

Energy Saving Resource Allocation in LTE-A MU-MIMO Uplink

Jen-Jee Chen¹, Mei-Han Wang^{1,*}, Jian-Yuan Hong¹, Kun-De Lin¹, and Jia-Ming Liang²

¹Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Tainan 70005, Taiwan

²Department of Computer Science and Information Engineering, Chang Gung University, Taoyuan 33302, Taiwan

*E-mail: meihan0326@gmail.com

Abstract

To support mobility, wireless mobile devices are powered by batteries; however, a battery can only store a limited amount of energy. On the other hand, MIMO (Multi-Input Multi-Output) technique is almost applied on all LTE/LTE-A (Long-Term Evolution/LTE-Advanced) devices and WiFi devices. Therefore, in this project, we are to design cross MAC-PHY layer energy-saving and QoS-guaranteed resource management and scheduling methods for LTE-A/B4G (Beyond 4G) Uplink MIMO Networks. The proposed methods have to consider antenna allocation, transmit power control, physical radio resource allocation, modulation and coding scheme selection, the scheduling of data delivery and QoS (Quality of Service) at the same time. MIMO allows mobile devices to activate multiple sets of antennas to communicate with the antennas of the base station. This results in much higher spectrum efficiency. However, devices have to consume great quantity of energy when activating multiple sets of antennas, thus leading to a shorter battery life comparing that of 3G devices. For the reasons given above, the energy-saving resource allocation and scheduling problem is more challenging. In addition, user experience is an important issue. So our proposed method considers the quality of services of mobile devices. Because of the short resource schedule period in the LTE network (only 1ms), the proposed mechanism is time efficient. Moreover, the designed scheme is compatible with the standards. By simulations, we can see that the proposed mechanism shows better performance compared to other schemes no matter in energy saving, resource utilization and QoS.

Keywords: LTE/LTE-A (Long-Term Evolution/LTE-Advanced), energy saving, cross-layer design, resource management, power allocation, MIMO (Multi-Input Multi-Output), QoS (Quality of Service), mobile communications, wireless networks

在 LTE-A MU-MIMO 上行傳輸中的節能資源分配方法

陳建志¹、王美涵^{1,*}、洪健源¹、林坤德¹、梁家銘²

¹ 國立臺南大學電機工程學系

² 國立臺南大學資訊工程學系

摘要

行動裝置支援行動性，使用電池運作，如何延長其續航力一直是行動裝置最被關心的研究議題；另現在 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 技術已經漸漸普遍應用於無線網路中，所以本論文針對 LTE-A/B4G (Long-Term Evolution-Advanced/Beyond 4G) 上行多天線(MIMO)網路，研究跨 MAC (Medium Access Control) 層及 PHY (PHYSical) 層的高效節能且保證服務品質的資源排程方法，這個跨協定層方法同時考慮天線配置、傳輸功率控制、物理無線電資源分配、使用的調變與編碼等級和資料傳送與排程時所需滿足的服務品質等。MIMO 技術允許使用者同時啟用多組天線，與基地台的多組接收天線同時傳輸，可獲得更高的頻譜效率，但是行動裝置啟用多組天線會增加額外耗能，也導致手機的續航力更差，因此多天線網路的節能資源配置和排程是一相當具有挑戰性的問題；考慮到 LTE-A 網路的排程週期僅 1ms，本論文所設計的節能資源配置演算法亦兼顧即時性，同時，我們所設計的方法相容於已制定的通訊協定。藉由效能分析與模擬評估，證明所提的方法與其它的方法相比的確得到更好的效益及效能。

關鍵字: LTE/LTE-A，節能，跨協定層設計，資源管理，功率配置，MIMO，服務品質，行動通訊，無線網路

1. 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 2016 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 73.8 億[1](平均每人持有一支手機)，行動寬頻用戶(mobile broadband subscribers)則達到 36.5 億(2012 年僅 15 億)，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通裝置，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)、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]的實際測試即可以看出，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(LTE/LTE-A 無線存取介面的耗電功率約為 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。

由此可知，LTE/LTE-A 無線存取介面傳輸功率的控制和配置與數據資料的節能傳送排程，將是無線行動裝置上最有機會節省能源、增加裝置續航力的部分之一。另外，考慮到 MIMO 技術已經漸漸普遍應用於無線通訊網路中，而且這是其中一個讓行動通訊傳輸速率更加提升的重要方法，所以本研究一併考量 MIMO 實體層技術(即基地台與行動裝置均配備有多根天線)；使用 MIMO 技術的智慧型手機不再只能單獨發送或接收一個信號，而是多組天線可以同時做傳輸，而每組天線都需要自己專屬的功率放大器，等於一個電池要提供以前多支手機的無線存取介面通訊的電力，續航時間將會比以前減少許多。

本研究針對 LTE-A/B4G MIMO 通訊網路設計高效能的跨媒體存取控制層與實體層的省電天線配置、傳輸功率控制與資料傳送排程的方法，該設計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)。

與大多數行動通訊系統類似，節能對於電池供電的用戶設備(UE; User Equipment)來說始終是關鍵問題。參考文獻[4]顯示，移動設備的無線電模組佔設備能耗的很大一部分。一些文獻[8][9]也顯示，有效利用無線電資源可以顯著提高 UE 的電池壽命。另一方面，多輸入多輸出(MIMO)技術提供了空間多工增益，分集增益和干擾減少能力[10]，這被認為是 LTE-A 滿足 IMT 高速資料傳輸速率的關鍵技術[11]，因此，多個天線已經是 LTE-A 用戶設備的必要設備。然而，MIMO 的使用增加了 UE 的無線電模組的功率消耗[12]，因此，如何做到高效能的無線電資源配置、傳輸功率控制與資料傳送排程是比以前更關鍵的問題。由於上述原因，驅使我們有強烈的動機設計 LTE-A MIMO 上次多天線網路節能資源分配方案，在數據封包延遲、丟棄率(drop rate)和最大發射功率等限制的約束下，討論如何降低 LTE-A MIMO 網路中 UE 的無線通訊模組的功耗；事實上，上行網路的節能資源分配問題比起下行網路更複雜，這是因為在上行傳輸時，UE 存在發射功率和上行傳輸數據速率之間的權衡，但是在進行下行傳輸時，UE 的接收功率幾乎是恆定的，與下行傳輸數據速率無關[12]，因此，下行網路的節能資源分配問題可以看作是上行網路節能資源分配問題的子問題，以上行為例來設計方法具有通用性。

在本論文中，我們討論 LTE-A MU-MIMO (Multi-User MIMO)上行網路的功率和資源分配問題，其中以總 UE 能量消耗的最小化為目標，同時保證每個 UE 所需的數據傳送速率(data rate)、延遲限制和最大發射功率限制，這個問題涉及多個協定層，具體地來說，MAC 層的數據資料傳輸排程控制了數據封包延遲、丟棄率和數據資料傳輸的公平性，而實體(PHY)層則負責天線配置，實體無線電資源分配，發射功率控制、調變與編碼方式(MCS; Modulation and Coding Scheme)的選擇；然而，來自 MAC 層的排程結果將限制實體層可以實現的傳輸功率節省程度與無線通訊模組的節能程度，並且 MAC 層必須參考無線電資源的限制、實際的通道條件和 UE 的天線數目來進行排程業務，以獲得更好的公平性、吞吐量或能量效率，因此，本研究所討論的問題需要跨協定層設計。在本論文中，我們所提出的跨協定層設計包含了 MAC layer two-tier priority-based scheduler 與 energy-saving physical resource allocator。為了最大化節能和無線電資源利用，scheduler 和 allocator 緊密地耦合在一起，以解決節能資源分配的問題，並滿足每個資料流所需的 QoS。設計的機制除必須做到節能資源分配，也必須能相容於 LTE-A 通訊協定。

接下來的內容，第 2 節將就所需的背景知識與相關參考文獻進行介紹，第 3 節是研究方法，第 4 節是實驗與模擬，第 5 節則進行總結。

2. 文獻探討

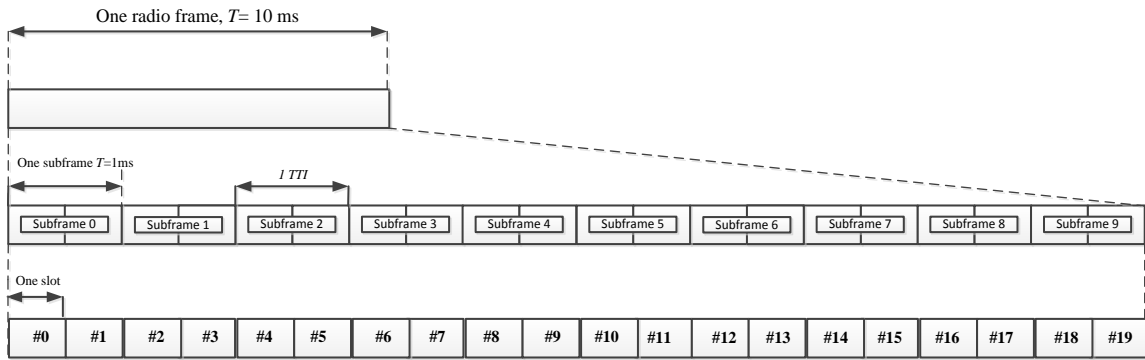
LTE/LTE-A 上行採用 Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) 技術，SC-FDMA 是一種混合式傳送方法，結合傳統 OFDM 的優點與 single carrier 調變低峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)的好處，可以使得電力有限的無線行動裝置在電力的使用上相對於單純使用 OFDM/OFDMA 有更佳的效率。

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[13]。

表一、4-bit CQI 表

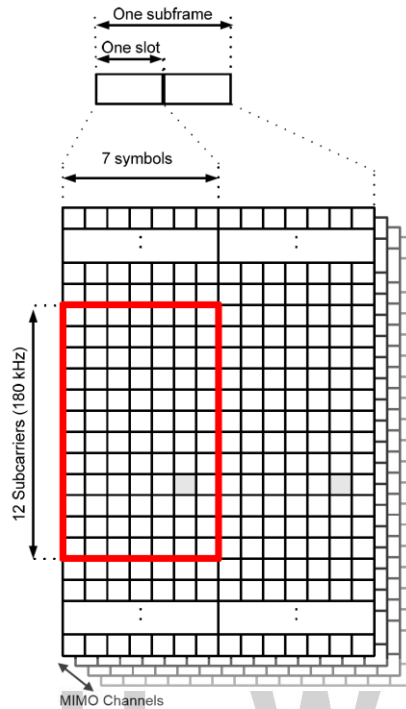
CQI	MCS	Modulation	Code rate x 1024	Efficiency
1	0	QPSK	78	0.1523
2	0	QPSK	120	0.2344
3	2	QPSK	193	0.3770
4	5	QPSK	308	0.6016
5	7	QPSK	449	0.8770
6	9	QPSK	602	1.1758
7	12	16QAM	378	1.4766
8	14	16QAM	490	1.9141
9	16	16QAM	616	2.4063
10	20	64QAM	466	2.7305
11	23	64QAM	567	3.3223
12	25	64QAM	666	3.9023
13	27	64QAM	772	4.5234
14	28	64QAM	873	5.1152
15	28	64QAM	948	5.5547

LTE/LTE-A 網路有兩種無線訊框(frame)格式[14]，這兩種訊框格式分別用在 LTE/LTE-A TDD (Time Division Duplex)模式和 FDD (Frequency Division Duplex)模式(如圖一)，LTE/LTE-A 網路將頻譜資源每 10ms 切割為一個訊框，每一個訊框又被切割成 10 個相同時間長度的子訊框(subframe)，按照時間先後次序依序被編為子訊框 0 (subframe 0)、子訊框 1 (subframe 1)、...子訊框 9 (subframe 9)，每一個子訊框為 1ms 時間長度，又被稱為 1 TTI (Transmission Time Interval)，LTE-A 網路在每個子訊框(Subframe)都可以進行資源排程，即排程的週期為 1 毫秒。



圖一、訊框結構。

LTE/LTE-A 的每個子訊框被切分為 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)，在時間上則切割出 7 個 symbols，每 12 subcarriers \times 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 SB (Scheduling Block)。1 個單一的 RB 如圖二紅色方框內框起來的樣子，LTE-A MU-MIMO 網路中使用空間多工(spatial multiplexing)時的子訊框無線資源結構，在邏輯上可視為同時間與同頻率下，可以有複數個 RBs 可以被拿來使用，如圖二所示，圖二展示 4x4 MIMO 實施空間多工時無線資源的結構。



圖二、Resource Block(RB)與 4x4 MIMO 子訊框格式示意圖。

空間多工的容量計算如下：

$$Capacity_{SM}(bits/s/Hz) = \sum_{i=1}^{\min\{N_T, N_R\}} \log_2 \left(1 + \frac{P_i \|H_i\|^2}{N_0} \right), \quad (1)$$

其中 MIMO 空間多工的容量受到天線數量中的較小者的限制， N_T 是發射天線的數量， N_R 是接收天線的數量， P_i 是發射功率， N_0 是雜訊， H_i 是通道矩陣。通道矩陣表示發射天線和接收天線之間的傳播路徑的通道條件。無線傳輸的整個過程可以建模如下：

$$y = Hx + n,$$

$$\begin{bmatrix} y1 \\ \vdots \\ yr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h11 & \cdots & h1t \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ hr1 & \cdots & hrt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1 \\ \vdots \\ xt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n1 \\ \vdots \\ nr \end{bmatrix}$$

其中 y 是接收的數據， x 是傳輸的數據， n 是雜訊。

LTE UE 的無線通訊模組的耗電模型如下[12]：

$$P_{tot} = P_{idle} + P_{idle} \{ P_{con} + m_{Tx} [P_{Rx} + Tx + m_{Rx} [P_{Rx} + P_{RxRF}(SRx) + P_{RxBB}(RRx) + m_{2CW} P_{2CW}] m_{Tx} [P_{Tx} + P_{TxRF}(STx) + P_{TxBB}(RTx)] \} [W], \quad (2)$$

參考文獻中所使用進行實際測試的 UE，可以使用 2 個 CW (code word) 在下行網路方向上支持 2×2 MIMO，在上行網路則否，因此與 Tx 部分相比，Rx 部分中存在額外的功耗 P_{2CW} ， P 代表功率消耗，而下標 tot 代表總消耗， $idle$ 和 con 分別是無線通訊模組處於空閒狀態和連接狀態時的基本功率消耗，下標 Rx 和 Tx 是無線通訊模組在發送和接收模式下的基本功率消耗， m 代表模式狀態。圖 3 顯示 LTE 無線通訊模組的功率消耗，我們可以看到當啟動的天線增加時將導致更多的功率消耗，並且在相同的數據速率下增加一根額外天線的使用大約增加 0.07 Watt 的額外耗電功率。我們將在使用多個天線進行 MIMO 傳輸時考慮這個額外的功率消耗。

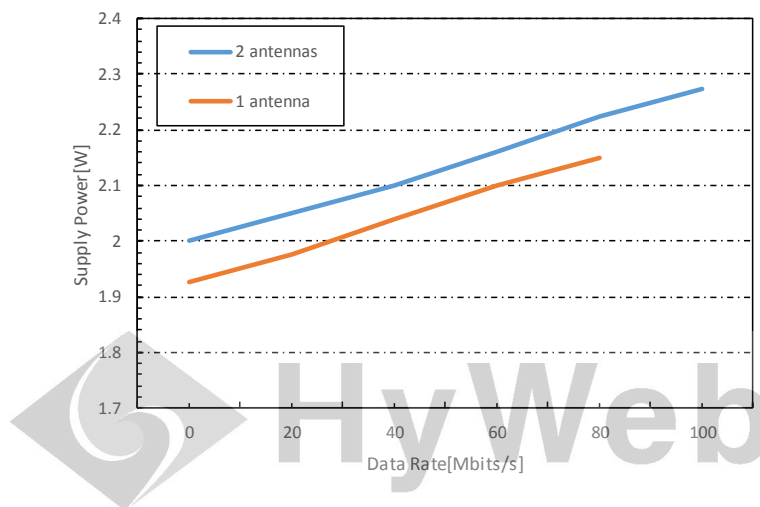


圖 3、不同數據速率下 1 antenna 與 2 antennas 功率消耗。

所有 UE 的總能源成本可以用 E_{total} 表示，通過計算可以得到

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_i,$$

其中 E_i 是 UE i 的能量成本， $i = 1..N$ ；每個 UE i 的能量成本是

$$E_i = P_i \times w_i \times T, \quad (3)$$

其中 P_i 是每個 SB 頻寬(in mW/SB)的 UE i 的發射功率， w_i 是 (in SB) 分配給 UE i 的無線電資源的量，而 T 是子訊框的長度 (in ms、slot、or subframe)。根據 UE i 使用的 MCS (使用 MCS_i 表示)，分配給 UE i 所需的物理資源量可以通過推導得出

$$w_i = \left\lceil \frac{\delta_i}{rate(MCS_i)} \right\rceil, \quad (4)$$

其中 δ_i 是經過排程，在這個 subframe UE i 將傳輸的數據位元數量。LTE-A 使用通道質量指標 (CQI) 回報當前頻道條件，並且每個 $CQI = k$, $k = 1..15$ ，具有其對應的 MCS (使用 $MCS(CQI = k)$ 表示) 和速率 (使用 $rate(CQI = k)$ 表示)，如表一所示。為了得到每個 CQI 所需的 SINR，我們使用[15]中提供的 LTE 上行網路模擬器來觀察 SINR 對不同 CQI 的位元錯誤比率 (BER) 的影響，如圖四所示，因此，我們可以得到不同 CQI 和不同 BER 等級所需的 SINR。對於傳送端 i 與接收端 j , (i, j)，接收端 j 的 received SINR (以 dB 為單位) 可以寫為

$$SINR_{i,j} = 10 \times \log_{10} \frac{P_{i,j}}{BW \times N_0}, \quad (5)$$

其中 $P_{i,j}$ 是 j 處的接收功率， BW 是有效頻寬 (以 Hz 為單位)， N_0 是熱雜訊等級，忽略 shadowing 和 fading effect，利用發射功率 P_i ，接收功率 $P_{i,j}$ 可由下式得到

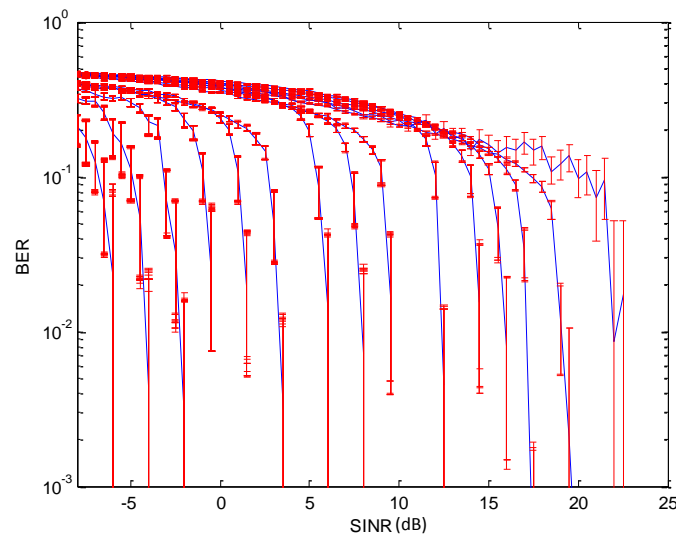
$$P_{i,j} = \frac{G_i \times G_j \times P_i}{PL_{i,j}}, \quad (6)$$

其中 G_i 和 G_j 分別是 UE i 和接收器 j (eNB) 的天線增益， $PL_{i,j}$ 是 i 到 j 的路徑損耗。為了提高能量效率，我們可以最小化所需的 received SINR，例如，使用 $MCS(CQI=k)$ ，當下式成立時，接收端 j 能夠正確地解碼 UE 的數據

$$SINR_{i,j} \geq SINR(CQI = k). \quad (7)$$

整合式子(5),(6)和(7)，當使用 $MCS(CQI=k)$ 時，UE i 與接收端 j 所需的發射功率 P_i 是

$$P_i \geq \frac{10^{\frac{SINR(CQI=k)}{10}} \times BW \times N_0 \times PL_{i,j}}{G_i \times G_j}. \quad (8)$$



圖四、不同 CQI 使用不同 SINR 的位元錯誤比率(用紅色表示 99%信賴區間)。

在文獻中，在 LTE / LTE-A 和 WiMAX [16] 中已經對上行網路資源分配進行了一些相關研究。參考文獻[8]針對 IEEE 802.16 無線網路 UE 的能量消耗最小化進行研究，研究指出，UE 可以藉由選擇較低階的調變和編碼方法(MCS)來減少功率消耗，但是這會花費更多的物理資源。參考文獻[9]顯示，為了減少 LTE 上行網路中的發射能量，將同一 subframe 的物理資源大量分配給同一個 UE，會比讓許多 UE 來分享更節能。在[17]中，作者關注於能量效率並且提出了針對 LTE SC-FDMA 上行網路的資源分配方法。為了最小化多用戶 LTE 上行網路系統中的總功率，在[18]中，作者提出了考慮速率、延遲、連續分配和最大發射功率限制的低複雜度迭代方法。然而，上述研究都沒有考慮 MU-MIMO。在 LTE-A 上行鏈路中的 MU-MIMO 資源分配問題方面，參考文獻[19]證明了這是一個 NP-hard 問題，然後提出恆定因子多項式時間近似算法，進行資源分配，相比其他方法，這個方法在頻譜效率和吞吐量方面均表現優異。參考文獻[20]將 MIMO 與 SISO 做比較，MIMO 可以顯著地改善信號與干擾加雜訊比 (SINR)，減小最大有效發射功率並且可以有益於能量效率。參考文獻[21]提出一用於多用戶 LTE 下行網路傳輸的高效能量的媒體存取控制方案，其利用多通道波束成形技術以及 MIMO 通道的多用戶增益和多工增益以增進能量效率。但是上述 MIMO 相關研究不考慮節能，並且忽略 MIMO 收發器電路的額外功率消耗。

3. 研究方法

問題定義

本論文所討論的節能資源配置問題定義如下：在網路中有 N 個 UE 和一個中心 eNB，其中 UE 和 eNB 配有 M 個天線來支持空間多工 MU-MIMO；在上行網路方向（從 UEs 到 eNB），我們假設在每對發射和接收天線之間的傳播通道都是獨立的（這可以透過使用預編碼和大尺寸的 eNB 來達成），每個 UE $i, i = 1..N$ ，其數據資料的延遲限制為

D_i 和丟棄率限制為 $drop_rate_i$ ，而平均數據速率為 λ_i ；令 $C_i(t)$ 是在使用最大發射功率 (P_{MAX}) 時，UE i 在子訊框 t 向 eNB 傳送數據時可得的通道速率（我們假設 $C_i(t)$ 可以通過現有技術來估計），每個子訊框是二維 (RB \times slot) 的陣列，即 $W \times 2$ (即一個 slot 有 W RBs)。這個問題的目標是設計包含數據資料傳輸排程和資源分配的跨層方法，以安排 UEs 的無線電資源、數據傳輸、發射功率、天線和 MCS，使得我們可以最小化 UE 的總能量消耗並且在延遲 (D_i)、丟棄率 ($drop_rate_i$) 和最大發射功率 (P_{MAX}) 的限制下最大化地利用子訊框；此外，跨層方法的設計應該不能非常複雜，必須很有效率，使得它可以在一個子訊框的時間內 (即 1ms) 執行結束，並且在大多數低成本的 LTE-A 晶片中都可以執行。對於每個子訊框，無線電資源分配問題可以被定義為：

$$\min \sum_{\forall i} \left(P_i(t) \sum_{\forall j} w_{i,j}(t) + \max \left(0, P_{cw} \left(\sum_{\forall j} I_{i,j} - 1 \right) \right) \right) \quad (9)$$

subject to

$$\sum_{\forall i} w_{i,j}(t) \leq W, \quad j=1..M,$$

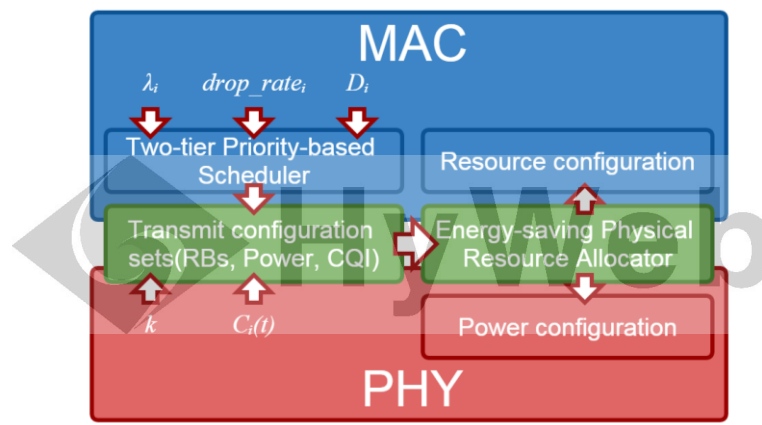
$$\text{rate}(CQI_i(t)) \sum_{\forall j} w_{i,j}(t) \geq \delta_i(t), \quad i=1..N,$$

$$P_i(t) \sum_{\forall j} w_{i,j}(t) \leq P_{MAX}, \quad i=1..N,$$

其中 $P_i(t)$ 是在子訊框 t 的每個 RB 頻寬的 UE i 的發射功率， $w_{i,j}(t)$ 是在天線 j 上分配給 UE i 的無線資源量 (單位為 SB)， $\max \left(0, P_{cw} \left(\sum_{\forall j} I_{i,j} - 1 \right) \right)$ 是 UE i 使用多個天線進行空間多工時的額外功率消耗，限制式 1 是每個天線的總無線電資源數量限制，限制式 2 則描述，對於每個 UE i ，發送的數據位元的總量必須大於或等於排程的數據位元量 $\delta_i(t)$ ，而限制式 3 則各 UE 的總發射功率限制。

本論文成果所提出的方法

我們所提出的跨層方法架構包含 MAC 層的二階式優先序排程和跨協定層的節能物理資源分配；為了最大化節能和資源利用，二階式優先序排程方法和節能物理資源分配方法會緊密地進行協同運作並結合在一起。圖 五為所提出的跨層方法的架構，接下來的小節中，我們將描述排程方法與節能資源分配的細節。



圖五、本研究所提出的跨層方法架構。

第1部份 – 二階式優先序排程方法

基於兩階式優先序的排程方法以兩階式方式定義 UE 的傳輸分配優先權，並且基於其優先權進行數據資料排程。在第一階，通過數據的緊急程度來進行區分，對緊急即時數據流給予最高一級的優先級，以保證 UE 的封包延遲和丟棄率；然後，其他即時數據流則被分配到等級 2 的優先級。實際上，在網路的上行傳輸中，中央 eNB 沒有 UE 那邊的封包延遲訊息，只有 buffer 長度和允許的數據速率(λ_i)等資訊，為了控制封包延遲，我們採用數據速率(λ_i)和延遲限制 (D_i) 來為每個 UE i 定義其 buffer 長度上限，界限如下：

$$Q_i(t) \leq -\frac{Q_i^{MAX}}{\ln(drop_rate_i)}, \quad (10)$$

其中 $Q_i(t)$ 是子訊框 t 時，UE i 的 buffer 長度（後面會描述推導出式子(10)）。因此，可以透過維持 buffer 長度的狀況如同式子(10)的關係來控制丟棄率；因此，超過 buffer 長度上限的數據資料將被分類為緊急數據，即

$$\delta_i^{ur}(t) = Q_i(t) - \left(-\frac{Q_i^{MAX}}{\ln(drop_rate_i)} \right),$$

因此，除緊急數據外的數據資料都會接著被分配為等級 2 優先級。

在第二階中，等級 2 優先級的數據資料流根據以下四個因素給予不同的優先權：

(1) 當前傳輸速率（取決於當前通道條件）；(2) 平均傳輸速率；(3) 數據速率；(4) buffer 長度；所以，數據資料流的優先權定義為

$$\zeta_i(t) = C_i(t) \times \frac{C_i}{C_i^{avg}} \times \frac{Q_i(t)}{\lambda_i}. \quad (11)$$

對於每個子訊框，排程的方案不僅防止緊急即時流量導致的封包丟棄，而且排程具有第二階優先權的流量，以維持長期公平性並提高 UE 的能源效率，此外，我們可以避免在下個子訊框中產生太多的緊急數據。我們的排程方法將以每個子訊框平衡負載的方式進行排程上行網路數據的傳輸，而不是填滿整個子訊框，這樣可以讓子訊框中留下一些空間的無線電資源，使得實體層可以通過調整 UE 的發射功率和 MCS 來獲得一定程度上的自由度以實現最佳節能，排程方式如下：

1) Set $\delta_i(t) = \delta_i^{ur}(t)$ and $Q_i(t) = Q_i(t) - \delta_i^{ur}(t)$, $i = 1..N$.

2) while $\sum_{vi} \delta_i(t) < \sum_{vi} \lambda_i$

$$3) \quad i^* = \arg \max_{v_i} \zeta_i(t)$$

$$4) \quad \delta_{i^*}(t) = \delta_{i^*}(t) + \min(Q_{i^*}(t), \sum_{v_i} \lambda_i - \sum_{v_i} \delta_i(t))$$

為了維持服務品質(QoS)，每一個UE i 的封包丟棄率必須是小於或等於其丟棄率要求(drop_rate $_i$)，也就是說以下條件必須成立：

$$P(d_i(t) > D_i) \leq \text{drop_rate}_i,$$

其中 $d_i(t)$ 是buffer最前端的數據封包的延遲，繁忙的傳輸狀況做為前提下， $P(d_i(t) > D_i)$ 的機率可以近似為 $e^{\left(-\frac{D_i}{d_i(t)}\right)}$ [22]。所以上述的方程式可以重寫如下：

$$-\frac{D_i}{d_i(t)} \geq \ln(\text{drop_rate}_i). \quad (12)$$

根據Little's Theorem [23]，平均延遲可以計算如下：

$$\bar{D}_i = \frac{\bar{Q}_i}{\lambda_i}. \quad (13)$$

將式子(13)帶入式子(12)，延遲可以藉由在UE中保持佇列長度狀況如下式而被控制：

$$Q_i(t) \leq -\frac{Q_i^{\text{MAX}}}{\ln(\text{drop_rate}_i)}.$$

第 2 部份 – 節能物理資源分配方法

無線電資源和功率分配問題在 MIMO 網路中已經被證明是困難的 NP-hard 問題。考慮 LTE-A 中的短子訊框時間(1ms)，資源分配必須非常有時效性，為了同時調度資源區塊(RBs)、發射功率、天線和調變與編碼方法(MCS)，我們所提的分配方法按照四個節能啟發階段去運作。資源分配的周期是以子訊框為單位來執行，為了每一個子訊框 t ，節能資源分配模組從上層二階式優先序排程模組接收到資源分配請求 $\Delta(t) = \{\delta_i(t) | i = 1..N\}$ ，然後為這些請求分配資源。

階段 I：初始化階段

無線電資源和功率分配問題在 LTE-A MIMO 網路中是由許多二維陣列組成無線電資源，每一個天線上都有屬於它的資源，所以可以視為是一個 3-D 資源分配問題(頻率×時間×天線)。為了簡化 3-D 陣列資源分配問題，第一階段暫時忽略天線分配問題，而是把它簡化為 2-D 平面上的無線電資源分配問題，此外，第一階段將列出每一個 UE i 的 $\delta_i \neq 0$ 所有可能的配置(之後，為了簡單起見，我們忽略了所有符號的索引 t)。對於具有 $\delta_i \neq 0$ 數據分配的 UE i (以 bits 為單位)，其可能的傳送功率與所需的資源量可以用 $(P_{i,0,k}, w_{i,0,k})$ 表示，其中 $P_{i,0,k}$ 和 $w_{i,0,k}$ 分別是當 CQI k 被應用時，UE i 需要的發射功率與所需的 SB 數量， $P_{i,0,k}$ 必須是小於或等於最大發射功率(P_{MAX})；對於一個 UE i ，當 $w_{i,0,k}$

> 2W 時必須使用多個天線，而這樣會產生額外的功率消耗，考慮這部分後，再列出所有可能的配置後，我們將更新它們如下：

$$P_{i,0,k} = P_{i,0,k} + \max\left(0, P_{CW} \left(\left| \frac{w_{i,0,k}}{2W} \right| - 1 \right) \right). \quad (14)$$

在列出所有的 UE(需要排程的 UE 假設為集合 Δ)，所有可能的資源與功率配置後，最直覺的方法是可以使用窮舉法找到最節能的資源與功率配置方式，但是複雜度會是 $O(15^{|\Delta|})$ 。幸運的是這個決策問題可以對映到多選擇背包問題(MCKP)；MCKP 已經被證實是 NP-hard [24]，因此，為了解決 2-D 資源分配問題，我們採用兩步的啟發式算法，第一步首先將原來的問題對應到線性多選擇背包問題 (LMCKP)，然後在找到最佳解，第二步則藉由迭代方案嘗試找到 MCKP 問題的最佳解，這個方法將分別在階段二和階段三中說明。

階段 II：基於 LMCKP 問題的最佳資源與功率分配方法

在第二階段，2-D 資源分配問題被簡化到線性多重選擇性背包(LMCKP)問題，這裡我們首先展示資源分配問題簡化為多重選擇性背包問題(MCKP)，然後展示如何簡化到線性多重選擇性背包問題(LMCKP)，我們的問題可以被陳述為如下：

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{15} B_{i,0,k} X_{i,0,k} \\ & \text{subject to} \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{15} w_{i,0,k} X_{i,0,k} \leq M \times W, \\ & \sum_{k=1}^{15} X_{i,0,k} = 1, \quad i = 1..N, \text{ if } \delta_i \neq 0, \\ & \sum_{k=1}^{15} X_{i,0,k} = 0, \quad i = 1..N, \text{ if } \delta_i = 0, \\ & X_{i,0,k} \in \{0, 1\}, \quad i = 1..N, k = 1..15, \end{aligned}$$

當使用 CQI k 時， $B_{i,0,k} = \bar{h} - P_{i,0,k}$ ，其中 $B_{i,0,k}$ 是 UE i 可以獲得的效益，而 \bar{h} 是常數，而且 $\bar{h} \geq \max_{\forall i, \forall k} P_{i,0,k}$ ， $X_{i,0,k}$ 是表示 CQI k 是否被 i 使用的指標，當 i 使用 CQI k 時， $X_{i,0,k} = 1$ ，否則 $X_{i,0,k} = 0$ ，而 $M \times W$ 是上行網路中，一個 subframe 中的 SB 總量，我們可以藉由將最後一個限制式，改成 $0 \leq X_{i,0,k} \leq 1$ ，把上述的問題，進一步由 MCKP-based 問題先簡化為 LMCKP-based 問題。在開始解決 LMCKP-based 優化問題前，我們可以先減少每一個 UE i 所需考慮的可能配置對 $(B_{i,0,k}, w_{i,0,k})$ ，事實上，一旦有一 $(B_{i,0,b}, w_{i,0,b})$ 存在以下條件中的任一個，則可將其刪除：(1) 有一對 $(B_{i,0,a}, w_{i,0,a})$ ，以下關係成立： $w_{i,0,a} \leq w_{i,0,b}$ 且 $B_{i,0,a} \geq B_{i,0,b}$ ；(2) 有兩對 $(B_{i,0,a}, w_{i,0,a})$ 和 $(B_{i,0,c}, w_{i,0,c})$ ，而且 $w_{i,0,a} \leq w_{i,0,b} \leq w_{i,0,c}$ 、 $B_{i,0,a} \leq B_{i,0,b} \leq B_{i,0,c}$ 和 $(w_{i,0,b} - w_{i,0,a})(B_{i,0,c} - B_{i,0,a}) \geq (w_{i,0,c} - w_{i,0,a})(B_{i,0,b} - B_{i,0,a})$ 。如果第一個條件為 true，

那麼 $(B_{i,0,b}, w_{i,b})$ 就是 *MCKP-dominated*，而第一條件為 false 但第二條件為 true， $(B_{i,0,b}, w_{i,0,b})$ 就是 *LMCKP-dominated*。在這階段所有符合任一條件的配置方式都會從 UE i 的候選配置中被刪除，接下來，我們才使用下面的方法來找到最佳解。

1. 對於 $i = 1..N$ ，設集合 S_i 包含其應考慮的候選配置，並以 w 對這些項目進行升序排序，例如： $S_i = \{(B_{i,0,g(\ell)}, w_{i,0,g(\ell)}) \mid \ell = 1..|S_i|\}$
2. 對每一個集合 S_i ， $i = 1..N$ ，選擇第一個項目（最輕的一個），例如， $(B_{i,0,g(\ell=1)}, w_{i,0,g(\ell=1)})$ 作為 UE i 默認的配置，而 $X_{i,0,g(1)} = 1$ ， $i = 1..N$ ， $B_{tot} = \sum_{i=1}^N B_{i,0,g(1)}$ ， $W_{tot} = \sum_{i=1}^N w_{i,0,g(1)}$ 。

3. 定義 $\mu_{i,m}$ 如下：

$$\mu_{i,m} = \frac{B_{i,0,g(m)} - B_{i,0,g(m-1)}}{w_{i,0,g(m)} - w_{i,0,g(m-1)}}, \quad i = 1..N, m = 2..|S_i|. \quad (15)$$

按照降序排序這些斜率

4. 選擇 $\{\mu_{i,m}\}$ 中的下一個斜率並假設它是 μ_{i^*,m^*} ，如果 $W_{tot} + w_{i^*,0,g(m^*)} - w_{i^*,0,g(m^*-1)} > W \times M$ 則轉到步驟 5；否則更新 $X_{i^*,0,g(m^*)} = 1$ ， $X_{i^*,0,g(m^*-1)} = 0$ ， $W_{tot} = W_{tot} + w_{i^*,0,g(m^*)} - w_{i^*,0,g(m^*-1)}$ ，還有 $B_{tot} = B_{tot} + B_{i^*,0,g(m^*)} - B_{i^*,0,g(m^*-1)}$ 。如果 $\{\mu_{i,m}\} = \emptyset$ ，則最佳目標值 $z = B_{tot}$ ；否則重複步驟 4。
5. 如果 $W_{tot} = W \times M$ ，我們會有一個整數解和最佳的目標值 $z = B_{tot}$ ；否則設：

$$X_{i^*,0,g(m^*)} = \frac{W \times M - W_{tot}}{w_{i^*,0,g(m^*)} - w_{i^*,0,g(m^*-1)}}$$

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

$$z = B_{tot} + (c - W \times M) \mu_{i^*,m^*}$$

執行上述算法後有兩種可能的結果，第一個是我們得到一個整數解，例如： $X_{i,0,k} = 0$ 或 1 ，而 $i = 0..N$ ， $k = 1..15$ ，這樣的解決方案也是 MCKP-based 問題的最佳解，在這種情況下，我們可以跳過第三階段，直接進入第四階段，但是有更多的機會讓我們得到第二個結果：有個 UE i' 存在，而我們可以找到它有兩個指標， $X_{i',0,\varphi}$ 和 $X_{i',0,\varphi'}$ 是小數，對於第二個結果，我們需要執行階段三的迭代方案去獲得一個次優整數解。

階段 III：基於多重選擇性背包問題的最佳資源與功率分配方法

階段三將基於來自階段二的解決方案，然後使用迭代的方式，找到 MCKP-based 無線電資源分配問題的最佳整數解決方案，此階段的方法如下：

1. 首先我們將第二階段中每一個 UE i 所得的配置定義為 g_i ，例如： $X_{i,0,g_i} = 1$ ，對於 UE i' 而言， $g_i = \max\{\varphi, \varphi'\}$ ，接著每一個 UE i 設 S_i 集合為 un-MCKP-dominated 的項目，例如， $S_i = \{(B_{i,0,g(\ell)}, w_{i,0,g(\ell)}) \mid \ell = 1..|S_i|\}$ ，然後對於每一個 S_i 集合選取斜率 μ_i^+ 和 μ_i^- 分別加入核心組 L^+ 和 L^- 中，如下所示：

$$\mu_i^+ = \max_{\ell=1..|S_i|, w_{i,0,g(\ell)} > w_{i,0,g_i}} \frac{B_{i,0,g(\ell)} - B_{i,0,g_i}}{w_{i,0,g(\ell)} - w_{i,0,g_i}}, \quad i=1..N, i \neq i', \quad (16)$$

$$\mu_i^- = \min_{\ell=1..|S_i|, w_{i,0,g(\ell)} < w_{i,0,g_i}} \frac{B_{i,0,g_i} - B_{i,0,g(\ell)}}{w_{i,0,g_i} - w_{i,0,g(\ell)}}, \quad i=1..N, i \neq i', \quad (17)$$

設 $B_{tot} = \sum_{i=1}^N B_{i,0,g_i}$ 和 $W_{tot} = \sum_{i=1}^N w_{i,0,g_i}$ 。

2. 在 L^+ 群組中的斜率進行降序排序，並在 L^- 群組中的斜率進行升序排序。
3. 選取在核心群組中的項目，並嘗試提高效益的總額：
 - i. 分別選取在核心組 L^+ 和 L^- 中的第一個項目 $\mu_{i^+}^+$ 和 $\mu_{i^*}^-$ 。
 - ii. 如果 $i^+ = i^*$ ，挑選在 L^+ 群組中的下一個項目，並將原始的項目放置於 S 集合中。
 - iii. 計算潛在效益總和如下：

$$B_{tot}' = B_{tot} - B_{i^*,0,g_{i^*}} + B_{i^*,0,g_{i^+}} + \mu_{i^+}^+ (M \times W - W_{tot} + w_{i^*,0,g_{i^*}} - w_{i^*,0,g_{i^+}}),$$
 - iv. 如果 $B_{tot}' > B_{tot}$ ，檢查新的總體所需資源數量和是否超過容量限制；如果小於容量限制，更新 UE i^+ 和 i^* 的 CQI，還有更新 B_{tot} 和 W_{tot} ，刪除斜率 $\mu_{i^+}^+$ 、 $\mu_{i^*}^-$ 、 $\mu_{i^+}^-$ 和 $\mu_{i^*}^+$ ，例如， $L^+ = L^+ - \{\mu_{i^+}^+, \mu_{i^*}^+\}$ ， $S = S - \{\mu_{i^+}^+, \mu_{i^*}^+\}$ ， $L^- = L^- - \{\mu_{i^*}^-, \mu_{i^+}^-\}$ 和設 $L^+ = L^+ \cup S$ ，然後回到步驟 i；否則，如果新的所需資源數量超過容量限制，選擇在 L^+ 群組中下一個項目；如果 $L^+ \neq \emptyset$ ，將原始項目放置於 S 集合中，然後回到步驟 iii；但是如果 $L^+ = \emptyset$ ，群組 $L^+ = S$ ，並刪除當前的 $\mu_{i^*}^-$ ，然後回到步驟 i。
 - v. 如果 $B_{tot}' \leq B_{tot}$ 和 $S = \emptyset$ ，終止程序。如果 $S \neq \emptyset$ ，使 $L^+ = S$ 並刪除當前的 $\mu_{i^*}^-$ ，然後回到步驟 i。

階段 IV：天線分配

第四階段是將天線分配給 UEs，為了解決這個問題，我們設計了一個分割方法。這個問題可以看成是判斷給定的多個正整數集合是否可以被分割成 M 個子集， $S_1..S_M$ ，使得在每一個 S_j ($j = 1..M$) 數字的總和將都是相同的，並都等於 W ，我們在這裡設計一動態規劃解決方案 (*pseudo-polynomial time dynamic programming solution*)，演算法的步驟如下：

1. $n \leftarrow \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{15} X_{i,0,k}$ ， $S = \{w_i \mid i = 1..N\}$ ，
where $w_i = \sum_{k=1}^{15} X_{i,0,k} w_{i,0,k}$.

2. for $j = 1..M$
3. $P \leftarrow$ 空的布林(Boolean)容量運算表，大小為 $(W+1) \times (n+1)$
4. 初始化 P 的頂列 ($P(0, x)$) 為 true
5. 初始化 P 的最左邊列 ($P(x, 0)$)，除了 $P(0, 0)$ 為 false
6. 設 $m = 1..W$
7. 設 $r = 1..n$
8. $P(m, r) \leftarrow P(m, r-1) \text{ or } P(m-S[r-1], r-1)$
9. 如果 $P(W, n) = \text{true}$ ，意味著我們可以找到一組 S_j 無線電資源請求，使得 $\text{sum}(S_j) = W$ ；否則，選取一組 S_j 無線電資源，使得 $\text{sum}(S_j)$ 接近於 W 。
10. 從 S 中排出分配的項，例如， $S = S - S_j$ ， $n \leftarrow |S|$ ，然後回到步驟 4.

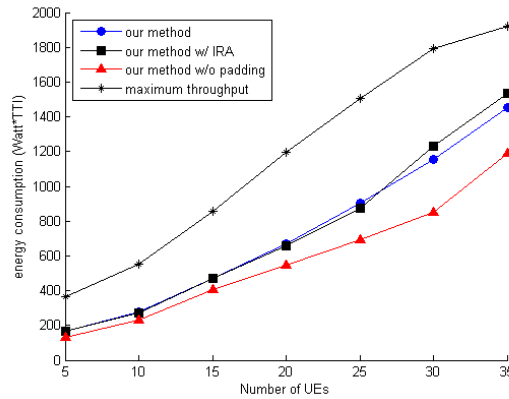
4. 實驗模擬

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。詳細的實驗參數如表二。我們比較了四種方法的性能：(1)我們的方法；(2)我們的方法 with IRA：線性多重選擇性背包解法這可以被看作是理想的資源分配方法(IRA)，所以我們在此暫時忽略物理限制，使用最理想的分配狀況做為比較；(3)我們的方法但是沒有第一階優先權的存在：它可以用來檢查第一階優先權的效果；和(4)最大吞吐量方法：傳統的基於最大吞吐量的方法，總是選擇具有最佳 CQI 的 UE 來傳送數據資料。

表二、系統模擬參數

參數	數值
頻道頻寬	10MHz
站點間的距離 (ISD)	400m
頻道模型	$L(R) = PL_{LOS}(R) \times Prob(R) + (1 - Prob(R)) \times PL_{NLOS}(R)$ <p>R : 距離為公里 eNB-UE</p>

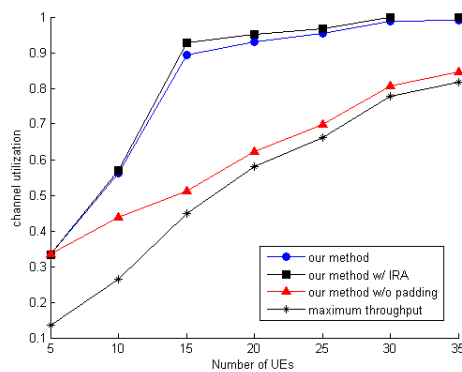
	$P_{LOS}(R)=$ $103.4+24.2\log_{10}(R)$ $P_{NLOS}(R)=$ $131.1+42.8\log_{10}(R)$ $Prob(R)=\min(0.018/R,1)\times(1-$ $\exp(-R/0.063))+\exp(-$ $R/0.063)$
eNB 最大發射功率	30 dBm
eNB 最大天線增益	14 dBi
UE 最大發射功率	23 dBm
UE 最大天線增益	0 dBi
熱雜訊	-174dBm
使用者設備	5-35
流量	60k-5.5M bits/s
丟棄率	0.05
γ	0-2
MIMO	1x1-8x8 (i.e., $M = 1-8$)



圖六、UE 的數目對能耗的影響。

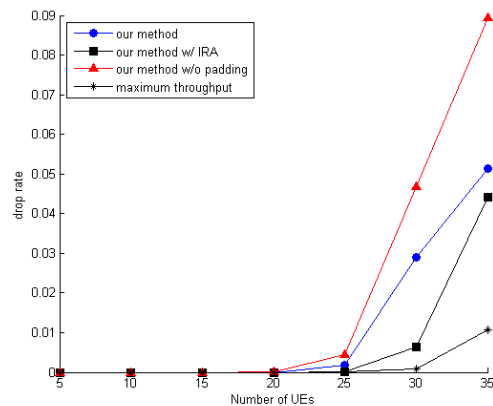
圖六顯示，當 UE 數目增加的時候，所有方法的能量消耗都是增加的，而我們方法與 ideal case (our method w/ IRA) 效能接近，表現最好，因為與其它方法比較，我們的方法在每一個子訊框中平衡了 UEs 的負載，而且保留一些空閒資源在每個子訊框中增加了彈性，使得 UEs 有機會用較省能量的方式完成資料傳輸。

圖七顯示不同 UE 數目下的 RB 利用率，我們可以看到 RB 利用率隨著 UE 數目的增加而提升，我們所提的方法與 ideal 方法一樣展現最佳的 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，這些也進一步使得我們的方法得到較省能的表現；相反的，其它的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。



圖七、UE 的數目對物理資源利用率的影響。





圖八、UE 的數目對 drop rate 的影響。

圖八顯示不同 UE 數目下的封包遺失率，我們可以看到我們的方法與 maximum throughput 的 drop 的 rate 均低於 5%，這表示我們的方法控制 UE 的 drop rate 是有效的。比較之下，我們所提出的方法不僅最節省能量，也可以保證 QoS，表現最優異。

5. 結論

在本論文中，我們討論 LTE/LTE-A 上行 MU-MIMO 網路的行動裝置節能且保證其服務品質的資源管理與數據排程機制，多天線網路的環境下，此節能資源分配與數據排程是一個複雜的問題，方法必須要與標準相容，而且同時考慮各個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，而此問題的複雜度相當高(為 NP-hard 問題)，但是實際環境中 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有效率地在有限的時間內完成資源的分配與數據資料的排程，實驗結果也顯示所提出的跨協定層方法比傳統方法的效果好，可以得到優秀的省電效果，保證 QoS，也能充份利用無線資源。

致謝

本論文研究感謝科技部計畫 MOST 105-2221-E-024-010 和 MOST 105-2221-E-182-051 共同贊助。

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.
- [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] J.-P. Yoon, W.-J. Kim, J.-Y. Baek, and Y.-J. Suh, “Efficient Uplink Resource Allocation for Power Saving in IEEE 802.16 OFDMA Systems,” *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2008)*, pp. 2167–2171, May 2008.
- [9] M. Lauridsen, A. R. Jensen, and P. Mogensen, “Reducing LTE Uplink Transmission Energy by Allocating Resources,” *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2011)*, pp. 1–5, Sept. 2011.
- [10] G. Y. Li, J. Niu, D. Lee, J. Fan, and Y. Fu, “Multi-Cell Coordinated Scheduling and MIMO in LTE,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 761–775, Second quarter 2014.
- [11] Q. Li et al., “MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 5, pp. 86–92, May 2010.
- [12] A. R. Jensen, M. Lauridsen, P. Mogensen, T. B. Sørensen, and P. Jensen, “LTE UE Power Consumption Model: For System Level Energy and Performance Optimization,” *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2012)*, pp. 1–5, Sept. 2012.
- [13] 3GPP TS 36.213 V8.8.0 Physical layer procedures (Release 8), Sept. 2009
- [14] 3GPP TR 36.211 v11.0.0, “Physical Channels and Modulation,” Sep. 2012.
- [15] J. Blumenstein, J. Ikuno, J. Prokopec, and M. Rupp, “Simulating the long term evolution uplink physical layer,” in *Proc. ELMAR*, Sep. 2011, pp. 141-144.
- [16] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface,” *IEEE Std 802.16m-2011 (Amendment to IEEE Std 802.16-2009)*, pp. 1–1112, May 2011.
- [17] F. Z. Kaddour, E. Vivier, M. Pischella, L. Mroueh, and P. Martins, “Power control in opportunistic and efficient resource block allocation algorithms for green LTE uplink networks,” *IEEE Online Conference on Green Communications (GreenCom 2013)*, pp. 8–13, Oct. 2013.
- [18] M. Kalil, A. Shami, and A. Al-Dweik, “Power-efficient QoS scheduler for LTE uplink,” *IEEE International Conference on Communications (ICC 2013)*, pp. 6200–6204, June 2013.
- [19] N. Prasad, H. Zhang, H. Zhu, and S. Rangarajan, “Multi-User MIMO Scheduling in the Fourth Generation Cellular Uplink,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 4272–4285, Sept. 2013.
- [20] F. D. Cardoso and L. M. Correia, “MIMO gain and energy efficiency in LTE,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012)*, pp. 2593–2597, April 2012.
- [21] R. Imran, M. Shukair, N. Zorba, O. Kubbar, and C. Verikoukis, “A novel energy saving MIMO mechanism in LTE systems,” *IEEE International Conference on Communications (ICC 2013)*, pp. 2449–2453, June 2013.
- [22] G. Song, Y. Li, L.J. Cimini, and H. Zheng, “Joint channel-aware and queue-aware data scheduling in multiple shared wireless channels,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2004)*, pp. 1939 -1944, vol. 3, March 2004.
- [23] D. Dechene and A. Shami, “Energy-aware resource allocation strategies for LTE uplink with synchronous

- HARQ constraints,” *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 13, no. 2, pp. 422-433, 2014.
- [24] K. Dudziński and S. Walukiewicz, “Exact methods for the knapsack problem and its generalizations,” *European Journal of Operational Research*, vol. 28, no. 1, pp. 3-21, Jan. 1987.

