳輸速率，但是 LTE/LTE-A 無線存取介面所需耗損的電力，無論在上行或下行都比 3G 和 WiFi 高出許多 (無線存取介面的耗電功率 LTE/LTE-A 約為 3G 的 2-3 倍)。另外，雲端應用愈益普及，可預期亦將增加無線行動裝置在無線通訊上所消耗的電量。為了能替無線行動裝置節省電力延長其續航力，本研究針對 LTE/LTE-A 的通訊協定設計高效能的跨協定層睡眠排程機制，期能有效減少行動裝置不必要的耗電，延長電池的續航力，並且仍然保證資料傳輸時所需的服務品質 (QoS; Quality of Service)。

針對上述問題，LTE/LTE-A 無線行動通訊標準定義有 MAC(Medium Access Control) 層的睡眠模式 (sleep mode) 讓行動裝置使用，並且允許基地台對行動裝置進行發射功率控制；啓動睡眠模式的無線行動裝置，當沒有資料傳輸或接收的需求時，可以關掉其無線介面，由系統先幫忙暫存來自網路的資料 (通常由 LTE/LTE-A 中的基站 Evolved Node B (eNB) 負責此事)，等到無線行動裝置的無線介面下一回週期性的醒來，才開啓無線介面做資料的傳輸；發射功率控制除了可以減少裝置與基地台以及裝置與裝置間的干擾，還可以減少裝置不必要的耗電；睡眠模式以及傳輸功能控制均能有效幫助無線行動裝置節省電力，但是 LTE/LTE-A 通訊標準中並沒有定義任何省電排程方法，所以為了達到減少行動裝置耗電，保證資料傳輸時所需的服務品質能被滿足 (如滿足封包傳輸時所需的即時性以及封包的遺失率能在一定的比例之下)，本研究針對 LTE/LTE-A 無線通訊協定之省電排程以及能源分配演算法已完成研究。

近年來無線資料傳輸的需求快速增加，智慧型裝置與寬頻行動上網的用戶也越來越多 (用戶已從 2012 年的 15 億增加到 2015 年的 34 億 [1])，新興的 3gpp 第四代無線通訊系統被稱為 Long Term Evolution-Advanced (LTE-A) 即被設計來因應此一趨勢 [8-12]，類似於大多數的無線通訊系統，如何節省能源以提升無線行動裝置的續航力一直是最重要的議題之一，因為這個原因，LTE-A 系統設計有睡眠模式，稱為 Discontinuous Reception (DRX) 和 Discontinuous Transmission (DTX)，可以支持無線行動裝置進行高速傳輸但是卻能同時作到節能 [13]-[15]；相對於一般省電節能排程的研究其省電機制設計不是從 MAC 層睡眠模式著手，就是從實體層的傳輸功率控制著手，本計畫則採取跨實體層與 MAC 層協定設計的方法來安排網路

中無線行動裝置的節能睡眠與資源排程，這個方法同時考慮了 MAC 層的多用戶睡眠排程與實體層傳送功率和資源安排，以達到省電效能的最佳化。和其它的方法相比較，我們所提出來的 PHY-MAC Cross-Layer Algorithm (P-MCLA)不只是得到更好的省電效果以及較佳的無線頻寬利用率，也保證無線行動裝置資料傳輸的延遲、封包遺失率、以及最大傳輸功率的限制。

二、文獻探討

本論文以上行方向為例來設計睡眠與資源排程方法，事實上下行方向一樣適用我們所設計的方法，只是下行方向的無線行動裝置端實體層接收功率與接收速率的相依性非常小[7]，無論任何接收速率，無線行動裝置所需要消耗接收功率幾乎呈現定值，所以下行方向的問題相對於上行方向相對簡單，所以以上行為例來設計方法具有通用性。

LTE/LTE-A 上行採用 Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)技術，SC-FDMA 是一種混合式傳送方法，結合傳統 OFDM 的優點與 single carrier 調變低峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)的好處，可以使得電力有限的無線行動裝置在電力的使用上相對於單純使用 OFDM/OFDMA 有更佳效率。

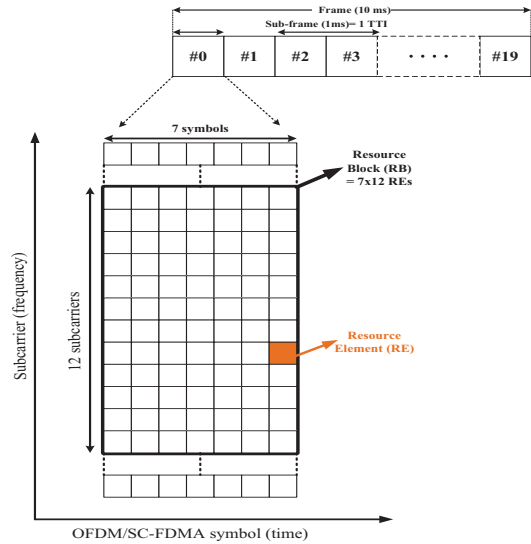
在 LTE/LTE-A 中支援根據用戶的通道狀況來採取適合該用戶的調變與編碼方法(MCS, Modulation and Coding Scheme)，而調變與編碼方法的判斷是根據用戶現在的 CQI(Channel Quality Indicator)，在 LTE/LTE-A 中支援 15 種不同的 CQI 值，分別是編號 1 到 15，而每一種值會對應到一種調變與編碼方法，以及 RB(Resource Block)的使用效率，表一提供 CQI 與調變編碼方法和效率對應的參考 [16]。

表一、4-bit CQI 表

CQI	MCS	Modulation	Code rate x 1024	Efficiency
1	0	QPSK	78	0.1523
2	0	QPSK	120	0.2344
3	2	QPSK	193	0.3770
4	5	QPSK	308	0.6016
5	7	QPSK	449	0.8770
6	9	QPSK	602	1.1758
7	12	16QAM	378	1.4766
8	14	16QAM	490	1.9141
9	16	16QAM	616	2.4063
10	20	64QAM	466	2.7305
11	23	64QAM	567	3.3223
12	25	64QAM	666	3.9023
13	27	64QAM	772	4.5234

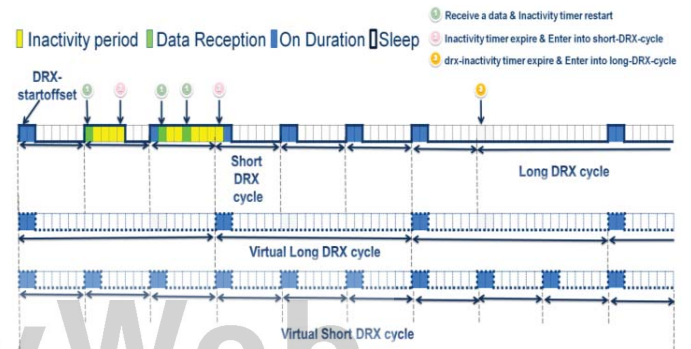
14	28	64QAM	873	5.1152
15	28	64QAM	948	5.5547

在 LTE/LTE-A 中，Frequency Division Duplexing (FDD)訊框結構如圖一所示，無線資源在時間軸上被分為一個一個的訊框(frame)，每個訊框的長度為 10ms，每個訊框包含 10 個等長的子訊框(subframe)而每個子訊框又包含 2 個等長的 slots，每個 slot 被進一步在頻率上切割出一個一個的 subcarriers(每個 subcarrier 的頻寬是 15kHz)而在時間上則切割出 7 個 symbols(如圖一)，每 12 subcarriers 7 symbols 共 84 個 Resource Elements(REs)被稱為一個 RB(Resource Block)，而資源配置的基本單位是以連續 2 個時間軸上的 RBs 做為配置的最小單位(必須在同一個子訊框中)，所以每個最小配置單位包含 168 REs，我們又把它稱為 1 個 TTI。



圖一、FDD 訊框結構以及 RB 結構

LTE/LTE-A 的睡眠模式被稱為 DRX，DRX 機制運作時可以保證無線行動裝置與網路的連線，以及 QoS，而 DRX 的運作如下圖所示。



圖二、DRX 的運作

一個 DRX 的週期是由 On Duration Time( $T_{ON}$ )開始，在這段期間，無線行動裝置會監控 Physical Downlink Control Channel (PDCCH)來得知在 eNB 端是否有任何資料正在等待它接收，值得一提的是 inactivity timer( $T_I$ )，一旦

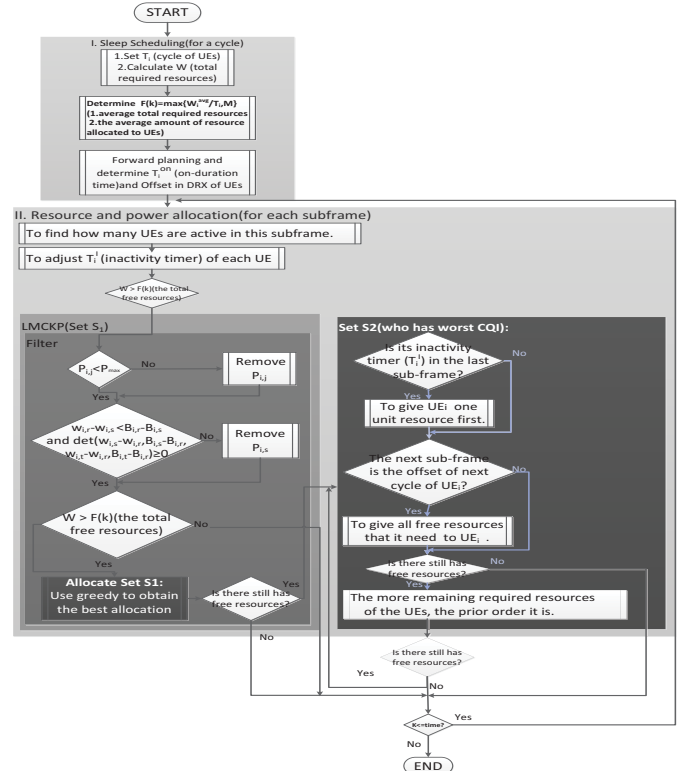
無線行動裝置的狀態為 active，而且在  $T_{ON}$  期間有接收過資料，它接下來會持續 active 至少  $T_I$  時間長度，如果持續  $T_I$  個子訊框都沒有再有資料接收的情況，則無線行動裝置才會再所餘的週期時間進入睡眠狀態來節省能源，這個睡眠時間又稱為 sleep period。固定  $T_{ON}$ ，一個較長的 DRX 週期可以替無線行動裝置節省較多的能源，但是會增加它的延遲時間；另一方面，一個較短的 DRX 週期則可以替無線行動裝置縮小它的反應時間可是卻增加額外的能源花費，為了能平衡兩者的優點與缺點，DRX 設計了 Short DRX 模式和 Long DRX 模式，它們有相同的  $T_{ON}$  長度，但是使用不同的 DRX 週期。

參考文獻[17-18]研究 DRX 為 LTE/LTE-A 排程所帶來的影響，結果顯示，DRX 參數的設定，如 inactivity timer 和睡眠週期，都會為效能帶來很大的影響，所以這些參數如何設定是一個重要的議題。參考文獻[19]的作者針對多媒體資料群播的應用進行 DRX 設定最佳化，要利用 DRX 來減少無線行動裝置不需要的 active 時間，並且仍然保證多媒體應用的 QoS。參考文獻[20]則研究如何最佳化 DRX 睡眠參數，研究結果顯示，對於即時性串流的應用，採用 Short DRX 模式是比較好的。但是上述的研究均單獨就 MAC 層的部份作最佳化，它們均把睡眠時間的最大化作為目標函數，可是卻乎略因為盲目使用最佳效率調變編碼方式所造成的額外功率與能量的損耗，而且無線行動裝置的通道狀況一直在改變，僅依靠 MAC 層的排程，並無法保證行動裝置的 QoS 能被滿足，可能造成原來預想的 QoS 滿足狀況與真實情況有極大誤差，所以這樣的方法其能達到的最佳效能仍有其限制。為了因應上述的問題，參考文獻[21]針對 WiMAX 網路提出跨 PHY-MAC 的睡眠排程方法，這個方法與僅考慮 MAC 層的方法相比可以得到更佳的省電效果，但是這個方法僅適用於 WiMAX 網路而無法使用在 LTE/LTE-A 網路，而且它仍然沒有考慮到多變的通道條件下，該如何保證無線行動裝置服務品質的問題以及封包遺失率保證的問題。

### 三、研究方法

本論文所要討論的睡眠排程與資源分配的問題可以定義如下：在網路中有一個中央的 eNB 以及  $N$  個 UEs (User Equipments)，每一個  $UE_i, i=1..N$ ，被保證可得的平均資料速率為  $r_i$  (in bits/subframe)，而它的延遲限制為  $D_i$  (in subframe)，我們定義  $C_i(t)$  表示在子訊框  $t$  時  $UE_i$  使用最大傳送功率 ( $P_{MAX}$ ) 時可得的通道速率 (in bits/TTI) (我們假設  $C_i(t)$  是可以透過既有的技術來估測的)，每一個子訊框的無線資源可以看成是一個一維的陣列資源，而且把它定義為  $M$  TTIs，本論文的目標是要設計一個跨 PHY-MAC 層的上行睡眠與資源配置方法，這個方法可以排程  $N$  個 UEs 的睡眠，也就是說對於每一個  $UE_i, i=1..N$ ，我們必須安排它的睡眠週期 ( $T_i$ )、on duration ( $T_i^{on}$ )、offset ( $T_i^{off}$ )、以及 inactivity timer ( $T_i^I$ )，無線資源方面，則必須可以配置每個  $UE_i$  在每個子訊框  $t$  的無線資源 ( $w_i(t)$ )、傳送功率 ( $P_i(t)$ )、調變與編碼方法 ( $CQI_i(t)$ )、和所可以傳送的資料量 ( $\delta_i(t)$ )，使得網路中所有 UEs 所花費的傳送能量總和可以最小化，而且最大化無線資源的利用率，並且保證它們的延遲限制

( $D_i$ )、封包遺失率、以及不會超過無線行動裝置的最大傳輸功率 ( $P_{MAX}$ )，除此之外，所設計的方法必須在執行時間上有效率，因為 LTE/LTE-A 資源安排的週期最小可以小到 1ms (即每個子訊框均作一次資源安排)。



圖三、P-MCLA 方法流程圖

圖三展示我們所提出來的跨協定層方法，這個方法是由 2 大部份所組成，第 1 個部份是睡眠排程(長期排程)，第 2 個部份則是無線資源與功率分配(每個子訊框均會執行一次的短期排程)。在第 1 個部份，考慮到平均通道狀況與每個  $UE_i$  的 QoS 需求，睡眠排程必須決定每個  $UE_i$  的  $T_i$ 、 $T_i^{off}$ 、 $T_i^I$ 、和  $T_i^{on}$ ，注意，因為真正的每個子訊框的實際資源分配會與當時 UEs 的通道狀況有關，所以這個時候所做的長期資源分配與排程未必與到時候的實際狀況會相同，而第 2 部份中，我們則是採取一個二階式的優先權規則，在第一階中，使用每一個 UE 的狀況來分配優先序，這個優先序的指定方式是：(1)若 UE 的狀態為 active，而且現在正是它的 on duration 期間，則它具備最高優先序 P1；(2)若 UE 現在的狀況是延長性的 active，即 on duration 已結束，但是因為 inactivity timer 未結束而仍然 active，則它具備次優先序 P2。然後，針對次優先序的 UEs，進一步再給它們不同的優先序，而這個優先序則依據  $C_i(t)$ 、 $C_i^{avg}$ 、 $r_i$ 、 $Q_i$  (queue length)、和 inactivity timer 來定義。在每一個子訊框，P1 優先序的 UEs 優先進行節能資源分配，這個資源分配的問題可以被對映到已知的 NP complete 問題 - Multiple-Choice Knapsack Problem (MCKP) [22]，我們的主要目標是討論如何最小化這些 UEs 的能源消耗，然後，優先序 P1 的 UEs 分配完資源之後，如果還有空閒的資源，則接著分派資源給 P2 優先序的 UEs，這個時候資源分配

方法會參考前面每個 P2 UE 被給予的另一個優先序來分派資源，通常 P2 優先序的 UEs 都是正處於不好的通道狀況，所以如何保證 QoS 和封包遺失率是排程 P2 Ues 的主要考量點。

### 第 1 部份 – 睡眠排程(長期排程)

為了讓延遲限制能被保證，每一個  $UE_i, i = 1..N$ ，的  $T_i$  設定為  $T_i = \min_{\forall i} D_i$ ，然後，我們計算平均每一個睡眠週期每一個  $UE_i$  所需的平均資源  $w_i^{avg}$  (in TTI) 為  $w_i^{avg} = (r_i \times T_i) / C_i^{avg}$ ，所以，平均每一個睡眠週期，所有 UEs 所需的資源總數  $W^{avg}$  為

$$W^{avg} = \sum_{\forall i} w_i^{avg} = \sum_{\forall i} \frac{r_i \times T_i}{C_i^{avg}}. \quad (1)$$

考慮到真實通道的狀況是隨著時間而改變的，以及負載平衡，我們接著平均分配  $W^{avg}$  在  $T_i$  個子訊框中，因此，每個子訊框將會有一些閒置的空間留下來，這將有助於後續的節能資源分配；然後我們的方法接著決定剩下的睡眠參數， $T_i^{off}$  和  $T_i^{on}$ ，以及每個 UE 的資源分配  $\Omega(i, f), f = 1..T_i^{on}$  (注意，接下來  $F(k)$  和  $R(i)$  分別是用來紀錄一個睡眠週期中第  $k$  個子訊框所剩下的空間資源以及  $UE_i$  還待分配物理資源：

1.  $F(k) = \frac{w^{avg}}{T_i}, k = 1..T_i, R(i) = w_i^{avg}, i = 1..N$ . Set  $i \leftarrow 1$  and  $f \leftarrow 1$ .
2. for  $k = 1..T_i$
3. while  $F(k) > 0$
4. if  $R(i) \leq F(k)$
5.  $\Omega(i, f) = R(i), R(i) = 0, F(k) = F(k) - \Omega(i, f)$ .
6.  $T_i^{on} = f$ .
7.  $T_i^{off} = k - T_i^{on} + 1$ .
8.  $i \leftarrow i + 1$ .
9.  $f \leftarrow f + 1$ .
10. elseif  $R(i) > F(k)$
11.  $\Omega(i, f) = F(k), R(i) = R(i) - \Omega(i, f), F(k) = 0$ .
12.  $f \leftarrow f + 1$ .
13. endif
14. endwhile
15. endfor

### 第 2 部份 – 資源與功率分配(短期排程)

針對每一個子訊框  $t$ ，我們將會安排它的  $\delta_i(t)$ 、 $w_i(t)$ 、 $P_i(t)$ 、和  $CQI_i(t)$  給醒過來的 UEs，在每個子訊框都會有兩個類型的 UEs，第一群是 UE 集合  $S_1$ ，它們正處於 on duration 而且 active；另一群是 UE 集合  $S_2$ ，這些 UEs 正處於較差的通道狀況情況中，它們因為 on duration 或 inactivity timer 尚未結束而處於 active 狀態；注意，某些 UEs 可能會同時存在於  $S_1$  和  $S_2$ ，i.e.,  $S_1 \cap S_2 \neq \emptyset$ ，我們會更新  $S_1 = S_1 - (S_1 \cap S_2)$ 。接下來的資源與功率分配次序採取二階層優先權規則， $S_1$  會比  $S_2$  擁有較高的優先權，所以會先分配資源給  $S_1$ ，接下來才是  $S_2$ 。

為了簡化資源分配問題的複雜度，我們把分配資源給  $S_1$  的問題首先對映到 Linear Multiple-Choice Knapsack

Problem (LMCKP)，求出最佳解之後，再找一個次佳的整數解。LMCKP 問題可以被定義如下(接下來我們為了簡化表達方式，將 index  $t$  先省略)：

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{\forall i \in S_1} \sum_{j=1}^{15} B_{i,j} X_{i,j} \\ \text{subject to} \quad & \sum_{\forall i \in S_1} \sum_{j=1}^{15} w_{i,j} X_{i,j} \leq M, \\ & \sum_{j=1}^{15} X_{i,j} = 1, \quad \forall i \in S_1 \\ & 0 \leq X_{i,j} \leq 1, \quad \forall i \in S_1, j = 1..15, \end{aligned} \quad (2)$$

$B_{i,j}$  是  $UE_i$  使用 CQI  $j$  時可得的利益值，而  $B_{i,j} = \overline{M} - P_{i,j}$ ，這個地方  $\overline{M}$  是一個 constant，我們可以定義它為任何一個定值，但是必須符合以下條件： $\overline{M} \geq \max_{\forall i \in S_1, \forall j} P_{i,j}$ ； $X_{i,j}$  是一個 indicator，表示資料量  $\delta_i$  有多少比例是使用 CQI  $j$  來傳輸，而  $\delta_i$  為

$$\delta_i = \min \left\{ \frac{\Omega(i, n_i)}{T_i^{on} \Omega(i, f)} \times r_i \times T_i, Q_i \right\}, \quad (3)$$

這裡我們令現在正在處理的這個子訊框是  $UE_i$  的 on duration 中的第  $n_i$  個子訊框，而  $Q_i$  則是  $UE_i$  的儲例長度，針對每一個  $UE_i \in S_1$ ，把所需判斷的候選 CQIs 藉著下列兩種方式來減少，第一個是移除  $P_{i,j} > P_{MAX}$  的 CQI，第二個則是找出 *dominated CQI* 並且將之移除，對  $UE_i$  來說，一個 CQI  $s$  如果符合以下任一條件，則被稱為 *dominated CQI*：(1) 有一個 CQI  $r$  存在，使得  $w_{i,r} \leq w_{i,s}$  而且  $B_{i,r} \geq B_{i,s}$ ；(2) 有兩個 CQIs， $r$  和  $t$ ，存在，而且  $r, s, t$  三者間的關係為  $w_{i,r} \leq w_{i,s} \leq w_{i,t}$ ， $B_{i,r} \leq B_{i,s} \leq B_{i,t}$ ，以及  $(w_{i,s} - w_{i,r})(B_{i,t} - B_{i,r}) \geq (w_{i,t} - w_{i,r})(B_{i,s} - B_{i,r})$ 。接著我們可以使用啟發式方法 (greedy method) 來做到  $S_1$  排程的最佳化，方法如下。

1. 對於  $S_1$  中的每一個 UE  $i$ ，產生一個集合  $H_i$  來紀錄 un-dominated CQIs，而且根據 weight 作升冪排序，i.e.,  $H_i = \{(B_{i,g(\ell)}, w_{i,g(\ell)}) \mid \ell = 1..|H_i|\}$ 。
2. 對於每一個  $H_i$ ，選擇它的第一個項目 (也就是 weight 最輕的)，i.e.,  $(B_{i,g(\ell=1)}, w_{i,g(\ell=1)})$ ，作為 UE  $i$  的預設 CQI 設定，換句話說，即  $X_{i,g(1)} = 1$ ，然後設定

$$B_{tot} = \sum_{\forall i \in S_1} B_{i,g(1)} \quad \text{以及} \quad W_{tot} = \sum_{\forall i \in S_1} w_{i,g(1)}.$$

3. 定義  $\lambda_{i,m}$  為

$$\lambda_{i,m} = \frac{B_{i,g(m)} - B_{i,g(m-1)}}{w_{i,g(m)} - w_{i,g(m-1)}}, \quad \forall i \in S_1, m = 2..|H_i|. \quad (4)$$

然後依降冪排序所有的  $\lambda_{i,m}$ 。

4. 由  $\{\lambda_{i,m}\}$  挑選下一個項目，令這個被挑選出來的項目是  $\lambda_{i^*,m^*}$ ，如果挑選了以後使得

$W_{tot} + w_{i^*,g(m^*)} - w_{i^*,g(m^*-1)} > M$ ，則進入 step 5；

否則，更新  $X_{i^*,g(m^*)} = 1$ 、 $X_{i^*,g(m^*-1)} = 0$ 、

$W_{tot} = W_{tot} + w_{i^*,g(m^*)} - w_{i^*,g(m^*-1)}$ 、以及

$B_{tot} = B_{tot} + B_{i^*,g(m^*)} - B_{i^*,g(m^*-1)}$ 。如果

$\{\lambda_{i,m}\} = \emptyset$ ，則最佳的目標函數值為  $z = B_{tot}$ ，而剩下的閒置資源為  $F = M - W_{tot}$ ；反之，重覆 Step 4。

5. 如果  $W_{tot} = M$ ，我們得到了最佳的目標函數值

$z = B_{tot}$ ，而且  $F = 0$ ；否則，設定  $F = M - W_{tot}$ 。

注意，上述方法在作初始化設定時，可能就會發現

$W_{tot} = \sum_{\forall i \in S_1} w_{i,g(1)} > M$ ，此時表示  $S_1$  中有 UE(s) 處於

不好的通道狀況，所以，這樣子通道狀況不好的 UE 應該從  $S_1$  中移除而被置入  $S_2$ ，這樣的動作會被重覆的執行直到  $W_{tot} = \sum_{\forall i \in S_1} w_{i,g(1)} \leq M$ 。除此之外，為了增加無線資源的利用率，我們會在啟發式算法結束後將  $\delta_i$  更新為  $\delta_i = \min(\text{rate}(MCS_{CQI_i}) \times w_{i,CQI_i}, Q_i)$ 。

執行完上述步驟，如果剩下來的資源  $F > 0$ ，會繼續執行  $S_2$  集合的資源排程，針對每一個  $UE_i \in S_2$ ，計算它的 importance  $I_i$  如下：

$$I_i = C_i \times \frac{C_i}{C_i^{avg}} \times \frac{Q_i}{r_i} \quad (5)$$

接著依降冪排序這些 importances，然後配置資源給  $S_2$ ，配置方法如下(以下  $tim_i$  用來紀錄  $UE_i$  的 inactivity timer 剩下來的值)。

1.  $S_3 \leftarrow S_2$ ,
2. for each  $UE_i \in S_3$
3. if  $tim_i = 1$  and  $F > 0$
4.  $w_i \leftarrow 1$  and set  $CQI_i$  to be the most efficient CQI that  $UE_i$  can achieve.
5.  $\delta_i = \min(\text{rate}(MCS_{CQI_i}), Q_i)$ ,  $tim_i \leftarrow T_i^l + 1$ ,  $F \leftarrow F - 1$ .
6. if  $\delta_i = Q_i$
7.  $S_2 \leftarrow S_2 - \{i\}$ ,  $S_3 \leftarrow S_3 - \{i\}$ ,  $tim_i \leftarrow T_i^l$ .
8. while  $S_3 \neq \emptyset$  and  $F > 0$
9. pick the next importance in  $\{I_i\}$ ,  $S_3 \leftarrow S_3 - \{i\}$ .
10. set  $CQI_i$  to be the most efficient CQI that  $UE_i$  can achieve,  $F \leftarrow F + w_i$ .
11.  $w_i = \min\left(F, \left\lceil \frac{Q_i}{\text{rate}(MCS_{CQI_i})} \right\rceil\right)$ .
12.  $\delta_i = \min(\text{rate}(MCS_{CQI_i}) \times w_i, Q_i)$ ,  $F \leftarrow F - w_i$ .
13. if  $\delta_i < Q_i$
14.  $tim_i \leftarrow T_i^l + 1$
15. else
16.  $S_2 \leftarrow S_2 - \{i\}$ ,  $tim_i \leftarrow T_i^l$ .
17. for each  $UE_i \in S_2$
18.  $tim_i \leftarrow tim_i - 1$ ,
19. if  $tim_i = 0$
20.  $S_2 \leftarrow S_2 - \{i\}$ ,
21. update  $Q_i$  for all  $UE_i \in S_2$

對於在  $S_2$  中的 UEs，我們會一直選擇讓它們使用最有效率的調變與編碼方法來傳輸資料，因為它們正處於不好的通道情形，而為了保證 QoS 以及封包遺失率，我們的方法會暫時不理會能量消耗狀況。而  $T_i^l$  參數的設定是一個重要的議題，在這個方法中，我們採取動態調整  $T_i^l$  值的方法，這個方法會根據 UE 的通道狀況來彈性地設定  $T_i^l$ ，這個部份的細節將在下一子節討論。

#### 動態 inactivity timer 設置方法

對於正處於較佳通道狀況的 UEs，我們會給予它較短的 inactivity timer 值，這樣它可以在資料傳輸結束之後較快回到睡眠狀態；反之，對於正處於較差通道狀況的 UEs，我們會給予它較長的 inactivity timer 值，這樣它可以有比較長的時間來完成資料的傳輸，所以我們參考文獻[23]的方法來動態調整 UEs 的 inactivity timers。我們如表二所示定義六個狀態及其 inactivity timer 值，每個狀態與 SINR 和 CQI 的對應也顯示於表中。

表二、狀態及其 inactivity timer 值與 SINR(or CQI)對照表

State	SINR[24]	CQI index	DRX Inactivity timer(TTI)
State 1	13.897~+∞	11~15	1
State 2	8.978~13.897	9~10	4
State 3	7.336~8.978	8	6
State 4	2.670~7.336	6~7	10
State 5	-1.045~2.670	4~5	20
State 6	-∞~-1.045	1~3	30

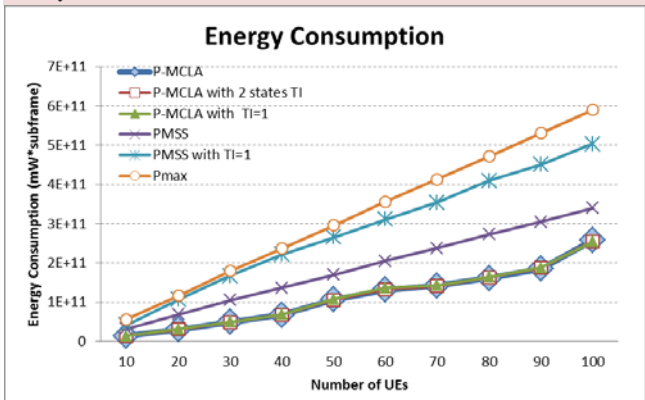
#### 四、實驗模擬

我們使用 matlab 來實作我們的模擬器，並以模擬結果驗證所設計的方法。我們比較所提出的 P-MCLA 方法與 PMSS 方法[25]，PMSS 方法是一個單純考慮 MAC 層的睡眠排程方法。詳細的實驗參數如表三。模擬實驗中，我們比較六個方法的效能：(1) P-MCLA：我們所提的方法，並且採用 adaptive inactivity timers；(2) P-MCLA with 2-states TI：我們所提的方法，但是 adaptive inactivity timer 只有兩種設定；(3) P-MCLA with TI=1：我們所提的方法，但是  $T_i^l = 1$ ；(4) PMSS：單純只考慮 MAC 層睡眠排程的方法，active UEs 永遠都選擇使用最有效率的調變與編碼方法(其  $T_i^l = 0$ )；(5) PMSS with TI=1：PMSS，但是  $T_i^l = 1$ ；(6) Pmax：PMSS，但是 UEs 永遠選擇使用最大的傳輸功率來傳輸資料。

表三、模擬環境所使用的參數

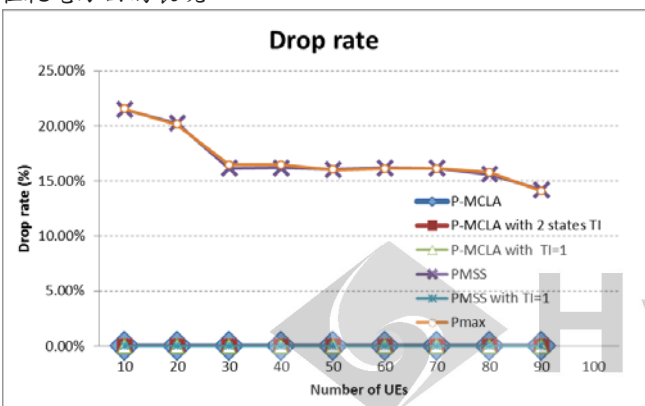
Parameters	Values
Channel bandwidth	10MHz
Cell radius	400m
Channel Model	$L(R) = PL_{LOS}(R) \times \text{Prob}(R) + (1 - \text{Prob}(R)) \times PL_{NLOS}(R)$ R=distance in kilometers $PL_{LOS}(R) = 103.4 + 24.2 \log_{10}(R)$ $PL_{NLOS}(R) = 131.1 + 42.8 \log_{10}(R)$ $\text{Prob}(R) = \min(10.018/R, 1) \times 1 - \exp(-R/0.063) + \exp(-R/0.063)$
UE maximum transmit power	23 dBm

eNB/UE maximum antenna gain	14dB/0dB
Thermal noise	-174dBm
Number of RBs per TTI	50
Datarate of UEs	200~500 (bits/subframe)
Delay Bound of UEs	50~1000ms



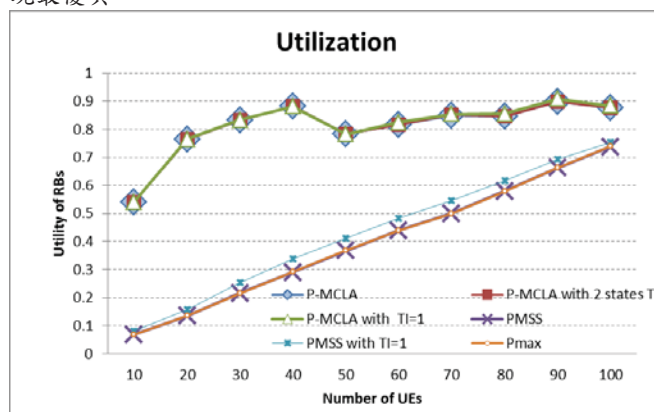
圖四、不同 UE 數目下能量消耗情形(延遲限制 50-500ms, 資料速率 100-300bits/subframe)

圖四顯示，當 UE 數目增加的時候，六個方法的能量消耗總量都是增加的，而我們的 P-MCLA-based 方法的效能最好，消耗最少的能量，因為與 PMSS 方法比較，P-MCLA 平衡了 UEs 的負載在每一個子訊框中，而且保留一些空間資源在每個子訊框中增加了彈性，使得 UEs 有機會用較省能量的方式完成資料傳輸，此外，我們可以看到，不管採用多少 states 的 dynamic activity timers，效能都是差不多的，這是因為這它們均可以把幾乎所有的資料傳輸完畢(封包遺失率接近 0，這個可以於後面的實驗結果看到)，所以總能量消耗會很接近。所有的方法裡面以 Pmax 的效能最差，因為它完成沒有作功率控制，而 PMSS 與 PMSS with TI=1，則會控制 UEs 所使用的傳輸功率，不致造成浪費；PMSS with TI=1 的表現比 PMSS 差，因為當 UEs 處於不好的通道狀況的時候，PMSS with TI=1 會使用 inactivity timer 來保持這些 UEs 留在 active 狀態，以消化未完成傳輸的資料，這樣可以保證其 QoS 可是卻會犧牲它在耗電方面的表現。



圖五、不同 UE 數目下封包遺失率(延遲限制 50-500ms, 資料速率 100-300bits/subframe)

圖五顯示不同 UE 數目下的封包遺失率，我們可以看到 P-MCLA-based 的方法的表現優於 PMSS 和 Pmax，這是因為後兩者排程資源時排程得非常擁擠，沒有任何彈性，而且沒有使用 inactivity timer，這樣會使得當 active UEs 正處於不好的通道狀況時，它們很難取得額外的空間資源或額外的時間來消化需要傳輸的資料，使得 PMSS 和 Pmax 的資料遺失率達到 15%以上，這對即時性的應用程式而言，是不可以接受的；相反的，PMSS with TI=1 沒有遭受那麼嚴重的封包遺失率，因為 inactivity timer 使得 UEs 有額外的機會可以消化在 queue 裡面的資料，但是代價是它的消耗能量比 PMSS 大得多。比較之下，我們所提出的 P-MCLA-based 方法不僅最節省能量，也可以保證 QoS，表現最優異。



圖六、不同 UE 數目下 RB 利用率(延遲限制 50-500ms, 資料速率 100-300bits/subframe)

圖六顯示不同 UE 數目下的 RB 利用率，我們可以 RB 利用率隨著 UE 數目的增加而提升，與 PMSS、PMSS with TI=1、與 Pmax 方法相比，我們所提的 P-MCLA-based 方法展現較佳的 RB 利用率，這是因為我們所提的方法平衡子訊框的負載，而且能妥善利用閒置的無線資源，這些也進一步使得 P-MCLA-based 方法得到較省能的表現；相反的，PMSS 方法與 Pmax 方法則一直使用最有效率的調變與編碼方法，沒有善用閒置資源，所以 RB 利用率較差。

### 五、結論

在本研究中，我們討論在 LTE/LTE-A 無線通訊網路上研發跨媒體存取控制層與實體層的節能且保證服務品質的資源管理與睡眠排程機制，省電睡眠排程問題是一個複雜的問題，方法必須要與標準相容，而且同時考慮媒體存取控制層與實體層的因素，才能得到最佳的節能效果，但是這個問題的複雜度不但高(為 NP-hard 問題)，可是實際環境中 LTE/LTE-A 的排程週期卻僅有 1ms，更顯得問題困難；我們所提出來的方法可以在有限的時間內就完成睡眠與資源的排程，而且也有效率，實驗結果也確實顯示所提出的跨協定層方法比傳統只單純考慮媒體存取控制層的方法效果要好，可以得到最佳的省電效果，保證 QoS，也能充份利用無線資源。

### 六、致謝

本論文研究感謝科技部計畫 MOST 104-2221-E-024-005-。

### 七、參考文獻

- [1] itu.int. "ICT Statistics," <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>.
- [2] CNN.com. "Battery Life Concerns Mobile Users," [www.cnn.com/2005/TECH/ptech/09/22/phone.study](http://www.cnn.com/2005/TECH/ptech/09/22/phone.study).
- [3] J. Paczkowski, "iPhone Owners Would Like to Replace Battery, AT&T," *All Things Digital*, <http://digitaldaily.allthingsd.com/20090821/iphone-owners-would-like-to-replace-battery-att/>, [Aug. 21, 2009].
- [4] G. B. Creus, and M. Kuulusa, "Optimizing Mobile Software with Built-in Power Profiling," Forum Nokia 2009.
- [5] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskar et al., "LTE: the evolution of mobile broadband," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 44-51, 2009.
- [6] Radio-electronics.com. "OFDMA, OFDM vs CDMA Comparison," <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ofdm/ofdma-cdma.php>.
- [7] J. Huang, F. Qian, A. Gerber et al., "A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks," in *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*, Low Wood Bay, Lake District, UK, 2012, pp. 225-238.
- [8] R. Kwan and C. Leung, "A survey of scheduling and interference mitigation in LTE," *JECE*, vol.2010, no. 1, pp. 1:1 – 1:10, Jan. 2010.
- [9] R. Kim and S. Mohanty, "Advanced power management techniques in next-generation wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 94 – 102, May 2010.
- [10] M. Gupta, S. C. Jha, A. T. Koc, and R. Vannithamby, "Energy impact of emerging mobile Internet applications on LTE network: issues and solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 2, pp. 90 – 97, Feb. 2013.
- [11] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology," *IEEE Commun. Mag.*, vol.17, pp.10 – 22, Jun. 2010.
- [12] N. Abu-Ali, A.-E. M. Taha, M. Salah, and H. Hassanein, "Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 16, no. 3, pp. 1239 – 1265, Aug. 2014.
- [13] J. Wigard, T. Kolding, L. Dalsgaard, and C. Coletti, "On the user performance of LTE UE power savings schemes with discontinuous reception in LTE," in *IEEE Int. Conf. on Communication Workshops*, 2009, pp.1 – 5.
- [14] S. Gao, H. Tian, J. Zhu, and L. Chen, "A More Power-Efficient Adaptive Discontinuous Reception Mechanism in LTE," in *IEEE Veh. Technol. Conf.*, Sep. 2011, pp. 1 – 5.
- [15] C. S. Bontu and E. Illidge, "DRX mechanism for power saving in LTE," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 6, pp. 48 – 55, Jun. 2009.
- [16] 3GPP TS 36.213 V8.8.0 Physical layer procedures (Release 8), Sept.2009
- [17] J. Huang, F. Qian, A. Gerber, Z. Morley Mao, S. Sen and O. Spatscheck, "A close examination of performance and power characteristics of 4G LTE networks" *ACM the 10th Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services*, Jun. 2012, pp. 225 – 238.
- [18] L. Zhou, H. Xu, H. Tian, Y. Gao, L. Du, and L. Chen, "Performance analysis of power saving mechanism with adjustable DRX cycles in 3GPP LTE," in *IEEE Veh. Technol. Conf.*, Sep. 2008, pp. 1 – 5.
- [19] J.-M. Liang, P.-C. Hsieh, J.-J. Chen and Y.-C. Tseng, "Energy-efficient DRX scheduling for multicast transmissions in 3GPP LTE-Advanced wireless networks," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Apr. 2013, pp. 551 – 556.
- [20] A.-T. Koc, S.-C. Jha, R. Vannithamby and M. Torlak, "Device Power Saving and Latency Optimization in LTE-A Networks through DRX Configuration," *Wireless Commun. IEEE Trans. on*, vol. 13, no. 5, pp.2614 – 2625, May 2014.
- [21] J.-J. Chen, S.-L. Wu and W.-Y. Lin, "A Cross-Layer Design for Energy Efficient Sleep Scheduling in Uplink Transmissions of IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks," in *Advances in Intelligent Systems and Applications*, vol.1, Hualien, Taiwan, 2012, pp 635 – 644.
- [22] D. Pisinger, "Linear time algorithms for knapsack problems with bounded weights," *Journal of Algorithms*, v.33 n.1, p.1 – 14, Oct. 1999.
- [23] S. Gao, H. Tian, J. Zhu, and L. Chen, "A More Power-Efficient Adaptive Discontinuous Reception Mechanism in LTE," in *IEEE VTC Conf.*, Sept. 2011, pp. 1 – 5.
- [24] Z.-Y. Chen, J.-J. Chen, and J.-M. Liang, "Energy Efficient Uplink Resource Allocation in LTE-A Relay Networks," *The 10th IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symp. (IEEE VTS APWCS'13)*, Aug. 2013.
- [25] J.-J. Chen, J.-M. Liang, and Y.-C. Tseng, "An Energy Efficient Sleep Scheduling Considering QoS Diversity for IEEE 802.16e Wireless Networks," in *IEEE ICC Conf.*, May 2010, pp. 1 – 5.