

國立政治大學資訊科學系
Department of Computer Science
National Chengchi University

碩士論文

Master's Thesis

基於QoS限制於SC-FDMA上行資源排程之研究
Qos-Costrained Scheduling for Uplink SC-FDMA

研究生：李昀峻

指導教授：張宏慶

中華民國 一百零一年 七月

July 2012

基於QoS限制於SC-FDMA上行資源排程之研究
Qos-Costrained Scheduling for Uplink SC-FDMA

研究生：李昀峻

Student: Yun-Jun Lee

指導教授：張宏慶

Advisor: Hung-Chin Jang



July 2012

中華民國 一百零一年 七月

致謝

很開心能在自己訂下的時間內完成碩士論文，這也代表著我的學生生涯即將畫下句點，開始另一階段的挑戰。能夠順利完成這篇論文首先要感謝我的指導教授張宏慶老師，不僅是在學術上的指導，老師對自己做事規劃謹慎的態度也讓我謹記在心。

接著我要感謝在過去時間與我討論研究的實驗室夥伴，彪哥、璇姐以及鐘毅哥。謝謝你們在我剛起步學習時給予指導，讓我在觀念的建立上事半功倍，在研究過程中遭遇困難時互相激勵打氣，帶給我面對逆境的樂觀精神。這些經歷使我在未來不論面對順境或逆境，都能保有正確的觀念持續前進。還有實驗室的學弟偉迪、柏硯、華元，謝謝你們處理實驗室的大小事，讓我能專心完成眼前的論文。

最後，我要感謝長期以來不斷支持我的家人，謝謝母親總是全力支持我想做的事，給我完全自由的發揮空間，也謝謝哥哥在我不在家中的日子裡，協助母親處理家中雜事，讓我專心學習。沒有你們在背後的大力支持，就沒有今日我的成長。

另外，我必須感謝一直以來陪伴我的女友，成熟，理性的妳。總是能在適當的時候運用智慧在我疲憊的心靈注入精神力量，讓我重新站起，繼續前進，也因為有妳陪伴，讓我對未來充滿期待。

也謝謝在我生命中鼓勵過我的每一個人，因為你們的出現，讓我有機會不斷淬鍊自己，也謝謝你們讓我知道謙遜與圓融的待人方式將使我更臻圓滿，我會謹記你們給我的建議，謝謝你們。

基於QoS限制於SCFDMA上行資源排程之研究

中文摘要

隨著無線通訊技術快速的發展，使用者對無線傳輸及品質的要求日益提升。第三代合作夥伴計劃 3rd Generation Partnership Project (3GPP)所提出的長期演進技術 Long Term Evolution (LTE)，是邁入第四代行動通訊系統(4G)的極佳選擇。其中以 Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)系統作為上行鏈路的主要通信技術。

然而，在上行 SC-FDMA 中有連續性資源塊配置的規定以及所配置之資源塊需使用相同調變技術的限制。一般而言資源分配的好壞會影響傳輸速率(data rate)與系統效能。因此，如何分配資源以改善傳輸速率與增進系統效能是本論文的研究重點。

目前，已有許多文獻在探討如何透過偵測頻率響應(frequency response)，解決資源分配的問題。但我們發現，透過偵測頻率響應的好壞進行優先權排程，無法有效符合現實網路服務的實際需求。在本論文中，我們擬以三階段的演算法來改善系統中資源分配的問題。第一階段，在 time domain 排程時根據不同的 Quality of Service (QoS)特性區分 User Equipment (UE)。在第二階段 frequency domain 排程時依據通道品質好壞決定優先權以分配無線電資源給 UE。最後，我們根據 SC-FDMA 的兩大重要限制，提出在 LTE 上行系統中資源分配方法，在滿足 Guaranteed Bit Rate (GBR)服務之時間延遲的限制時，亦能提升整體系統效能。

在模擬分析中，我們利用 NS3 進行模擬實驗分析，將我們所提出的三階段演算法在不同比例之網路服務類別的要求下，與固定子載波動態資源分配機制以及適應性動態子載波分配機制進行比較。實驗結果顯示，我們的方法在 VoIP 的 average delay time 相較於適應性動態分配法最多可改善約 82.9%，real time gaming 最多可改善約 84.9%，而整體系統頻帶利用率(spectrum utilization)相較於固定與適應性分配機制最多可提升約 15.3%。

Qos-Costrained Scheduling for Uplink SC-FDMA

Abstract

Long Term Evolution (LTE) is the latest standard of 3rd Generation Partnership Project (3GPP), which is one of the most promising technology for 4G mobile networks. The goal of LTE is to provide high data rate transmission, scalable bandwidth, low latency, and high-mobility. To achieve this goal, the LTE employs Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for downlink data transmission and Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) for uplink data transmission.

This thesis focuses on the resource allocation problem of LTE SC-FDMA system. We propose a three-stage approach to improve resource allocation performance. In the first stage, we design a time domain scheduling according to different QoS features and time delay requirement to distinguish user equipment (UE). In the second stage, we design a frequency domain scheduling based on channel state information to give priorities to UEs. Finally, we propose resource allocation methods for LTE uplink under the two constraints of SC-FDMA. The proposed methods are proved to be able to meet the real-time service delay constraints and enhance overall system performance.

In the simulations, the proposed three stage algorithms are compared to fixed sub-carrier dynamic resource allocation algorithm and adaptive dynamic sub-carrier algorithm against different proportions of network services. Simulation results show that our method outperforms the other two methods in terms of throughput, transmission delay and packet loss ratio.

目錄

第一章 緒論	1
1.1 背景	1
1.1.1 LTE 簡介	1
1.2 OFDMA/SC-FDMA	2
1.2.1 訊框格式與資源塊型式	4
1.3 研究動機與目的	7
1.4 論文組織與架構	8
第二章 相關研究	9
2.1 動態子載波分配(Dynamic Subcarrier Allocation)	9
2.2 常見的資源分配演算法	12
2.3 Quality of Service	14
2.3.1 標準 QCI 屬性	15
2.4 總結	16
第三章 研究方法	18
3.1 問題分析	18
3.1.1 維持不同等級的網路服務品質(Quality of Service, QoS)保證	18
3.1.2 通道品質不佳的允入控制	19
3.1.3 SC-FDMA 的兩個限制條件	20
3.1.4 動態配置的資源塊仍可能浪費頻寬	21
3.2 研究方法	22
3.2.1 MAC Priority Classification (TD) Scheduler	23
3.2.2 GBR 承載封包 QoS-Constrained (TD) Scheduler	24
3.2.3 Non-GBR 承載封包 QoS-Constrained (TD) Scheduler	25
3.2.4 允入控制連線控制(FD Scheduler)	25
3.2.5 優先權允入控制 (FD Scheduler)	26

3.2.6 適應性連續資源塊限制(RBs allocation).....	28
3.2.7 系統分析.....	30
3.2.8 排程演算法架構及流程.....	32
第四章 模擬實驗與數據分析.....	39
4.1 實驗設計與假設.....	39
4.1.1 實驗環境.....	40
4.1.2 評估指標.....	41
4.2 實驗數據與分析.....	42
第五章 結論與未來研究.....	53
5.1 結論.....	53
5.2 未來研究.....	54
參考文獻.....	55



圖目錄

圖 1-1 OFDMA 與 SC-FDMA 中使用 QPSK 傳送資料符號示意圖[2]....	2
圖 1-2 (a)單載波(b)多載波[3]	3
圖 1-3 OFDMA 與 SC/FDE [3].....	4
圖 1-4 LTE 系統 TDD 訊框結構[1]	4
圖 1-5 LTE 系統 FDD 訊框結構[1].....	5
圖 1-6 資源塊與時槽的關係示意圖[1].....	6
圖 2-1 3G UTRAN 架構.....	9
圖 2-2 LTE 資源排程運作圖	10
圖 2-3 R99 end-to-end QoS 架構[3]	14
圖 3-1 排程與適應性連結在無線電資源管理間運作示意圖[11].....	18
圖 3-2 SINR 與 CQI 對應示意圖[10].....	19
圖 3-3 RB 配置的比例與傳送資料量變化圖	22
圖 3-4 LTE MAC 層排程架構圖	23
圖 3-5 RBs allocation 演算法.....	29
圖 3-6 降低調變後損失的 bit 數示意圖	31
圖 3-7 TD 與 FD scheduler 流程圖	33
圖 3-8 RBs allocation 最終演算法.....	36
圖 4-1 降低調變次數 throughput 變化圖.....	43
圖 4-2 降低調變次數所需的 RB 數量.....	44
圖 4-3 VoIP aggregated throughput	45
圖 4-4 VoIP average delay	45
圖 4-5 Real time gaming aggregated throughput.....	47
圖 4-6 Real time gaming average delay.....	48
圖 4-7 Real time gaming packets loss rate.....	49
圖 4-8 Buffered streaming aggregated throughput	50
圖 4-9 Total aggregated throughput	51
圖 4-10 RBs utilization	52

表目錄

表 1-1 LTE 中頻寬所對應的資源塊數量表[1].....	7
表 2-1 LTE QCI 各項需求參數[5].....	16
表 2-2 相關文獻所提方法優缺點比較	17
表 3-1 4-bit CQI 對照表[9]	20
表 3-2 QCI 與 MAC QoS 優先權對照表[4]	23
表 3-3 調變等級對應表[2].....	30
表 3-4 降低調變後不同 Level 的 RB 數量(假設 Lv5 的 RB 數量為 5) ..	30
表 3-5 降低調變後不同 Level 能傳送的 bit 數.....	31
表 3-6 降低調變後損失的 bit 數	31
表 4-1 模擬環境參數	40
表 4-2 QoS 要求的各項參數.....	40
表 4-3 Traffic ratio	43
表 4-4 VoIP packet delay improvement	46
表 4-5 Real time gaming aggregated throughput improvement	47
表 4-6 Real time gaming packet delay improvement	48
表 4-7 Real time gaming packets loss rate improvement	49
表 4-8 Buffered streaming aggregated throughput improvement.....	50
表 4-9 Total aggregated throughput improvement.....	51
表 4-10 RBs utilization improvement.....	52

第一章 緒論

1.1 背景

1.1.1 LTE 簡介

第三代合作夥伴計劃(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)提出的長期演進技術(Long Term Evolution, LTE)或演進通用無線存取網路(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN)是第四代無線通訊系統極佳的選擇。E-UTRAN 提供 1.4Mhz 至 20Mhz 的可調變通道頻帶以符合傳輸服務要求。3GPP LTE 的最高傳輸速率在下行鏈路預計可達 100Mbps，上行鏈路預計可達 50Mbps[1]。

LTE的下行鏈路採用正交分頻多工存取(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技術作為傳輸系統，支援的調變方式有Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)、16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)與64-Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM)三種。上行鏈路採用單載波分頻多工(Single Carrier-Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)技術作為傳輸系統。支援調變的方式有Binary Phase Shift Keying (BPSK)、QPSK與16-QAM三種。由於SC-FDMA具有較低的峰均值功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)，可有效降低用戶端設備(User Equipment, UE)功率消耗問題。而功率消耗問題對於UE等手持設備有十分重要的影響[2]。

The following graphs show how a sequence of eight QPSK symbols is represented in frequency and time

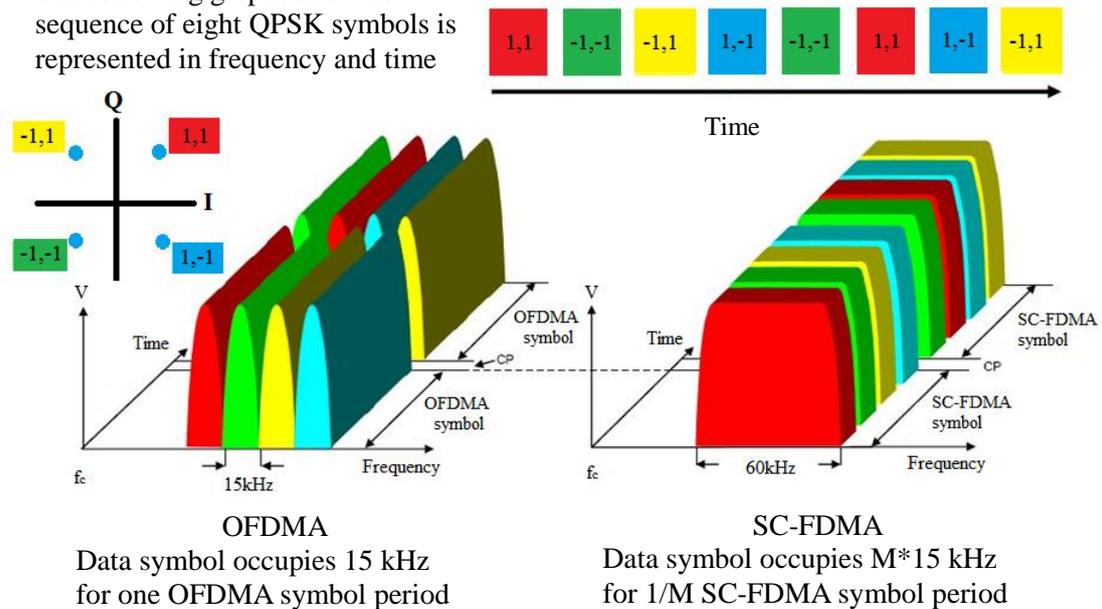


圖 1-1 OFDMA 與 SC-FDMA 中使用 QPSK 傳送資料符號示意圖[2]

圖 1-1 為 OFDMA 與 SC-FDMA 中使用 QPSK 傳送資料符號 (data symbol) 示意圖。左圖為 OFDMA 傳送方式，每 15kHz 為一個 subcarrier。在時域 (time domain) 方面，每隔 66.7 μ s 週期傳送一個 symbol。以 QPSK 為例，四個 symbol 以並列方式傳送，並在 symbol 結束時插入循環字首 (Cyclic Prefix, CP)，再接下一個 symbol。右圖為 SC-FDMA 傳送方式，與 OFDMA 不同的是在時域中，symbol 為串列式的傳送，在頻域 (frequency domain) 中為四倍 OFDMA 載波的頻寬傳送，也就是每一個 symbol 在一個較大的頻寬傳送。相較於 OFDMA 的多重載波 (multi-carrier) 方式，比較像是單載波 [2]。

1.2 OFDMA/SC-FDMA

OFDMA 是 OFDM 的延伸技術，是一種運用多重載波傳送資料的技術。它把擁有高資料速率的訊號分散成數個資料速率較低的訊號，經過調變後分別放入不同頻段上，透過載波來傳送。由於各個載波之間彼此是正交 (orthogonal) 的關係，因此資料同時傳輸時不會相互干擾，讓不同 UE 在同一時間使用不同頻段時訊號不會相互干擾，以便資料的傳輸。

由於 OFDMA 訊號是由多個子載波同時傳輸，所以會有偶發性的高峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)的問題存在。雖然 OFDMA 技術能提供更大的覆蓋範圍、更高的資料速率(data rate)和頻譜效率，但是 OFDMA 的符號是由多個獨立的子載波訊號，如圖 1-2(a)，經過調製後相互加疊而成。所以當各個子載波的相位相同或相近時，加疊的訊號便會受到相同初始相位訊號的調製而改變，產生較大的瞬時峰值功率比值，帶來較高的 PAPR，如圖 1-2(b)所示。但一般功率放大器的動態範圍都是有限的，所以峰值平均功率較大的 OFDMA 訊號極易進入功率放大器的非線性區域，導致訊號產生非線性的失真，造成明顯的頻譜擴展干擾使頻帶內的訊號產生變化，導致整個系統性能嚴重下降。因此峰值平均功率比已成為限制 OFDMA 技術廣泛應用的一個重大缺陷[4]。



圖 1-2 (a)單載波(b)多載波[3]

SC-FDMA 與 OFDMA 相似，訊號程序反覆在不同時域與頻域區間做轉換。圖 1-3 比較 SC-FDMA 與 OFDMA 技術的不同，SC-FDMA 在處理資料符元(data symbol)時會先經過反轉傅立葉(Discrete Fourier Transform Spread OFDM, DFT-S-OFDM)的動作由頻域轉回至時域，每個符號被切割成較小塊的區塊，並在一個時間單位內分別傳送符號區塊。所以 SC-FDMA 系統在傳送時子載波可視為單載波，而單載波涵蓋在線性區間的範圍內，所以有較低的 PAPR，能有效降低 UE 訊號傳送時所消耗的功率，延長電池的續航力。經過綜合考慮，3GPP 最終確定 LTE 的上行鏈路採用 SC-FDMA 技術。

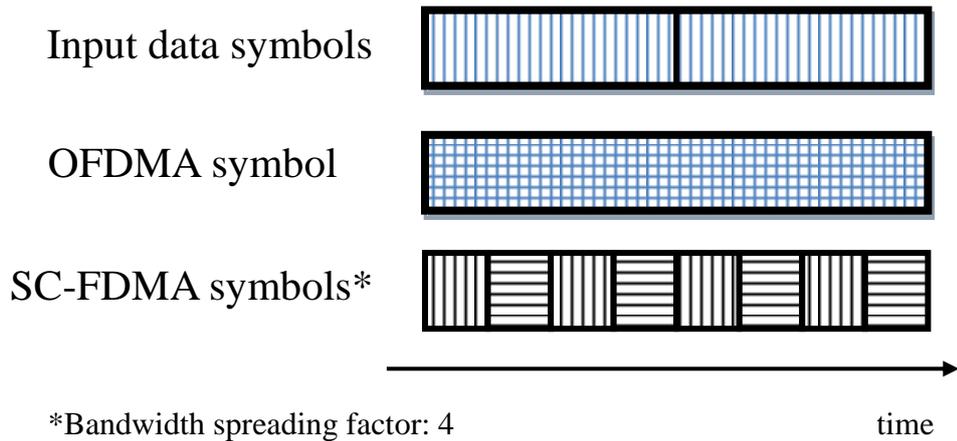


圖 1-3 OFDMA 與 SC/FDE [3]

1.2.1 訊框格式與資源塊型式

LTE 系統中支援兩種訊框格式，分別為分時多工(Time-Division Duplexing, TDD)與分頻多工(Frequency-Division Duplexing, FDD)兩種模式。在 TDD 模式中，每個無線電訊框(radio frame)長度為 10 ms，由兩個半訊框(half-frame)所組成。每個半訊框長度為 5 ms，每個半訊框由五個子訊框(sub-frame)組成，每個子訊框長度為 1 ms。而子訊框又由兩個時槽(time slot)所組成，每個時槽長度為 0.5 ms，如圖 1-4 所示。

TDD frame structure

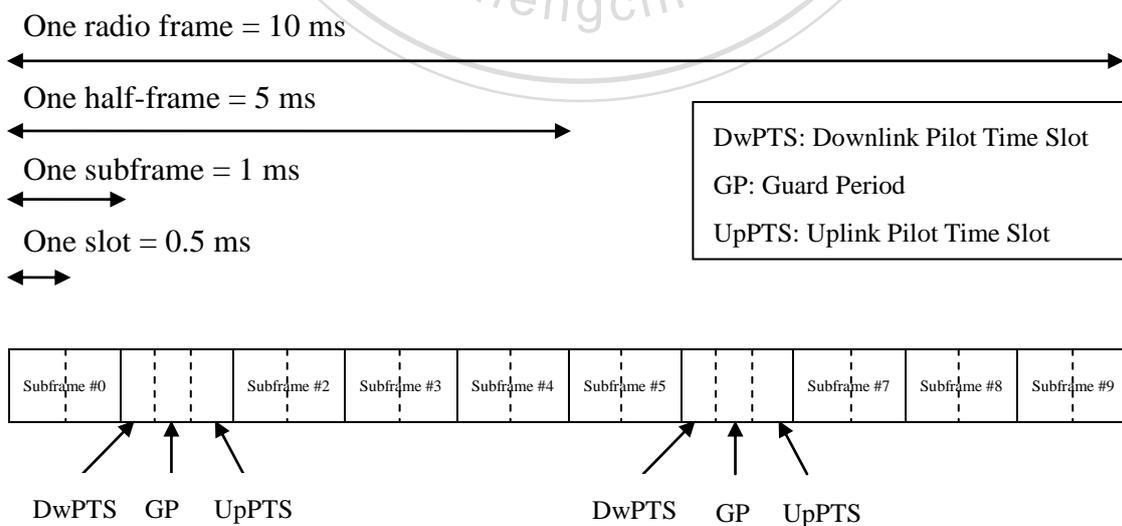


圖 1-4 LTE 系統 TDD 訊框結構[1]

對於 FDD 模式而言，每個無線電訊框分為 10 個子訊框(sub-frame)，每個子訊框長度為 1 ms。其中每個子訊框由兩個時槽(time slot)所組成，每個時槽為 0.5 ms，總共 20 個時槽，如圖 1-4 所示。

FDD frame structure

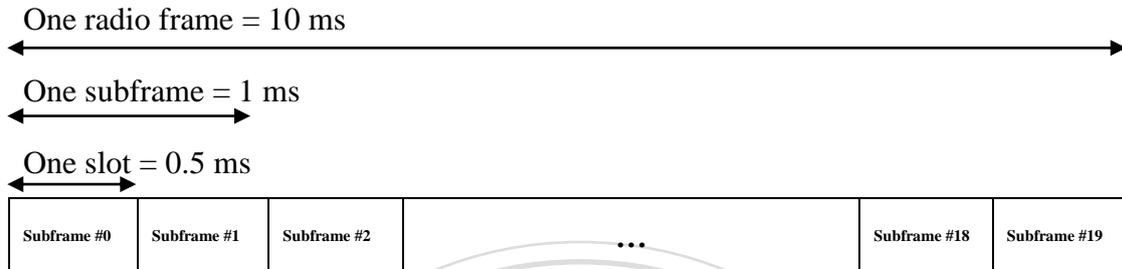


圖 1-5 LTE 系統 FDD 訊框結構[1]

在 LTE 系統規格中，定義一個資源塊(Resource Block, RB)的大小在頻率上使用十二個連續子載波，時間上則是佔用了一個時槽(time slot)的符號數(symbol)。在使用一般循環前置(normal Cyclic Prefix)時，一個時槽占用 7 個 symbol 的時間，而使用延伸循環前置(extended CP)時，一個時槽占用 6 個 symbol 的時間。圖 1-6 為一個資源塊與一個時槽的關係示意圖。

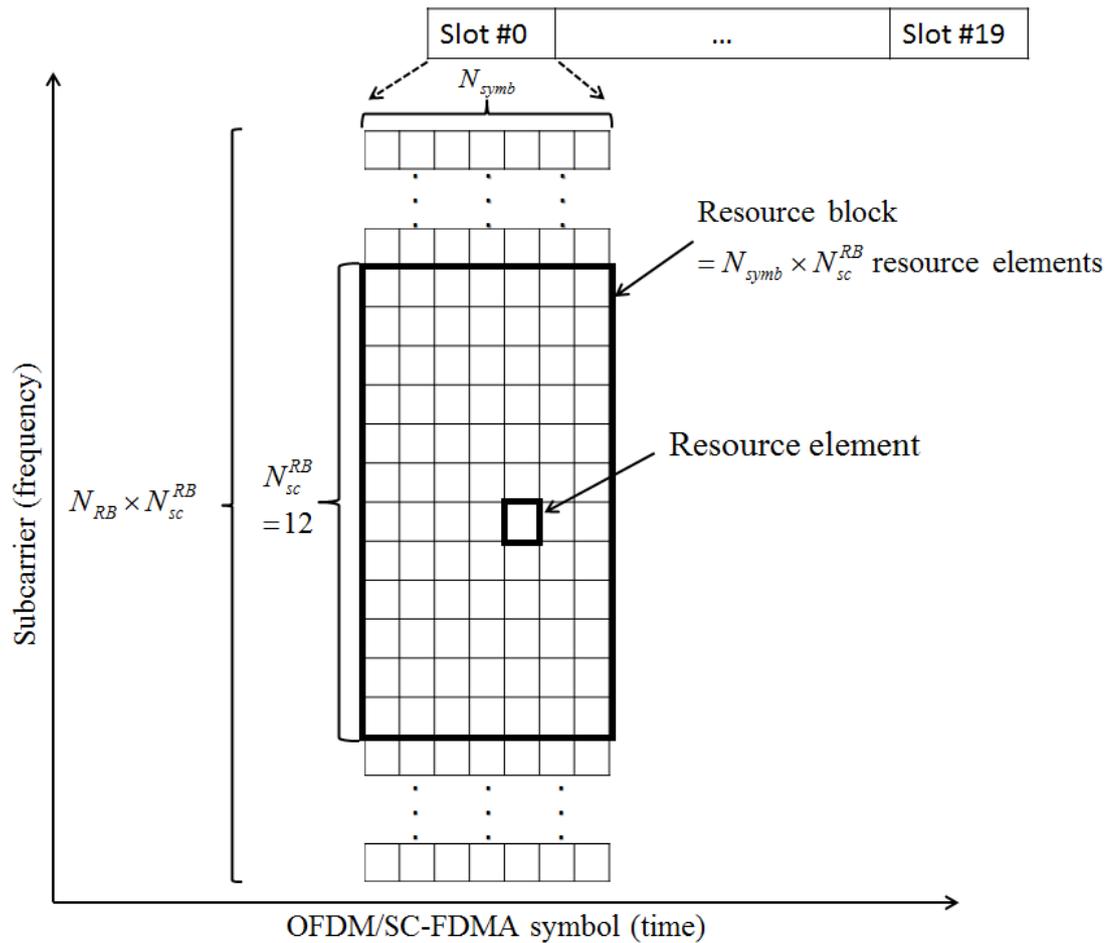


圖 1-6 資源塊與時槽的關係示意圖[1]

LTE 是採用正交分頻多工(OFDMA)做為調變技術，而不是早期的分碼多工技術(Code Division Multiple Access, CDMA)。更具體的說，3GPP 在下行鏈路使用正交分頻多工(OFDMA)，上行鏈路則採用單載波分頻多工(SC-FDMA)。這兩種分頻技術均利用快速傅立葉變換(FFT)把所配置的頻寬分為 UE 可共享的較小單位。

相較於 OFDMA，上行所用的 SC-FDMA，因為調變功率小於 OFDMA 調變，因此可以降低 UE 端手機的耗電。除此之外，採用不同大小點數的 FFT，系統就能支援 1.4 MHz、3 MHz、5 MHz、10 MHz、15 MHz 和 20 MHz 等各種頻寬配置。

表 1-1 表示 LTE 中頻寬配置所對應的資源塊(RBs)數量表。

Channel bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Number of RBs in frequency band	6	15	25	50	75	100

表 1-1 LTE 中頻寬所對應的資源塊數量表[1]

1.3 研究動機與目的

為在LTE於上行鏈路系統中使資源有效分配，必須有效制定排程(scheduling)和資源分配方法。我們同時考慮SC-FDMA系統中連續資源分配的問題，進而在分配資源與UE上取得一個公平的排程，有效提高吞吐量等系統效能。

目前，對於不同資源分配和排程演算法已有不少研究。其中，Proportional Fair演算法[13]在犧牲吞吐量時利於UE間的公平最大化，而Maximum C/I演算法[11]則根據吞吐量的好壞決定優先權進行排程。對於整體系統效能來說，公平是經常用來表達整體效用好壞的一個參考指標，但是在考慮實際網路服務的不同需求時，公平往往很難作為整體效能好壞的參考。

在本論文中，我們著重在SC-FDMA上行鏈路系統的通道相關排程(Channel Dependent Scheduling, CDS)。在無線傳輸環境中，要設計出一套好的資源分配演算法，不能僅單方面考慮通道條件便進行資源分配及排程。而是需要將不同等級的網路服務(Quality of Service, QoS)一併納入考量。同時亦須考慮到成本及複雜度的問題，才能設計出好的資源分配演算法。為達到上述目標，須將MAC及PHY兩層的資訊納入考量，在複雜度限制下達到所需效能，使網路效能有所提升，增進UE整體的使用滿意度。

1.4 論文組織與架構

本論文共分為五個章節，各章節安排如下：

第一章 緒論

簡介 LTE 背景，OFDMA 與 SC-FDMA 架構，不同的訊框格式與資源塊型式，以及研究動機與目的。

第二章 國內外相關研究

參考國內外相關研究，討論在 SC-FDMA 中資源分配的相關議題。

第三章 議題分析與研究方法

詳細分析所發現的問題，針對各問題提出相應解決方法的演算法。

第四章 模擬環境，與實驗數據分析

利用 NS3 模擬實驗結果，透過分析實驗數據，驗證所提出的方法是否能有效提升整體系統效能。

第五章 結論與未來研究

總結文中所提出的問題，解決方法與未來研究方向。

第二章 相關研究

在 LTE 上行鏈路系統中「連續性 RB 配置」的限制是個值得注意的議題。雖然在 OFDMA 系統中並無如此限制，亦即在頻寬資源分配上的挑戰相對較低。目前對於排程機制的研究主要集中在 LTE 下行鏈路系統中，如文獻[6][7][8][9]。這些演算法確實改進了系統的整體效能，但是卻不適用於 LTE 上行系統中。在本研究中，我們會先對 LTE 上行系統中排程相關文獻進行研究，並對這些研究做一個簡單總結，說明其優點與缺點。

2.1 動態子載波分配(Dynamic Subcarrier Allocation)

當 UE 要傳送資料到目的端時，會發送 request 給 BS (Base Station)，BS 接收到 request 後會針對要求進行排程並將適量的 RBs 配給 UE。UE 將資料傳到 BS 後再經由 BS 轉傳到目的端，如圖 2-1 所示。

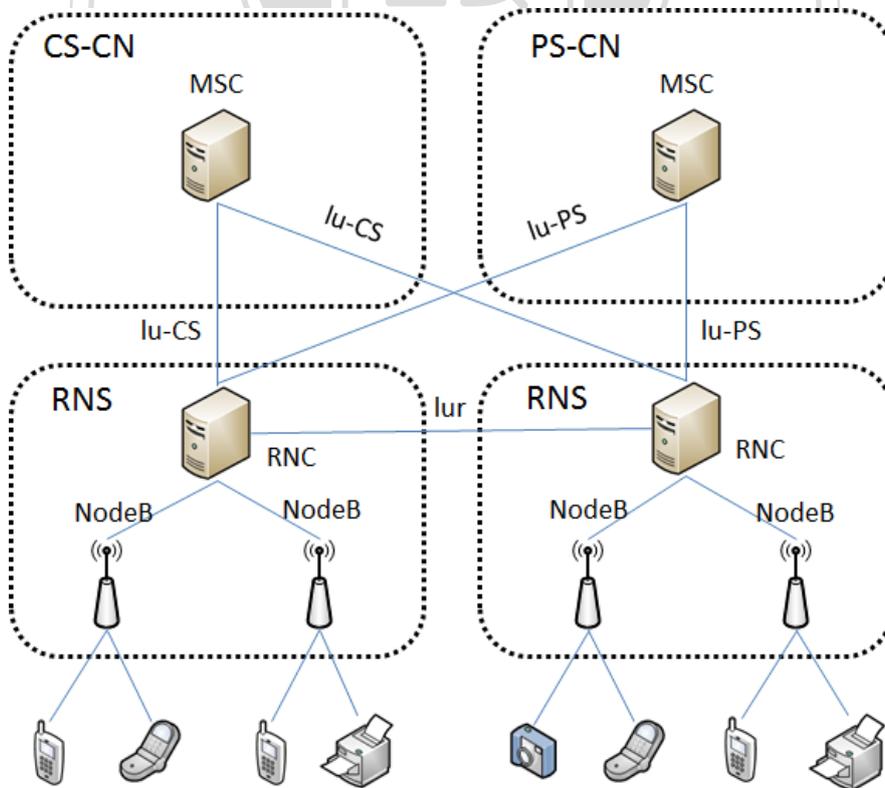


圖 2-1 3G UTRAN 架構

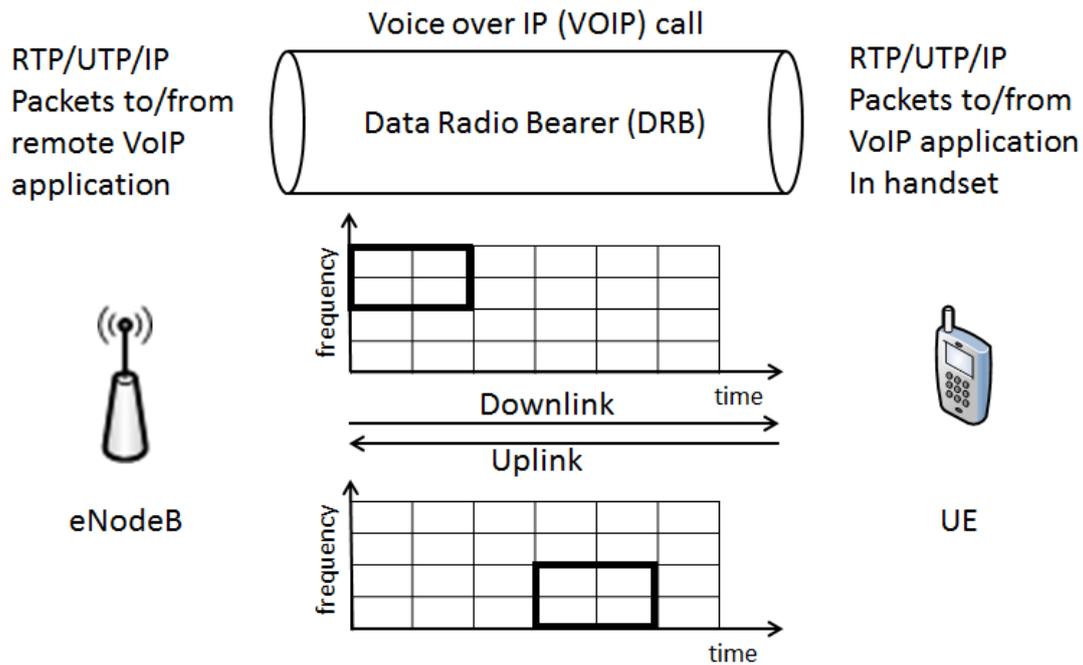


圖 2-2 LTE 資源排程運作圖

然而許多排程的相關研究大都會根據 UE 與基地台 (eNodeB) 之間的通道條件作為分配資源的依據。圖 2-2 說明，對於 VoIP 的呼叫，基地台與 UE 的 MAC 層會根據通道條件定期在下行與上行間於 Data Radio Bearer (DRB) 傳送資料封包。為避免 UE 正在進行資料傳輸時發生通道的嚴重衰減 (deep fade)，在傳輸資料時可藉由動態分配子載波資源以獲得較高的通道增益。為確保資料傳輸於子載波上具有較佳的通道增益，目前任何分配演算法的主要目的是使用通道品質測量，以獲得參數資訊，並分配適當的子載波資源給 UE。文獻[4]是假設具有完善的通道估測和通道在時間領域變化緩慢的環境，並有足夠的時間進行資源分配和傳輸。該作者提出之動態分配的目的是提供 UE 最好的資源以優化整個系統效能。每個 UE 將分配一個資源 (在此資源的定義為群集 (cluster)，由一個或多個 RB 組成)。為了達到公平性，使每個 UE 均可獲得資源，所以每個 UE 分配到的 RB 數量是 $M = N/U$ (子載波總數除以 UE 總數)。在不失一般性的條件下，假設具有足夠的 RBs 可以等分給所有 UE，而所有 UE 群集藉由通道估測所得到的群集子載波增益將依序填入如式(1)的矩陣 C 中。

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{U1} & \cdots & C_{UK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， U 和 K 分別是UE總數以及群集總數， M 為每個UE分配到的RB數量。經由通道品質估測每個UE對於每個群集的頻率響應值，計算後置於矩陣 C 的列中。在此我們將頻率響應值作為群集通道增益來看，每個群集的通道增益值定義如式(2)。

$$C_{UK} = \frac{1}{M} \sum_{n=kM-M+1}^{kM} \|h_{un}\|, \forall k \in \{1 \dots K\} \text{ and } \forall u \in \{1 \dots U\} \quad (2)$$

其中， u 和 k 分別是各個UE的索引以及各個群集的索引，而 h_{un} 表示每個UE與各群集間子載波的頻率響應值，並將其值寫入矩陣中的對角元素。根據條件式(3)(4)(5)分配集群給UE

$$\sum_{u=1}^U S_{uk} = 1, \forall k \in \{1 \dots K\} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K S_{uk} = 1, \forall u \in \{1 \dots U\} \quad (4)$$

$$S_{uk} \in \{0,1\} \quad (5)$$

其中 S_{uk} 為以二進位表示一個群集已配置($S_{uk}=1$)給UE或未配置($S_{uk}=0$)。條件式(3)與(4)說明每個群集只能配置給一位UE且不允許重複配置，或每個UE只允

許配置一個群集且不允許重複配置。在多個 UE 情況下，為了最大化群集通道增益的總合，可根據式(6)與條件式(3)(4)(5)以確保每個 UE 可擁有良好的群集通道增益，來提升整體系統效能。

$$J_c = \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^K C_{uk} S_{uk} \quad (6)$$

其中 C_{uk} 可視為成本值(群集通道增益)矩陣 C 的元素， S_{uk} 是選擇矩陣 S 中的元素，選擇矩陣 S_H 為一個二進位變數，標明最終如何分配群集給每個 UE。每列上標識選擇元素為 1 時表示分配此群集給該 UE，而且須符合一個群集只可被分配給一個 UE，且不能重複分配的限制條件。上述提到的資源分配問題類似經濟學中常討論到的指派分配問題(assignment problem)，也就是最佳化資源分配的問題[10][13]，以降低成本。另外，在 2.2 節中將簡單說明常見的幾種資源分配演算法[11][12][13]。

2.2 常見的資源分配演算法

Maximum C/I

此種資源分配方式為通道品質較好的 UE 可以得到較多資源的分配機會。因為通道品質較好的 UE 頻率響應振幅的值會較高，固可以使用較高的調變等級，使得 UE 的 throughput 提高。相對的，在通道品質較差的 UE，頻率響應振幅的值也較差，所能得到的 throughput 也相對較低。為了增加系統容量，給予頻率響應振幅較好的 UE 較多的排程機會，也就是增加 RB 的配置給通道佳的 UE。其缺點是頻率響應振幅較差的 UE 得到排程的機率就變低，相對也造成 throughput 低，甚至可能因為通道品質太差而遲遲無法得到排程機會，導致餓死(starvation)的情形發生。

Round Robin

此種資源分配方式正好與 Maximum C/I 相對。無論 UE 通道品質好壞，每個 UE 均會輪流取得系統排程的機會，沒有優先順序(又稱循環排程)，不會有 UE 遲遲等不到資源的情形發生，可以避免餓死(starvation-free)的情形發生。循環排程是最公平的一種方式，雖然作法簡單，容易實現，但是整體系統容量可能會因 UE 的頻率響應振幅較差而有所限制。

Proportional fair

Proportional fair 的資源分配方法是一種介於 Maximum C/I 與 Round Robin 間的妥協方式，希望在相互競爭的利益之間取得平衡，讓所有 UE 均至少有一個服務的最低水平，在同一時間內，提升無線網路的系統 throughput。假設 $r_i(t, k)$ 表示在時間 t 使用第 k 個 subcarrier 瞬間可達到的速率， $R_i(t)$ 為第 i 個 UE 至該時間 t 接收資料 subcarriers 的平均速率，則 j 的值為下一個排程時間被選中的 UE 序號如公式(7):

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \frac{r_i(t, k)}{R_i(t)} \quad (7)$$

其中 N 為用戶總數， k 表示 subcarrier， $k \in [1, K]$ ， $R_i(t)$ 為第 i 個 UE subcarrier 的平均資料速率。這也是較公平的方式，由於 UE 會因為通道情況或系統容量調整服務的對象，將其瞬間速率與其一段時間 t 的平均值來指配，達到比例上的公平。

2.3 Quality of Service

在行動通訊系統中，透過通道估測計算頻率響應振幅大小來決定通道品質，從時間複雜度來看，是個不錯的選擇。但是計算頻率響應振幅大小來決定通道品質做為資源分配的依據，往往只對某些具有很高的群集通道增益 UE 有較好的傳輸容量(capacity)，並無法有效滿足所有 UE 在不同等級的網路服務需求下封包傳送時間限制(time constraint)的要求。

3GPP LTE 的主要優點之一，是提供嚴格的服務品質(QoS)保證。主要針對頻寬、時間延遲、以及保障位元速率(Guaranteed Bit Rate, GBR)提供服務的保證，例如：語音、圖像、視頻等多媒體服務是目前移動通信系統(UMTS)所面臨的主要服務挑戰。其中，為了保證移動通信系統中多媒體服務的服務品質保證，3GPP 在通用移動通信系統中明確定義端點到端點(end-to-end)之間不同等級的網路服務(QoS)以及相關參數細節，並於當中引入多種承載(bearer)及處理機制，為 UE 提供各種差異化的服務，如圖示 2-3 所示。

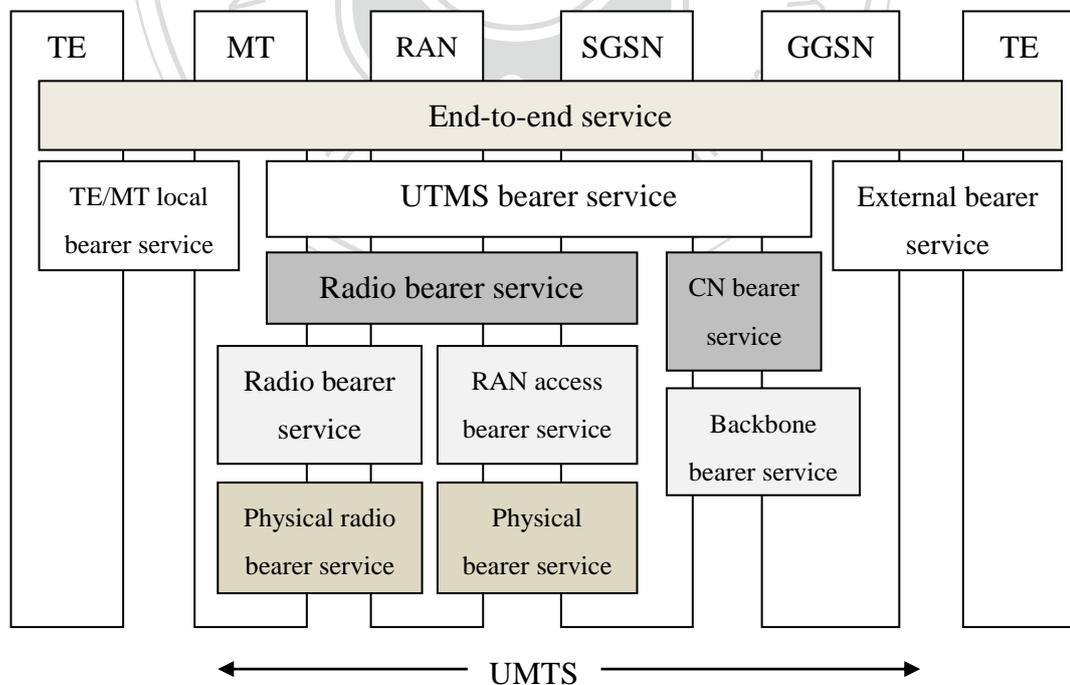


圖 2-3 R99 end-to-end QoS 架構[3]

2.3.1 標準 QCI 屬性

QoS Class Identifier (QCI)是演進封包系統(Evolved Packet System, EPS)承載重要的 QoS 參數之一。它是一個標示值，特性為衡量所提供服務資料流(Service Data Flow, SDF) QoS 的服務保證，每個 SDF 可用於 GBR 與 non-GBR 承載中。在一個 IP Connectivity Access Network (IP-CAN)中的多個 SDF，若具有相同的 QCI 和 ARP 值，可以視為一個單獨的服務集合來處理，這就是 SDF 集合。表 2-1 為 EPS 系統定義的標準 QCI 屬性，所有的 QCI 屬性均可由營運商根據實際需求預先配置在基站上，這些參數決定了無線承載資源的配置。上述標準 QCI 參數屬性描述了一個 SDF 集合與所對應的數據封包傳送處理的特性[3]：

- QoS Class Identifier (QCI)：用來決定承載級別的保障位元速率值(GBR)相關的網路資源能否被固定配置。GBR 的 SDF 集合需要動態的資源配置策略與計費流程控制。非保障位元速率(Non-guaranteed Bit Rate, Non-GBR)的 SDF 集合可以只透過靜態的資源配置策略與計費流程控制。
- Allocation Retention Priority (ARP)：用來分類相同 UE 與不同 UE 的 SDF 集合。每個 QCI 都與一個 ARP 優先權值相互關聯，優先權值為 1 者視為最高的優先權級別。依此類推，優先權值越大優先權級別越小。
- Packet Data Budget (PDB)：用於表示數據封包在 UE 和 Packet Data Network Gateway (PDN-GW)之間可能因為干擾因素而被延遲的時間。引入 PDB 參數的目的是支持 time domain 和鏈路層(Link layer)功能作為在未來資源配置上的參考。
- Packet Error Loss Rate (PELR)：定義為已經被發送到 Link layer 處理但未被接收成功傳送到上層服務資料單元(Service Data Unit, SDU)的比率。因此，PELR 參數實際上說明了在網路非擁塞情況下封包遺失率的上限。

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget	Packet loss rate	Example
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	conversational voice
2		4	150 ms	10^{-3}	conversational gaming (live streaming)
3		3	50 ms	10^{-3}	real time gaming
4		5	300 ms	10^{-6}	non-conversational gaming (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-3}	IMS signaling
6		6	300 ms	10^{-6}	gaming (buffered streaming) TCP-based (e.g., www, email, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	10^{-6}	voice, gaming (living streaming, interactive gaming)
8		8	300 ms	10^{-3}	gaming (buffered streaming) TCP-based
9		9	300 ms	10^{-6}	(e.g., www, email, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.)

表 2-1 LTE QCI 各項需求參數[5]

2.4 總結

最後，我們根據封包資源排程機制的相關研究中，選出與本研究較為相關的論文，整理成表 2-2，並針對其優缺點進行比較。

總結所參考的文獻，我們發現許多論文在進行封包資源分配時並沒有考慮不同資料的 QoS 需求，導致 GBR 與 non-GBR 資源分配不當的情況發生。此外必須考量到上行 SC-FDMA 在資源配置時須對資源塊(RB)連續進行分配的限制。所以，如何針對封包在 QoS 保證下對於 GBR 與 non-GBR 提出適當的 RB 資源分配機制，是我們要研究的議題。

排程機制	優點	缺點
O. Nwamadi [10]	固定資源配置、符合公平原則、透過匈牙利算法求得最佳解配置	計算時間複雜度過大，固定資源配置不符合實際服務需求，並且沒有考慮 QoS 的不同類別
F. Calabrese [11]	根據各個 UE 的 SNR 值做適當的 RBs 配置以及傳送功率的調整，讓 UE 能節省傳輸功率，降低封包的錯誤率(PELR)	沒有針對封包的 QoS 種類做 RB 分配
Lee [12]	透過比例公平演算法在 Maximum C/I 與 Round Robin 間達到妥協，降低餓死的情況發生	沒有針對封包的 QoS 種類做 RB 分配，時間複雜度過高，實際實作的可能不高
O. Nwamadi [13]	計算通道品質平均數，以決定優先順序，降低封包的錯誤率(PELR)	未考量 QoS 分類，不適用於多 UE 的 real time application

表 2-2 相關文獻所提方法優缺點比較

第三章 研究方法

3.1 問題分析

3.1.1 維持不同等級的網路服務品質(Quality of Service, QoS)保證

在 LTE 標準中規範出多種不同等級的 QoS，EPS 承載依資料型態可分為兩大類:保障位元速率(GBR)承載與非保障位元速率(Non-GBR)承載。雖然 LTE 規格中有制定各 QoS 類別的規範，但僅規定須滿足那些條件，實際的排程還是交給製造商設計。因為這些封包等級分類的規範，在設計排程演算法時可以將不同服務連線納入考量。如圖 3-1 所示，在傳輸資料的過程中，加入 layer 3 的 QoS 參數於排程器中並與無線管理資源(Radio Resource Management, RRM)間的各种協定相互作用並進行適當的排程，以符合實際網路服務需求。

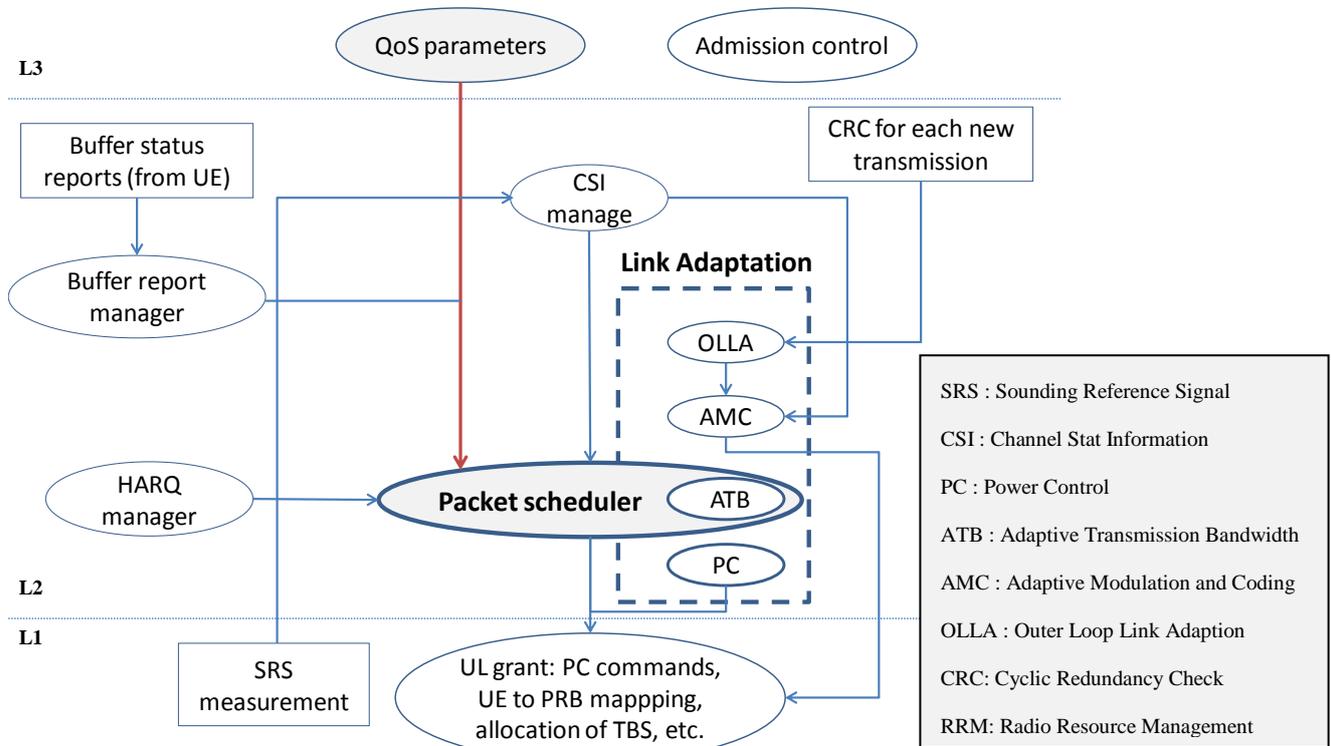


圖 3-1 排程與適應性連結在無線電資源管理間運作示意圖[11]

3.1.2 通道品質不佳的允入控制

在無線網路傳輸過程中，基地台傳輸資料前會測量通道品質，再根據通道品質的好壞決定不同等級的調變(modulation)。在上行 LTE 中在進入網路時會透過參考信號 SRS (Sounding Reference Signal)幫助基地台做排程的動作。基地台根據上傳的 SRS 量測通道品質好壞，再將這些測量值根據網路自適應技術(link adaption)配置不同的調變，當作排程的依據。一般排程的允入控制為了有效分配剩餘頻寬，僅考慮剩餘頻寬的分配，而沒有將通道品質一併納入考慮，造成封包在通道品質狀況不佳時傳送錯誤率提高，導致封包重傳次數增加，傳送時間延長，最終超出封包的限制時間變成無效封包而浪費頻寬資源。另一個考量是通道品質狀況，圖 3-2 說明 SINR 與 CQI 的對應關係。若 SINR 值愈高，用來表示通道品質指標(Channel Quality Indicator, CQI)的值也愈高，若 CQI 值愈高，可以使用較高的編碼速率進行調變傳送，亦即一個 RB 所能攜帶的資料量就會變多，相同大小的資料量可以用較少的時間傳送完成，如表 3-1 所示。因此在允入控制時檢查通道品質及是否允許通道品質差的連線進入。

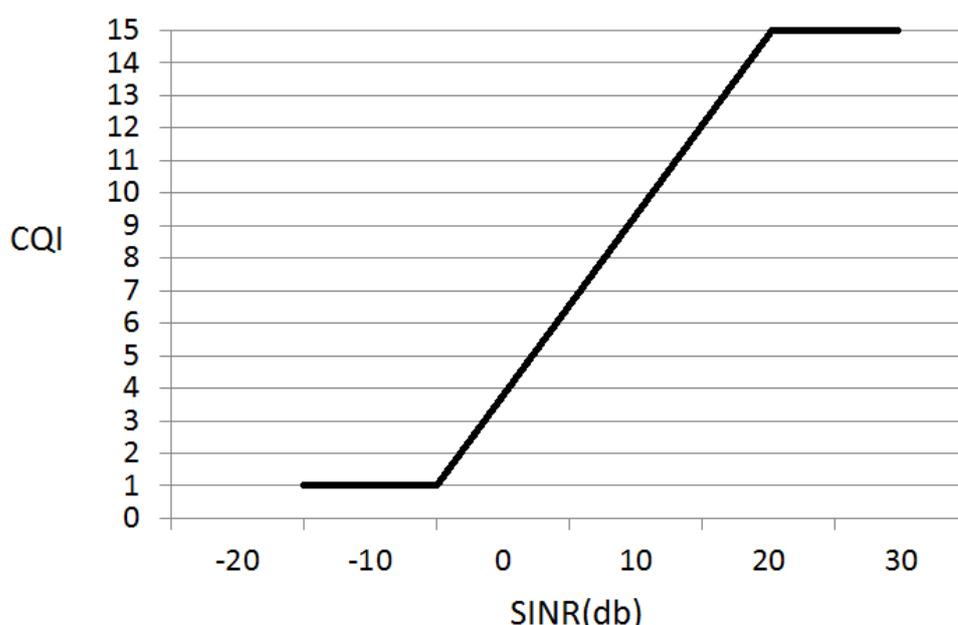


圖 3-2 SINR 與 CQI 對應示意圖[10]

CQI index	Modulation	Code rate × 1024	Efficiency (bit/RE)
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2		120	0.2344
3		193	0.3770
4		308	0.6061
5		449	0.8770
6		602	1.1758
7	16-QAM	378	1.4766
8		490	1.9141
9		616	2.4063
10	64-QAM	466	2.7305
11		567	3.3223
12		666	3.9023
13		772	4.5234
14		873	5.1152
15		948	5.5547

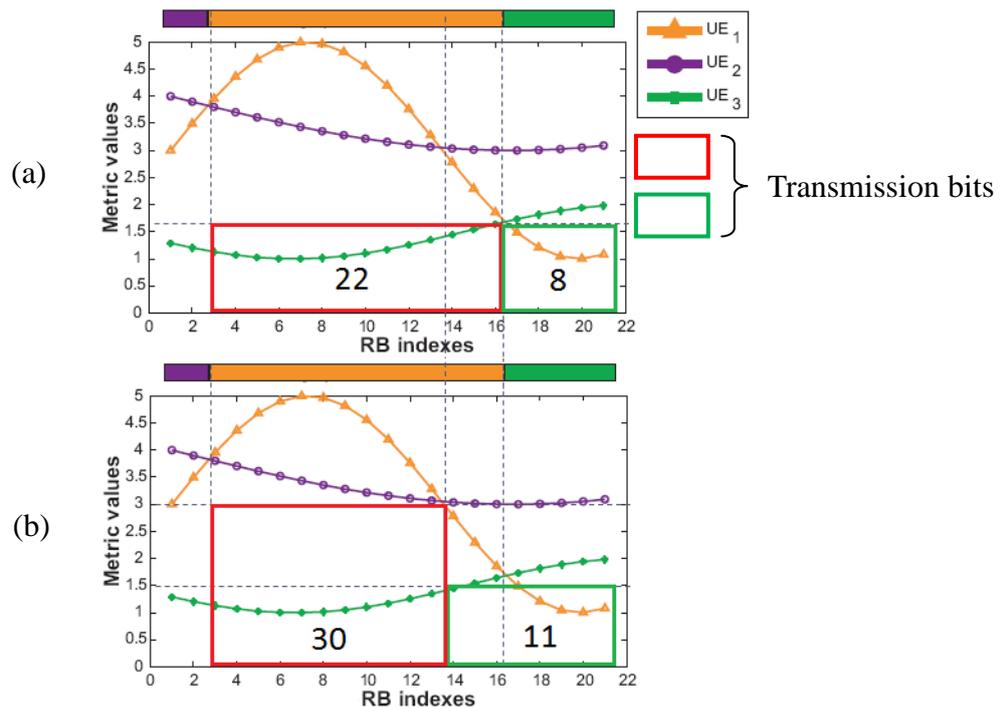
表 3-1 4-bit CQI 對照表[9]

3.1.3 SC-FDMA 的兩個限制條件

為提升系統效能與使用者多樣性增益(diversity gain)，在 LTE 下行通道排程中採用傳統的通道相依排程演算法(Channel Dependence Schedule, CDS)，蒐集所有使用者通道狀況的資訊，讓通道較佳的使用者能優先分配到資源塊(RB)來進行封包傳輸。然而與下行排程不同的是上行 SC-FDMA 中有兩大重要限制：第一個是 RB 在配置上有連續配置的規定，第二個是所配置的資源塊需使用相同的調變技術。由於這兩個限制使得傳統通道相依排程演算法並不適用於 LTE 上行系統。在我們的研究中，我們將考量此兩大限制，提出在 LTE 上行系統中資源分配方法，在降低 GBR 承載服務之時間延遲的同時，亦能提升整體系統效能。

3.1.4 動態配置的資源塊仍可能浪費頻寬

固定大小分配資源並無法有效適應不同等級的網路服務需求(QoS)。在文獻[10][13]的方法中，使用固定載波動態資源分配法，讓每個 UE 可以得到固定的載波資源，以避免局部 UE 偏袒，佔用過多資源，違反公平(fairness)原則。如此無論資料需求量大或小的 UE，所配置的資源均一樣，但可能造成部分資料量需求大的 UE 分配不到足夠資源，導致 UE 延遲時間過長，無法於時間內得到所需資源。目前已有許多研究[12][13]依據通道品質狀況適應性動態的調整資源的分配以提高頻寬使用率，但絕大多數研究並未對 QoS 等級中保障位元速率(GBR)承載與非保障位元速率(Non-GBR)承載兩大類型進行頻寬的有效分配。因此如何在 QoS 等級限制下選擇好的資源分配方式，並且何時需要加以調整，是我們要研究的議題。另一方面，圖 3-3(a)(b)說明 RB 配置的比例將影響傳送的 bit 總數。圖中 X 軸與 Y 軸分別表示 RB 索引及所能傳送的 bit 總數，曲線則表示不同 RB 會因通道品質好壞影響傳送 bit 數的多寡，矩形大小表示配置的 RB 數量傳送的 bit 總數。圖 3-3(a)說明 UE1 矩形中配置的 RB 總數較 UE2 多，但是因為 SC-FDMA 的兩個限制條件導致矩形所能傳送的 bit 總數被限制。所以在封包排程及連線准入控制時，依據圖中曲線的通道品質好壞適當地調整矩形配置的比例將可提升系統傳送的 bit 總數。如圖 3-3(b)，UE1 經調整後，雖然矩形變小，但因為整體通道品質優於圖 3-3(a)的 UE1，所以整體傳送的 bit 總數增加 8bits。圖 3-3(b)說明 UE2 經調整後，雖然整體通道品質並沒有明顯的改善，但是因為矩形範圍變大，也就是配置的 RB 總數增加，導致整體傳送的 bit 總數較圖 3-3(a)UE2 增加 3bits。因此如何適當調整矩形中的資源塊配置比例以增加整體系統效能，亦是我們要研究的一個議題。



(a)未調整配置比例所能傳送資料量(b)調整配置比例所能傳送資料量

圖 3-3 RB 配置的比例與傳送資料量變化圖

3.2 研究方法

MAC 層負責排程下行和上行 UE 之間 air interface 的資源。在 LTE 上行鏈路中，為了能有效分配無線資源，我們考慮到在 Time-Domain (TD) 和 Frequency-Domain (FD)間進行計算。在 TD 時根據不同的 QoS 特性區分 UE，在 FD 時依據通道品質決定優先權分配無線資源給 UE (RBs)。最後，進行資源分配的排程程序。其中，最小的配置資源單位為資源塊 Resource Block (RB)，如圖 3-4 所示。

在 BS 排程方面，分為上行(Uplink)及下行(Downlink)兩種狀況。在上行方向，僅能以 UE 為單位進行排程，因此 BS 端必須考量 UE 通道所需要的資源塊進行加總，決定 UE 可以分配到的資源塊總數。另外，由於在 eNodeB 底下可能有多個 UE 進行資源塊的競爭，因此在排程時也必須將不同 UE 間通道的優先順序納入考量。

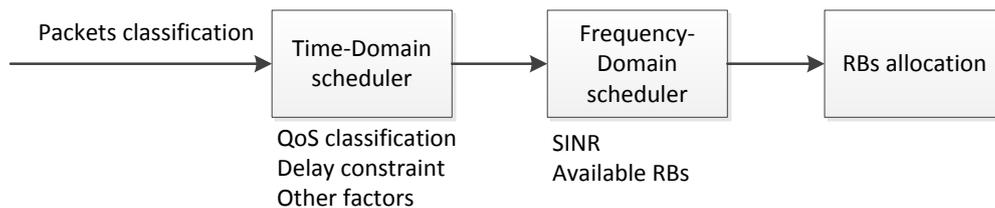


圖 3-4 LTE MAC 層排程架構圖

3.2.1 MAC Priority Classification (TD) Scheduler

為簡化 LTE MAC 層的排程，我們主要考慮兩個 QoS 類型承載：保證位元速率(GBR)承載和非保證位元速率(Non-GBR)承載。基於 QoS 等級標識(QCI)，將各個 UE 傳入的封包進行分類後，將 GBR 承載以及 non-GBR 承載依照 QCI 等級分成九種不同的佇列，依表 3-2 優先權順序分別進入不同的分類佇列(queue)中等待。我們針對 MAC 層的排程嚴格執行優先權排程，即所有 GBR 承載依優先權優先分配資源塊，接著安排 non-GBR 承載。

Resource type	Service type (QCI)	Priority
GBR	1	2
	2	4
	3	3
	4	5
Non-GBR	5	1
	6	6
	7	7
	8	8
	9	9

表 3-2 QCI 與 MAC QoS 優先權對照表[4]

3.2.2 GBR 承載封包 QoS-Constrained (TD) Scheduler

在進行封包資料傳送時，對於 GBR 承載的封包傳送須要考慮時效性要求。若是封包來的太慢會造成過度延遲等待，若是封包沒有在限制的延遲時間內傳送到目的端將會被視為無效封包。為避免封包超過時間限制遭丟棄我們也將給予該類別封包較高的優先權，在未來計算所需的資源塊(RB)時，可以優先進行配置，滿足延遲時間的限制。我們以一個 UE 所要求服務的資源類型作為單位時間需要資源塊的計算，如公式(8)。

首先我們先定義參數如下：

q_i : 系統中所有佇列種類，其中 $1 \leq i \leq 9$ ，分別表示九種不同 QCI 類別的佇列。

$Q_i(u)$: 前一個單位時間，UE u 在佇列 q_i 中尚未傳送完成的剩餘封包數。

$n_{q_i}(u, j)$: 單位時間 j 時，UE u 在佇列 q_i 要傳送的封包數。

L : 封包的資料長度(bits)。

d : 封包的延遲時間(packet delay budget)。

N_{RE} : 一個 RB 內的 Resource Element (RE)個數。

$mc_{level}(u, j)$: 單位時間 j 時，UE u 配置的 RB 中一個 RE 根據調變等級所能傳送的資料量(bits)。

N : UE 總數。

接著我們定義 UE u 在時間 j 時所需的 RB 數量(RBs/ms)，如公式(8)。

$$N_{RB}(u, j) = \left\lceil \frac{(Q_i(u) + n_{q_i}(u, j)) \times L}{d \times N_{RE} \times mc_{level}(u, j)} \right\rceil, \quad u = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

3.2.3 Non-GBR 承載封包 QoS-Constrained (TD) Scheduler

相較於 GBR 承載的封包傳送，給予 non-GBR 承載封包高優先權的意義並不大。因為這些 non-GBR 承載的封包著重在是否成功送達目的地，對於 delay time 的要求並不高，所以在進行排程時因為重要性較低，能夠獲得的 RB 數相對也比較不固定。但為了固定 RB 的分配，我們使用最大位元速率(Maximum Bite Rate, MBR)盡可能讓 UE 獲得一定的 RB 資源，若無法獲得一定資源時，只要能找到好的通道環境資源就給予配置，才不至於讓人感覺斷線或是得不到服務的情形發生。

我們根據 non-GBR 承載封包所需要的最大位元速率，定義出我們每個時間單位所需要傳送的最大資料量，如公式(9)。

$R_{max}(u)$: UE u 最大保留速率(bit per second)，其中 1sec = 1000 TTI。

N_{RE} : 一個資源塊(RB)所包含的 Resource Element (RE)個數。

$mc_{level}(u, j)$: 單位時間 j 時，UE u 配置的資源塊(RB)中一個 RE 根據調變等級所能傳送的資料量(bits)。

最後我們定義 UE u 在時間 j 時所需的資源塊(RB)數量(RBs/mS)，如公式(9)。

$$N_{RB}(u, j) = \left\lceil \frac{R_{max}(u)}{1000} \times \frac{1}{N_{RE} \times mc_{level}(u, j)} \right\rceil \quad (9)$$

3.2.4 允入控制連線控制(FD Scheduler)

原本在 LTE 封包傳送時，若有足夠的系統頻寬資源，即資源塊(RB)，是可以無限制允許連線的。但實際上，系統的 RB 是有限制的，因此我們在允許連線的同時，必須限制總需求的 RB 數量在總系統 RB 數量之下才算合理。而在有限的系統 RB 下，有效安排 RB 的配置是一個重要的課題。

因此，每當 BS 在安排增加各個連線的同時，我們必須先判斷剩餘頻寬的 RB 數是否足以配置給所需 RB 數，若不足則不給予連線進入。

我們根據表 1-1 將總頻寬轉換為 RB 總數，以方便未來分配 RB 配置時的比較。假設 $RB_{available}(j)$ 為單位時間 j 頻寬資源轉換的 RB 總數， $N_{RB}(u, j)$ 為 UE u 在單位時間 j 所需的 RB 總數， $RB_{total}(j)$ 為 RB 總數扣除所有 UE 所需的 RB 總數後的可用 RB 數。當有新的 UE 要求允許進入時只要當 $RB_{available}(j)$ 扣除請求允入的 UE 所需的 RB 數量後大於零時，則允許新的連線要求進入排程，否則拒絕進入。

$$RB_{available}(j) = RB_{total}(j) - \sum_{u=1}^N N_{RB}(u, j) \quad (10)$$

3.2.5 優先權允入控制 (FD Scheduler)

在 LTE 中，當 UE 對 BS 發出頻寬請求時，基地台除了先判斷連線的 QoS 等級及系統頻寬外，亦須考慮 UE 間的通道品質來決定調變等級。我們擬在 FD Scheduler 的 QoS 分類中選擇調變等級較佳的 UE 優先允許進行資源的排程。由於傳統允入控制是計算是否還有頻寬可以使用，若有，則允許新的連線，否則拒絕。在加入選擇較高調變等級進行連線的條件後，可以在分配相同 RB 資源下，傳送更多的資料量，使得頻寬資源的運用更為彈性靈活。

我們先計算各 QoS 等級系統剩餘頻寬 RB 數，當要求連線進入時，再加入一個調變等級的篩選，依照 QoS 分類中挑選擁有較高速調變者進行優先篩選，也就是換算後在單位時間 j 時平均 CQI 最高者，如公式(11)給予較高的優先權。我們再依據表 3-1 的 4-bit CQI 對照表決定對應的調變級數，搭配先前(TD) Scheduler 的計算決定單位時間的 RB 數量，使得在分配同樣的 RB 資源時可以發

揮更好的效率。

假定有 N 位使用者對 RB 資源進行優先權排程，如公式(11)所示：

$$q_{i_{avail_user}} = \{1, 2, 3, \dots, N\}$$

$$N^* = \arg \max_{j \in q_{i_{avail_user}}} \text{avg. CQI}_j$$

(11)

其中， N^* 為 $q_{i_{avail_user}}$ 集合中，平均 CQI 值最高的使用者，優先進行允入計算。以下為優先權允入控制的虛擬碼：

Algorithm 1 CAC-RB subroutine

```
1: procedure CAC-RB
2:    $RB_{available}$ : available RB (Resource Block)
3:    $PRB_{qi}$ : preserved RB (Bandwidth) of QCI  $i$  service type,  $i=1, 2, \dots, 9$ 
4:   Modulation class set = {QPSK, 16QAM}
5:   while a link requests RB
6:
7:     case GBR
8:       user priority calculation according to QCI service type
9:       check links and calculate RB requires according to QoS constraint
10:      user priority calculation according to avg. CQI
11:      if  $RB_{available}$  is larger than or equal to  $RB_{need}$ 
12:        if link uses base modulation
13:          accept this link request
14:        else
15:          reject this link request
16:      end case
17:
18:     case Non-GBR
19:       user priority calculation according to QCI service type
20:       check links and calculate RB required
21:       user priority calculation according to avg. CQI
22:       if  $RB_{available}$  is larger than or equal to  $RB_{need}$ 
23:         if link uses base modulation
```

```

24:          accept this link request
25:          else
26:          reject this link request
27:          end case
28:    end while
29: end procedure

```

3.2.6 適應性連續資源塊限制(RBs allocation)

不同於下行資源分配，在上行資源分配中，因為 RB 在配置上是否滿足連續配置的規定以及所配置的 RB 是否使用相同的調變技術是我們無法控制的。所以我們利用連續完整 RB 進行配置，避免無法配置完整 RB，導致等待時間過長，造成封包的丟棄。然而為求完整的連續性配置而降低調變，有可能造成整體傳輸的效能降低，亦即一個 RB 所能攜帶的資料量就會變少，相同大小的資料量需要耗費更多的時間來完成傳送，造成最後系統效能不增反減的情形。因此有限度的降低調變，在未來整體效能結算時是否成長，成了關鍵的考量因素，為求完整的連續性配置，將公式(8)(9)改寫加入降低調變的變數 i ，經改寫後如公式(12)(13)。

q_i : 系統中所有佇列種類，其中 $1 \leq i \leq 9$ ，分別表示九種不同 QCI 類別的佇列。
 $Q_i(u)$: 前一個單位時間，UE u 在佇列 q_i 中尚未傳送完成的剩餘封包數。
 $n_{q_i}(u, j)$: 單位時間 j 時，UE u 在佇列 q_i 要傳送的封包數。
 L : 封包的資料長度(bits)。
 d : 封包的延遲時間(packet delay budget)。
 N_{RE} : 一個 RB 內的 Resource Element (RE) 個數。
 $mc_{level}(u, j)$: 單位時間 j 時，UE u 配置的 RB 中一個 RE 根據編碼等級所能傳送的資料量(bits)。
 N : UE 總數。
 $R_{max}(u)$: UE u 最大保留速率(bit per second)，其中 $1\text{sec} = 1000 \text{ TTI}$ 。

GBR:

$$N_{RB}(u, j) = \left\lceil \frac{(Q_i(u) + n_{q_i}(u, j)) \times L}{d \times N_{RE} \times mc_{level-i}(u, j)} \right\rceil, \quad u = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

Non-GBR:

$$N_{RB}(u, j) = \left\lceil \frac{R_{max}(u)}{1000} \times \frac{1}{N_{RE} \times mc_{level-i}(u, j)} \right\rceil \quad (13)$$

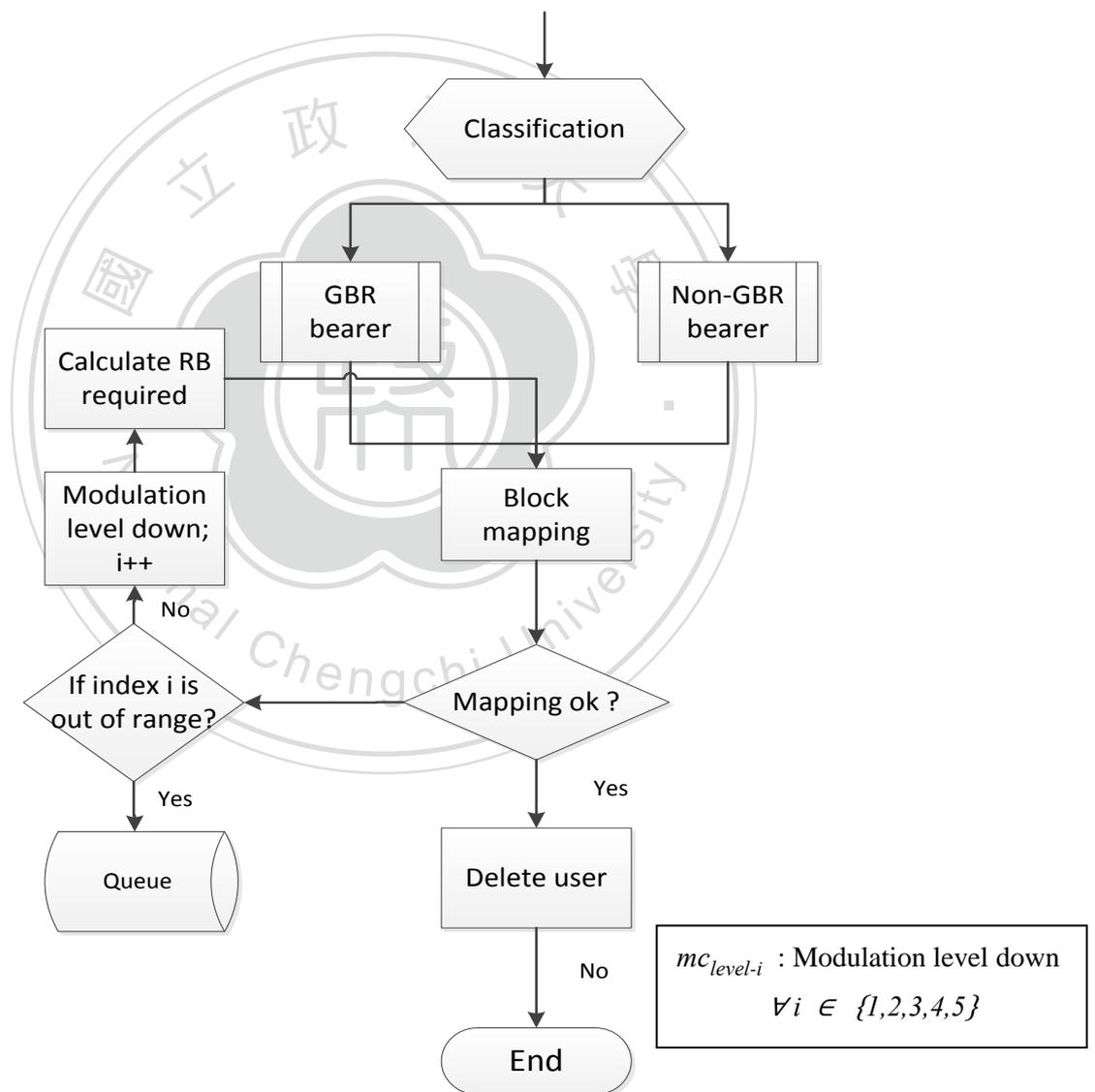


圖 3-5 RBs allocation 演算法

3.2.7 系統分析

此節我們針對 RBs allocation 演算法的效能進行分析。我們發現在 SC-FDMA 中連續性配置以及配置區塊需使用相同調變技術的兩大重要限制下，我們提出的 RBs allocation 中為求完整的連續性配置而降低調變，有可能造成整體傳送效能降低的情況發生，此節重點將分析討論此類問題。

假設我們有一個資料流的需求是 5 個 RBs 方能傳送完成。在使用表 3-3 的 Lv5 (16QAM-4/5)作為調變時，一個 symbol 需要 4 個位元來傳送，所以 2 的 4 次方為 16。透過 4/5 的編碼速率計算避免載波間傳送的干擾，降低錯誤率發生，每個 RE 能傳送 $4 \times \left(\frac{4}{5}\right) = 3.2$ bit。當降低調變至 Lv4 (16QAM-3/4)每個 RE 能傳送 $4 \times \left(\frac{3}{4}\right) = 3$ bit。計算 5 個 RBs 降低調變後增加後的 RB 數量 $\left(\frac{3.2}{3}\right) \times 5 = [5.33] = 6$ 。因此 5 個 RB 即能傳送的資料需增加到至 6 個 RB 才能傳送完成，依序降低調變整理成表 3-4。

Lv5	Lv4	Lv3	Lv2	Lv1
16QAM-4/5	16QAM-3/4	16QAM-2/3	16QAM-1/2	QPSK-4/5
3.2 bit	3 bit	2.6 bit	2 bit	1.4 bit

表 3-3 調變等級對應表[2]

	Lv5	Lv4	Lv3	Lv2	Lv1
RBs	5	6	6	8	10

表 3-4 降低調變後不同 Level 的 RB 數量(假設 Lv5 的 RB 數量為 5)

接者我們計算降低調變後能傳送的 bit 數：

若用 5 個 RBs 在 Lv5 的調變可以傳送 $5(\text{RB}) \times 84(\text{REs}) \times 3.2(\text{bit}) = 1344$ bits，

依序將所有降低調變後能傳送的 bit 數整理成表 3-5。

	Lv5	Lv4	Lv3	Lv2	Lv1
RBs	5	6	6	8	10
Bits	1344	1512	1344	1344	1344

表 3-5 降低調變後不同 Level 能傳送的 bit 數

最後我們在計算調降調變後損失的 bit 數:

以下圖 3-6 解釋調降調變後損失的 bit 數，若將原本傳送 5 個 RBs 降低調變降至 L4 時須增至 6RBs 傳送，每個 RB 變為傳送 $1(\text{RB}) \times 84(\text{REs}) \times 3(\text{bit}) = 224 \text{ bits}$ ，也就是每個 RB 降低調變後將損失 $268 - 224 = 16 \text{ bits}$ 。以降至 Lv4 調變增加到 6 個 RBs 來計算 Lv5 調變時所能傳送的 bit 數並進行比較，整體上少傳送了 $16 \times 6 = 96 \text{ bits}$ ，經整理後表 3-6 表示降低調變後損失的 bit 數。

268	268	268	268	268	268
224	224	224	224	224	224

圖 3-6 降低調變後損失的 bit 數示意圖

	Lv5	Lv4	Lv3	Lv2	Lv1
Lost bits	0	96	264	800	1340

表 3-6 降低調變後損失的 bit 數

經過上面的分析我們知道在 SC-FDMA 兩大限制下尋找適當的 RB 進行分配時，若以降低調變增加的 RB 數計算降低調變前後所能傳送的 bit 數，降低的調變程度越多，損失的 bit 數就愈多。最終我們決定在加入 QoS 限制考量後，對於時效性有嚴格限制的 GBR 封包資源，允許適當的降低調變以尋找連續的 RB 進行分配，優先給予 GBR 承載服務較高的優先權，適時調整資源塊的分配以減少

頻寬資源的浪費。

相較於 non-GBR 承載的網路服務，如一般的網頁瀏覽、收發 e-mail 的應用佔了絕大部分，又由於這類型的封包有較低的延遲時間限制，我們一律將這類型的封包降低調變次數設為固定的。在不增加複雜度情況下進行 RB 分配，透過調整這類型的封包需求來平衡每個基地台傳輸的需求，並在我們假設的環境下進行模擬驗證並找出 non-GBR 最適當的降低調變限度，在未來整體效能結算時，降低對整體效能的影響。

3.2.8 排程演算法架構及流程

我們的排程機制考量在一個基地台對多個 UE 產生不同等級的網路服務要求。整個架構分為三個部分，第一個部分 TD Scheduler，針對 QoS 保證下資源進行保障位元速率(GBR)承載以及非保障位元(Non-GBR)承載進行分類；第二個部分 FD Scheduler，優先允許調變等級高的連線，增加傳輸速率；第三部分為針對 QoS 保證設計 RBs 的排程機制，目的是在滿足不同的網路服務要求下，能夠充分利用頻寬資源。以下我們將對系統程序以及流程圖進行說明：

Step1: TD Scheduler

先對 QoS 保證下資源進行保障位元速率(GBR)承載以及非保障位元(Non-GBR)承載進行分類，並針對 GBR 與 non-GBR 承載間不同等級的 QoS 服務要求計算單位時間所需的 RB 數量。如圖 3-7 所示。

Step2: FD Scheduler

盡可能優先選取傳輸距離短，調變等級高的連線。因為短距離、調變等級高的連線將有助於提高資料傳輸速度。相對地對於距離較遠，或是調變等級較低的連線，則給予較低的優先權。接著我們會檢查通道條件並搭配第一部分公式計算所需的最低資源，若能達到 RB 資源最低限度的要求，則選擇進入連線，如圖 3-7 所示。

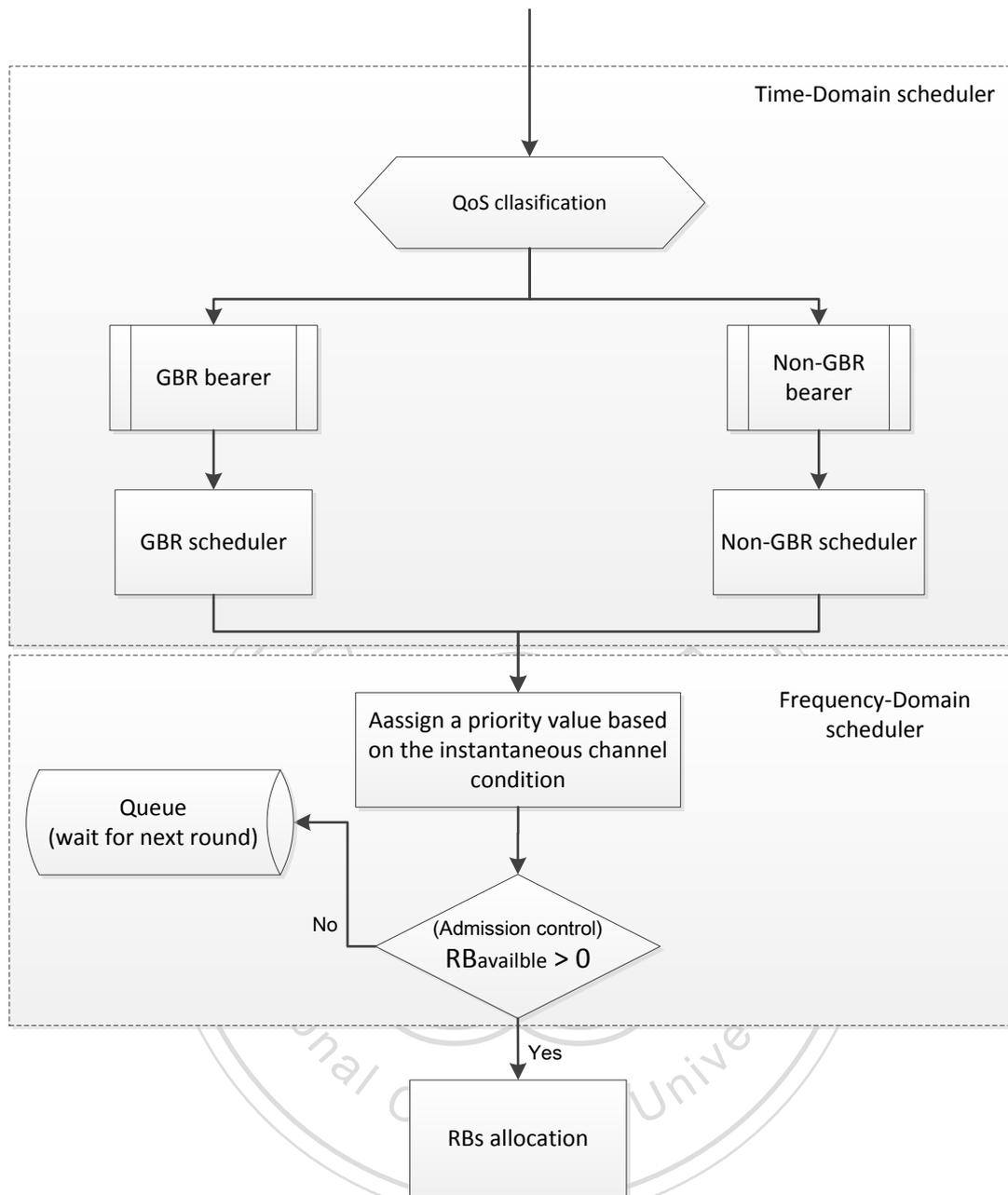


圖 3-7 TD 與 FD scheduler 流程圖

Step3: RBs Allocation

基於 3.1 節所提出的議題，我們擬依照表 3-1 的資料，對於不同等級的網路服務分成保障位元速率(GBR)承載與非保障位元速率(Non-GBR)承載個別討論。並根據 3.2.7 系統分析決定最終演算法，其主要目的是希望能達到 QoS 下 GBR 承載封包的限制要求，並透過允入控制機制找出最佳的通道環境，決定適當的調變，降低 RB 配置的數量。其中，兩個類別的步驟流程如下：

- **保障位元速率(GBR)承載**

- (1) 分配原則為尋找目前資源中最佳通道品質指標(Max CQI)附近的連續區塊予以配置。
- (2) 檢查 RB 在配置上是否滿足連續配置的規定以及滿足所配置的 RB 是否使用相同的調變技術，若滿足此兩個條件，則予以配置，完成後跳至步驟(6)，否則執行步驟(3)。
- (3) 檢查調變值是否降低至最低調變，若是則跳至步驟(5)，否則挑至步驟(4)。
- (4) 降低一個級別的調變，並重新查找降調變後相對應的通道品質指標(CQI)，重新計算所需的資源塊(RB)數，完成後回至步驟(1)尋找可配置的通道重新分配。
- (5) 將此 GBR UE 請求放入一個佇列中，並於下次分配時依佇列順序大到小進行優先權分配。
- (6) 刪除配置後的 GBR traffic。

- **非保障位元速率(Non-GBR)承載**

- (7) 針對所有 non-GBR UE 請求依據不同等級的網路服務等級指標(QCI)中的分配保留優先權(Allocation Retention Priority, ARP)大小排序。
- (8) 挑出擁有最大優先權的 UE 優先進行分配。
- (9) 分配原則為尋找剩餘資源中最佳通道品質指標(Max CQI)附近的連續區塊予以配置(此時可以直接配置，不須滿足 $N_{RB}(u, j)$ 才給予配置)。
- (10) 檢查配置的 RB 數是否等於所需的 $N_{RB}(u, j)$ 。若是則執行步驟(13)，否則將此 non-GBR UE request 放入一個佇列中，並於下次分配時依佇列順序大到小進行優先權分配。
- (11) 刪除配置後的 non-GBR traffic。
- (12) 完成資源分配。

以上的方式，步驟(1)至(6)為保障位元速率(GBR)承載，而步驟(7)至(11)為非

保障位元速率(non-GNR)承載。其中在第一部分時已經計算所需要的 $N_{RB}(u, j)$ 數量以滿足不同等級之網路服務(QoS)最低限度要求。而在接下來的步驟(2)(3)(4)即是依據通道條件的變化適當降低調變的處理機制，以尋求較佳的資源配置。因此，將有效增加 UE 尋求連續相同編碼 RB 的需求；倘若尋找不到連續的 RB 數予以配置，此時將該 GBR traffic 放置預先準備的佇列中等待，並於下次分配時給予最高的優先權，以滿足 QoS 等級中對於時間延遲的限制。

我們於模擬實驗與數據分析發現步驟(3)中若將調變降低至一定等級時，往往能擁有最大的傳輸速率，在適當配置 RB 的同時亦能增加系統的吞吐量(throughput)。我們也將在實驗中說明可能因為降低調變，造成該 UE 所需的 RB 數量增加的情形發生。

依上述程序畫成完整的流程圖，即如圖3-8所示。圖中的block mapping為尋找最佳分配的副程式，目的為找尋目前資源中最佳通道品質指標附近的連續區塊予以配置。圖中的normal mapping為針對non-GBR承載資源進行分配，因為沒有QoS的delay constraint的嚴格要求，所以只要找到好的通道環境時就馬上給予分配，降低頻寬浪費的情況發生，並將未完成的服務放入non-GBR的佇列中等待下次分配。

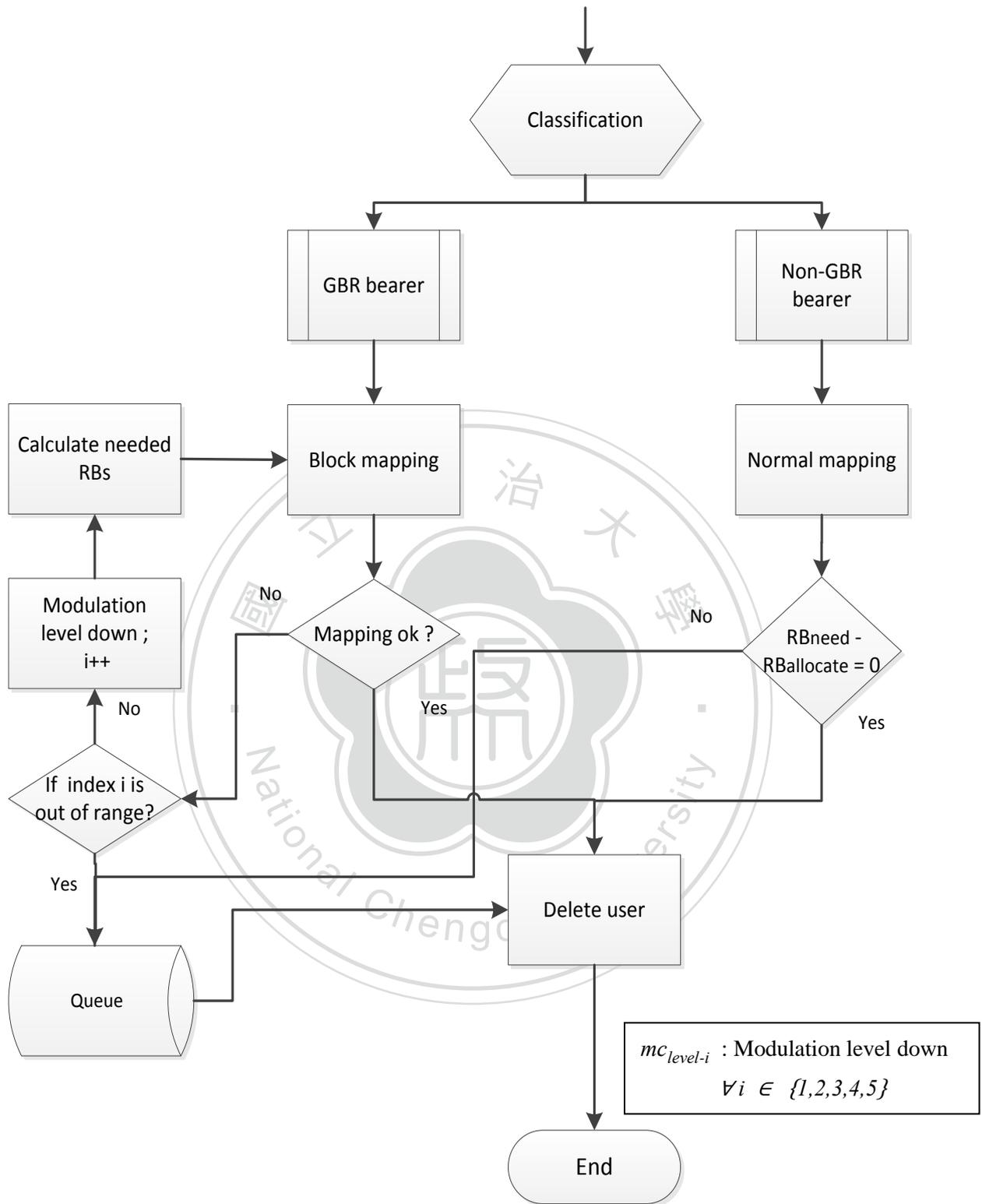


圖 3-8 RBs allocation 最終演算法

Block mapping scheduling

```
1: procedure Block mapping:
2:   Initialize channel index counter to 1
3:   Initialize RB counter to zero
4:   for each UE
5:     while the channel index counter is not equal to the total channel
6:       if channel condition is larger than avg.COI
7:         add one to the RB counter
8:       else
9:         set the RB counter to zero
10:      end if
11:
12:      if RB counter is equal to the RB required
13:        do RBs allocation to user
14:      end do
15:      break
16:    end if
17:    add one to channel index counter
18:  end while
19: end for
20: end procedure
```



Normal mapping scheduling

```
1: procedure Normal mapping :
2:   Initialize channel index counter to 1
3:   Initialize RB counter to zero
4:   Initialize RB temp_counter to zero
5:   Initialize RB max_counter to zero
6:   for each classified UE
7:     while the channel index counter is not equal to the total channel
8:       if channel condition is larger than avg.COI
9:         add one to the RB counter
10:        add RB counter to the RB_temp counter
11:      else
12:        set RB counter to zero
13:      end if
14:      if RB max_counter is less than RB_temp counter
15:        set the RB_temp counter to RB max_counter
16:      end if
17:      if RB max_counter is equal to the RB required
18:        do RBs allocations
19:          set RB max_counter to zero
20:        end do
21:        break
22:      endif
23:      add one to channel index counter
24:    end while
25:    if RB max_counter is larger than zero
26:      do RBs allocations
27:    end do
28:    end if
29:  end for
30: end procedure
```

第四章 模擬實驗與數據分析

4.1 實驗設計與假設

模擬實驗是使用 Network Simulator 3.13 模擬器進行模擬，參考 ns3-vns-3.13 documentation [16]以及 Lena Project [17]並以 C++語言修改此模組。我們加入第三章所敘述的三個改進部份並撰寫環境腳本，進行 3GPP LTE 的網路傳輸實驗，模擬程序依據圖 3-4 流程做模擬，表 4-1 為模擬的參數環境。

為了確保在 LTE MAC 層中不同等級的網路服務(QoS)保證，我們在模擬劇本中設定 UE 三種不同的 QoS 服務，分別為 VoIP, real time gaming, buffered streaming 三種。我們分別為這三種不同的網路服務在 QoS 限制下區分為 GBR 及 non-GBR 兩種服務，並針對時間延遲(time delay)的限制考量，依據我們提出的演算法進行資源分配。模擬劇本著重在不同等級的網路服務負載下，對照文獻固定載波動態的分配機制[14]與適應性動態資源分配機制[11]，觀察資源分配對於 throughput 及封包時間延遲的影響。另外，在 3.2.3 節中我們提到降低頻寬浪費的機制，針對上行資源分配的兩大限制，我們討論降低調變以尋求完整資源塊的取捨條件。在模擬過程中，我們也將以實驗數據說明「降低調變的機制」需要加以限制，才能獲得最佳整體效能。

4.1.1 實驗環境

Parameter	Setting
Cellular layout	single-cell with omnidirectional antenna
Radius	1500 meters
System bandwidth	5 MHz
Carrier frequency	2 GHz
Number of resource blocks	25
Transmission time interval (TTI)	1 ms
Scenario	pedestrian, typical urban
Modulation and coding rate setting	QPSK [1/8, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5] 16-QAM [1/2, 2/3, 3/4, 4/5]
Number of UEs	25
Location of UE	Random
UE speed	30 km/h
Frequency reuse factor	1
HARQ process	OFF
Simulation time	1000 TTIs

表 4-1 模擬環境參數

Traffic	QCI No.	Priority	Type	GBR (Kbps)	R_{max} (Kbps)	Packet delay budget (ms)
VoIP	1	2	GBR	12.2 Kbps	—	100ms
real time gaming	3	3	GBR	64 Kbps	—	50ms
buffered streaming	6	6	Non-GBR	—	1024 Kbps	—

表 4-2 QoS 要求的各項參數。

表 4-1 為模擬劇本所需要的相關環境參數，表 4-2 為根據 QoS 要求所需的各項參數。QoS 要求 VoIP traffic 及 real time gaming traffic 各需 12.2 Kbps 及 64 Kbps 的最小保證速率。Non-GBR 則無此要求，因此 non-GBR 將盡可能利用剩餘頻寬。

在我們佈建的環境中，我們擬將 VoIP 與 gaming 一律保證高於最小保證速率的配置，重點評估在符合 QoS 的環境下，根據所提出的排程機制，觀察 GBR 承載中的延遲時間及封包遺失情況。

4.1.2 評估指標

評估指標以 QoS 中所要求的 delay constraint, throughput, packet loss rate 及 RBs utilization 為主，其中 delay 與 throughput 為平均值。

首先我們先定義使用的參數：

Packet enter time: 封包進入佇列等待傳送的時間。

Packet arrival time: 封包傳送成功到達的時間。

No. of packets: 實際接收到的封包數。

No. of sent packets: 預期送出的封包數。

Payload size: 封包的長度。

Unit time: 測量時間。

RB_{used} : 所有使用過的 RBs。

RB_{total} : 所有可以使用的 RBs。

Throughput 的定義為單位時間內實際接收到的封包數量，如公式(14)。封包遺失率(Packet Loss Rate, PLR)則為單位時間內超過 packet delay budget 的封包丟棄數比值，如公式(15)。Packet delay 的定義為封包進入佇列等待的時間直到封包到達 eNodeB 的時間，如公式(16)。我們的目標在維持 GBR 承載封包不可以超過延遲限制的前提下，有效動態的配置，降低封包遺失率，並動態配置剩餘頻寬，使得 non-GBR 承載也可以有機會獲取頻寬配置，有效利用頻寬。最後計算資源利用率(RBs utilization)表示使用有效 RBs 作為傳輸資料的平均比例，如公式(17)。

$$\text{throughput} = \frac{\text{no. of packets} \times \text{payload size}}{\text{unit time}} \quad (\text{bits/unit time}) \quad (14)$$

$$\text{PLR} = \left(1 - \frac{\text{no. of packets}}{\text{no. of sent packets}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

$$\text{packet delay} = \text{packet arrival time} - \text{packet enter time (ms)} \quad (16)$$

$$\text{RB}_{\text{utilization}} = \frac{\text{RB}_{\text{used}}}{\text{RB}_{\text{total}}} \quad (17)$$

4.2 實驗數據與分析

我們的實驗共分為兩個部分，在實驗一中我們討論在充分利用 RB 資源情況下，根據整體 throughput 好壞決定降低調變次數的最低限制；實驗二中，透過實驗一的結果，觀察在不同的 traffic 比例的情況下不同型態的 VoIP, gaming 及 buffered streaming 的 throughput、packet delay 以及 packet loss ratio 的變化。

實驗一：

在 3.2.7 節中我們討論降低調變以尋求完整資源塊的取舍條件。我們將表 4-3 中不同比例的 traffic 參數加入實驗。圖 4-1 中 X 與 Y 軸分別代表整體系統 throughput 及降低調變的次數。我們觀察到有限的降低調變次數，throughput 會高於沒有降低調變的情況，因為降低調變次數後使得尋找連續區塊進行配置更為容易。圖 4-2 中 X 與 Y 軸分別代表 RBs 使用的情形及降低調變的次數，我們觀察到降低調變可能造成 RB 使用需求的增加，但在未超出能配置之 RB 資源總數的前提下，彈性分配 RB 資源，能使得整體系統 throughput 提升。實驗發現，若在比例 1:1:3 及 1:2:2 時，因為 non-GBR 承載 UE 較多，此時將降低調變限制到二次時，常出現最佳效能。在比例 1:3:1、2:2:1、3:1:1 時，因為 non-GBR 承載的

UE 較少，在未超過 RB 總數的情況下，降低調變能使 RB 資源更彈性分配給 UE，此時降低調變的限制到四次時能獲得最大效能。因此，圖 4-1,4-2 說明了在 uplink 傳輸要求連續性 RB 資源配置，以及配置資源調變需相同的限制下，「降低調變機制」若能加以限制，較能獲得最佳整體效能。

Parameters	Value
Number of UEs	25
UEs Ratios (VoIP: gaming: buffered)	1:1:3, 1:2:2, 1:3:1, 2:2:1, 3:1:1

表 4-3 Traffic ratio

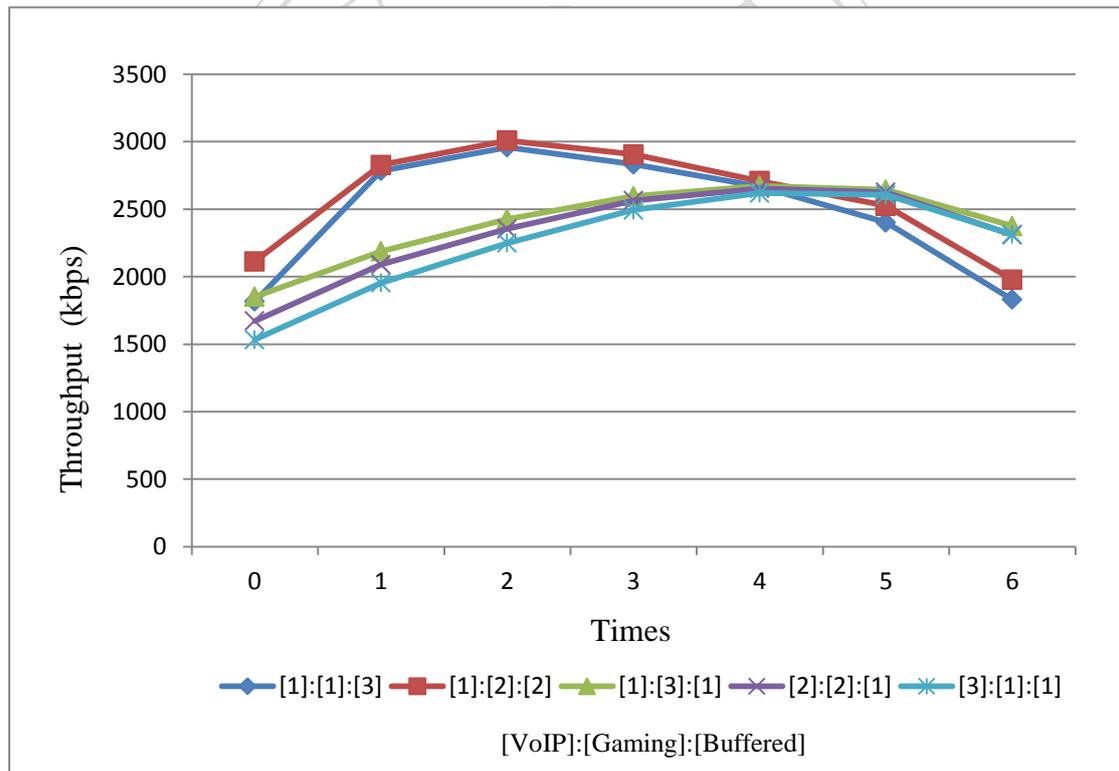


圖 4-1 降低調變次數 throughput 變化圖

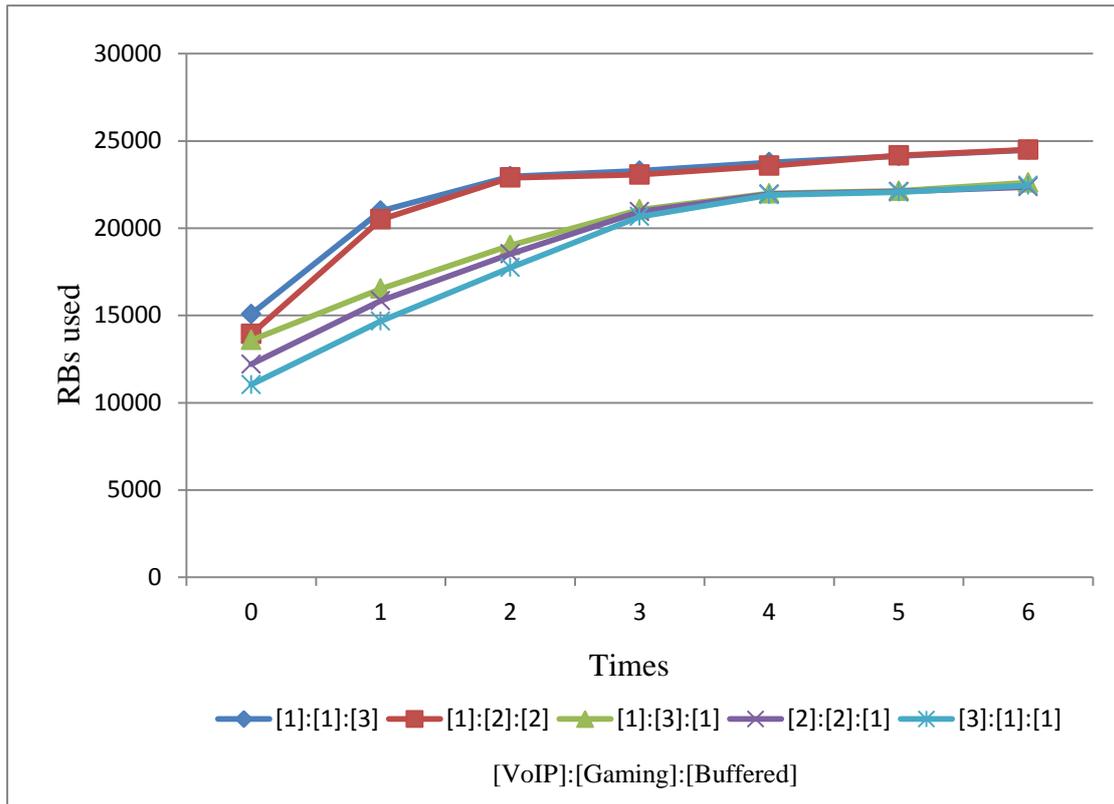


圖 4-2 降低調變次數所需的 RB 數量

實驗二：

在實驗二中，我們根據實驗一的結果決定不同 traffic 比例的降低調變次數。觀察在不同 traffic 比例情況下不同型態的 VoIP，gaming 及 buffered streaming 之 throughput、packet delay 及 packet loss ratio 的變化。

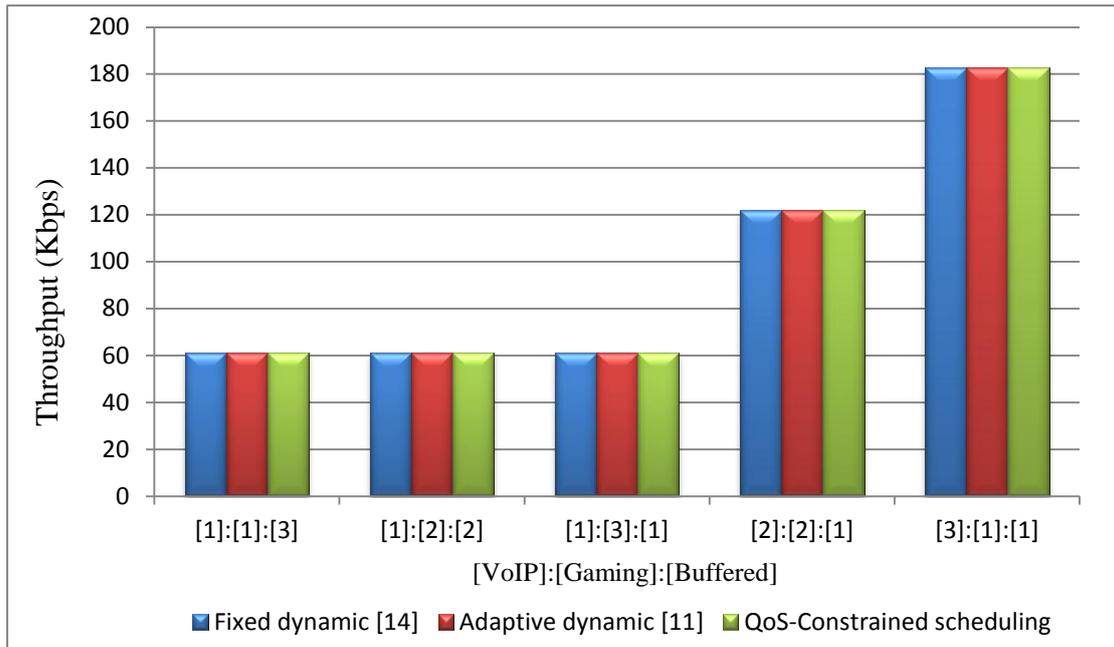


圖 4-3 VoIP aggregated throughput

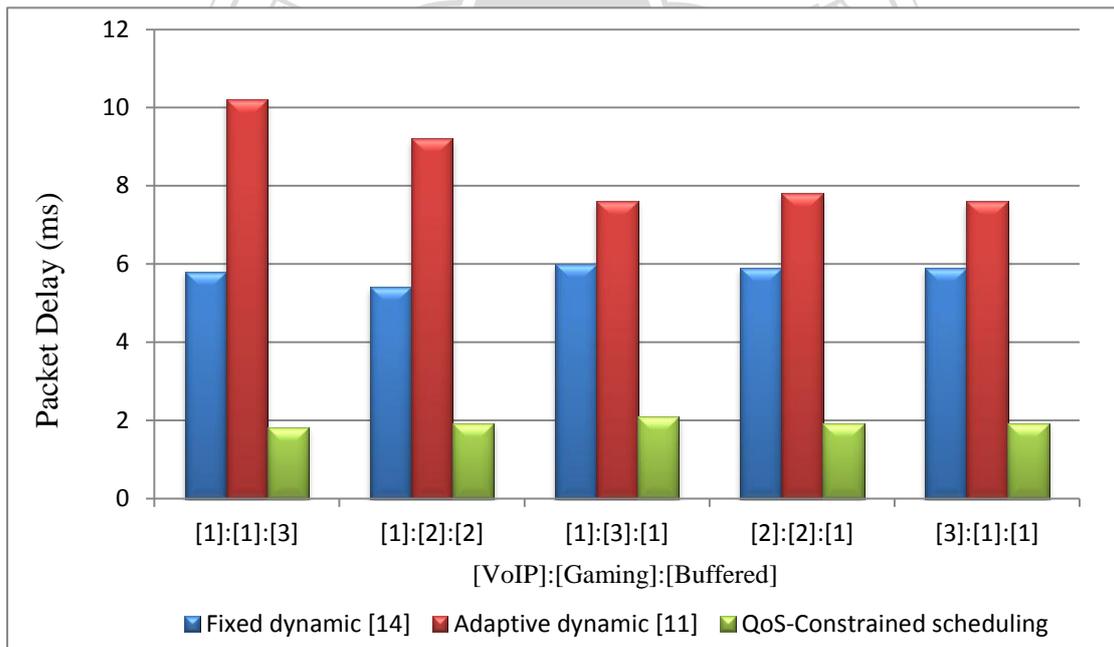


圖 4-4 VoIP average delay

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	68.9%	82.3%
1:2:2	64.8%	79.3%
1:3:1	65%	72.3%
2:2:1	67.7%	75.6%
3:1:1	67%	75%

表 4-4 VoIP packet delay improvement

對於 VoIP 的變化，圖 4-3 說明我們提出的考量 QoS 限制排程機制的 throughput 與固定載波動態分配及適應性動態分配機制一樣出色。也因為我們給予 VoIP 的 traffic 較高的優先權進行資源分配，使得在 packet delay 較固定子載波動態配置最多改善 68.9% 及適應性動態分配機制最多改善 82.3%，如表 4-4 所示。也因為 VoIP 最低保證速率所需的 RBs 資源占用不多，使得 packet 均能在嚴格的時間限制內傳送完成，如圖 4-4 所示，所以不會有封包遺失的情形發生。

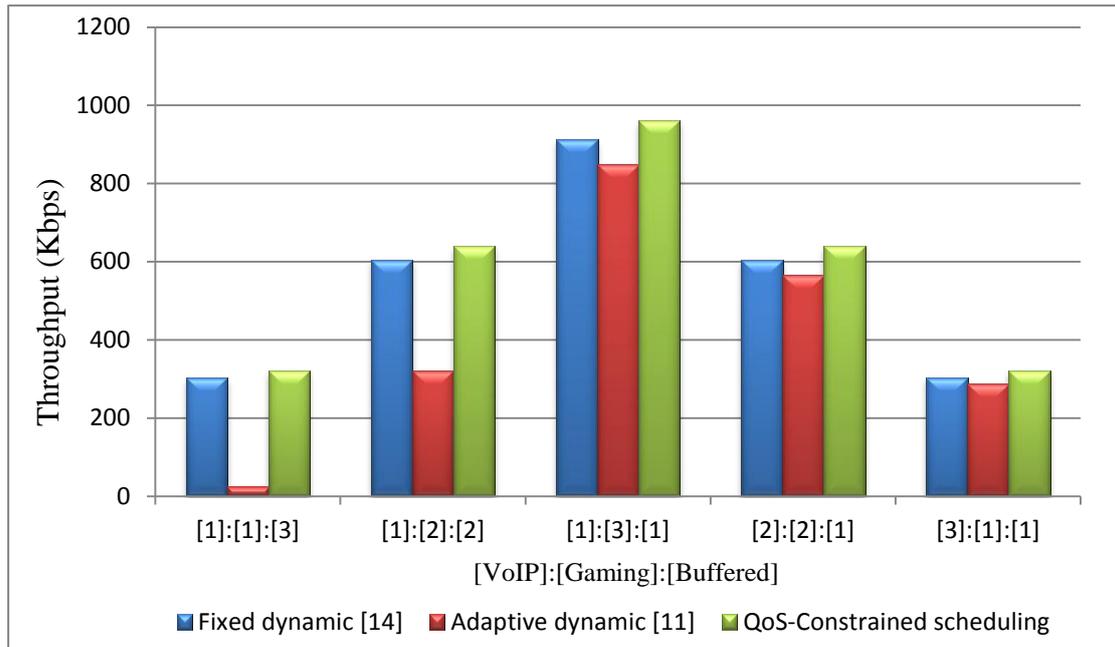


圖 4-5 Real time gaming aggregated throughput

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	5.4%	92.5%
1:2:2	5.3%	49.7%
1:3:1	4.8%	11.5%
2:2:1	5.5%	11.5%
3:1:1	5.2%	10%

表 4-5 Real time gaming aggregated throughput improvement

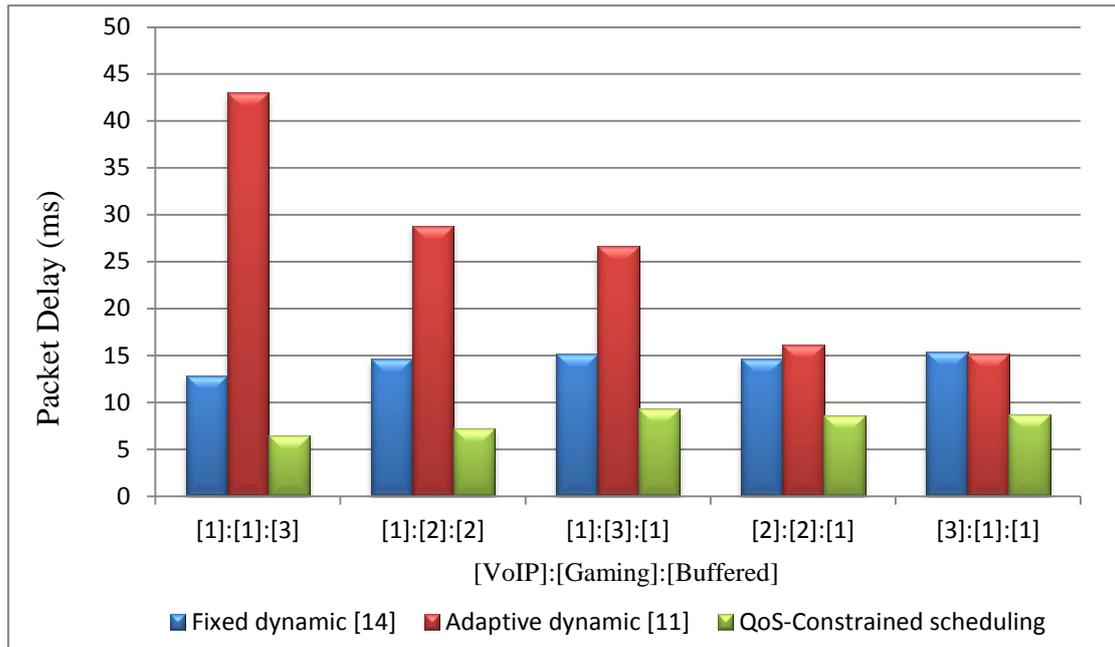


圖 4-6 Real time gaming average delay

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	49.5%	84.9%
1:2:2	50.8%	75%
1:3:1	38.8%	65.1%
2:2:1	41%	46.5%
3:1:1	43.3%	42.6%

表 4-6 Real time gaming packet delay improvement

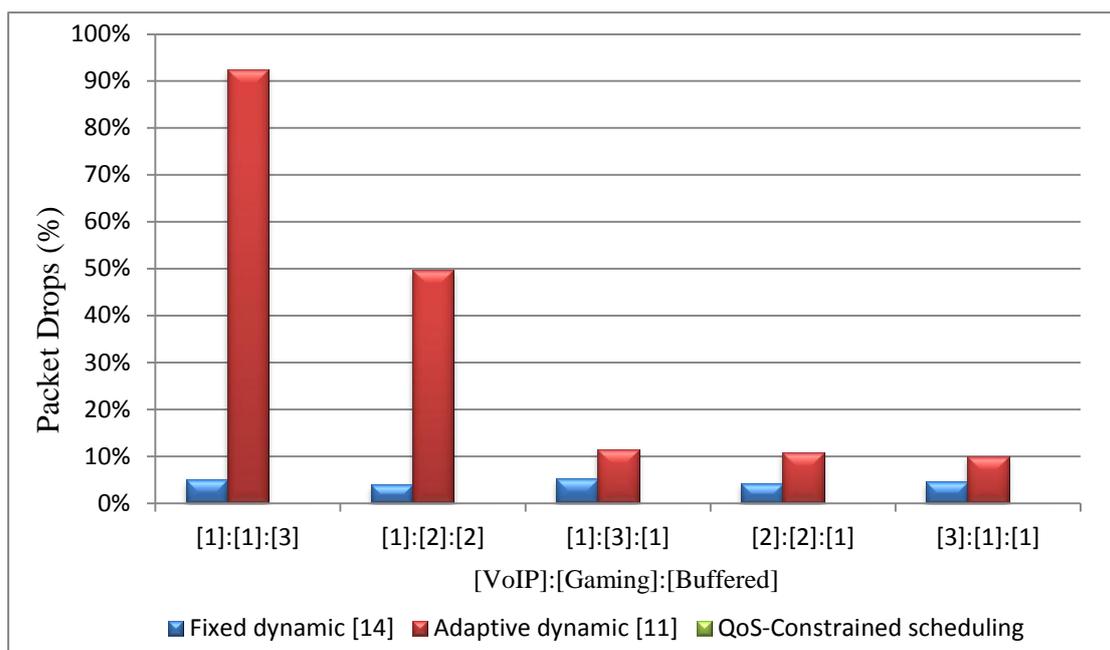


圖 4-7 Real time gaming packets loss rate

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	5%	92.5%
1:2:2	4%	49.7%
1:3:1	5.2%	11.5%
2:2:1	4.3%	10.8%
3:1:1	4.6%	10%

表 4-7 Real time gaming packets loss rate improvement

對於 real time gaming 變化，圖 4-5 及表 4-5 說明我們提出考量 QoS 限制排程機制的 throughput 較固定載波動態配置最多改善 5.4% 及適應性動態分配機制最多改善 94.5%。也因為我們給予 VoIP 的 traffic 較高的優先權進行資源分配，使得在 packet delay 較固定載波動態配置最多改善 50.8% 以及適應性動態分配機制最多改善 84.9%，如圖 4-6 及表 4-6 所示。在封包遺失率(PLR)比固定載波動態配置最多改善 5.2% 以及適應性動態分配機制最多改善 92.5%，如圖 4-7 及表 4-7 所示。

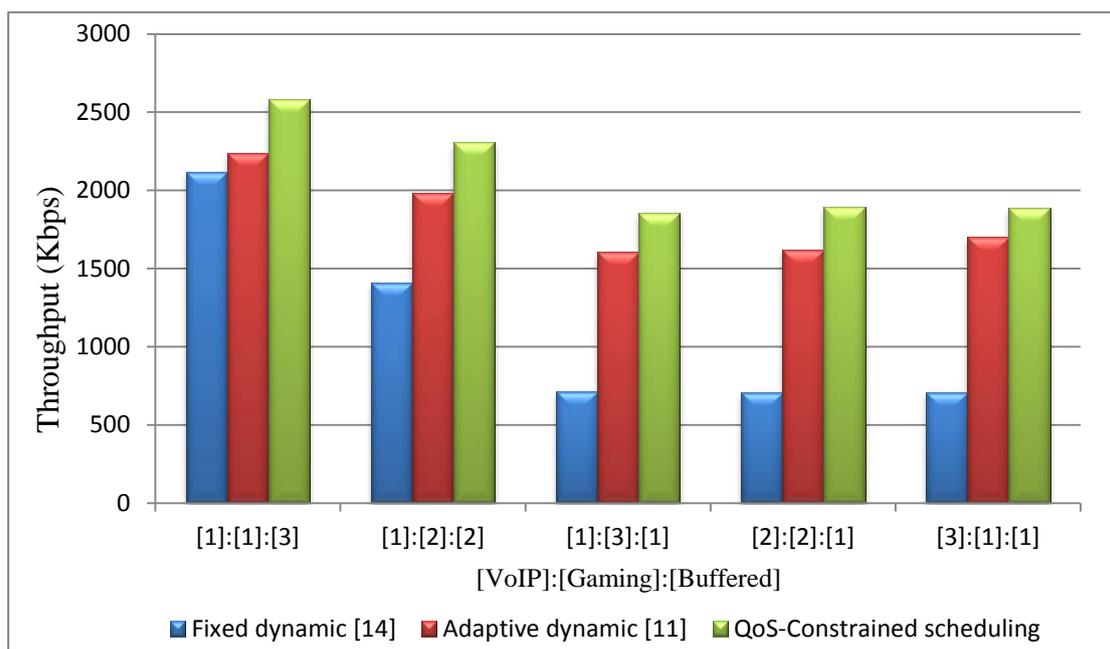


圖 4-8 Buffered streaming aggregated throughput

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	17.7%	13.2%
1:2:2	38.9%	15.9%
1:3:1	61.6%	13.3%
2:2:1	62.6%	14.3%
3:1:1	62.4%	9.9%

表 4-8 Buffered streaming aggregated throughput improvement

對於 buffered streaming，固定子載波動態配置限制了 RBs 資源的彈性化分配，使得 throughput 在不同比例的條件下傳送資料量也被限制。我們提出的排程機制，因為調降調變機制的關係，使得尋找相同調變的連續區塊上更加容易，若加入實驗一的限制次數，常能使整體 throughput 出現最佳狀況。圖 4-8 及表 4-8 說明我們提出考量 QoS 限制排程機制的 throughput 較固定載波動態配置最多改善 62.6% 及適應性動態分配機制最多改善 15.9%。

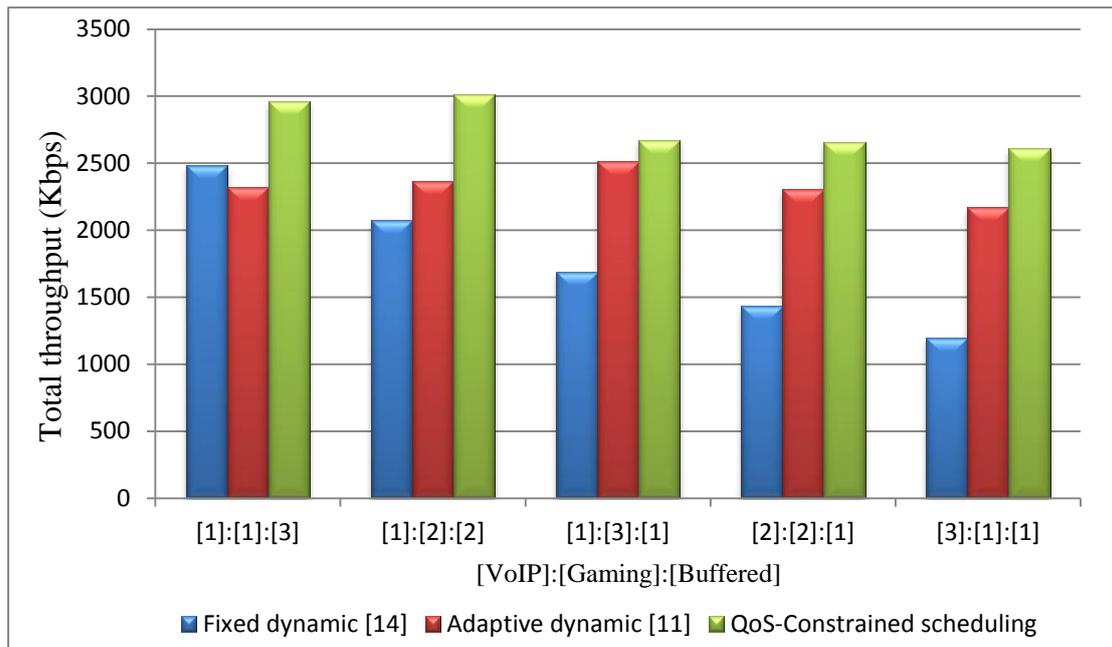


圖 4-9 Total aggregated throughput

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	15.4%	21.5%
1:2:2	10.1%	21.3%
1:3:1	37%	5.9%
2:2:1	45.9%	13%
3:1:1	54.2%	16.8%

表 4-9 Total aggregated throughput improvement

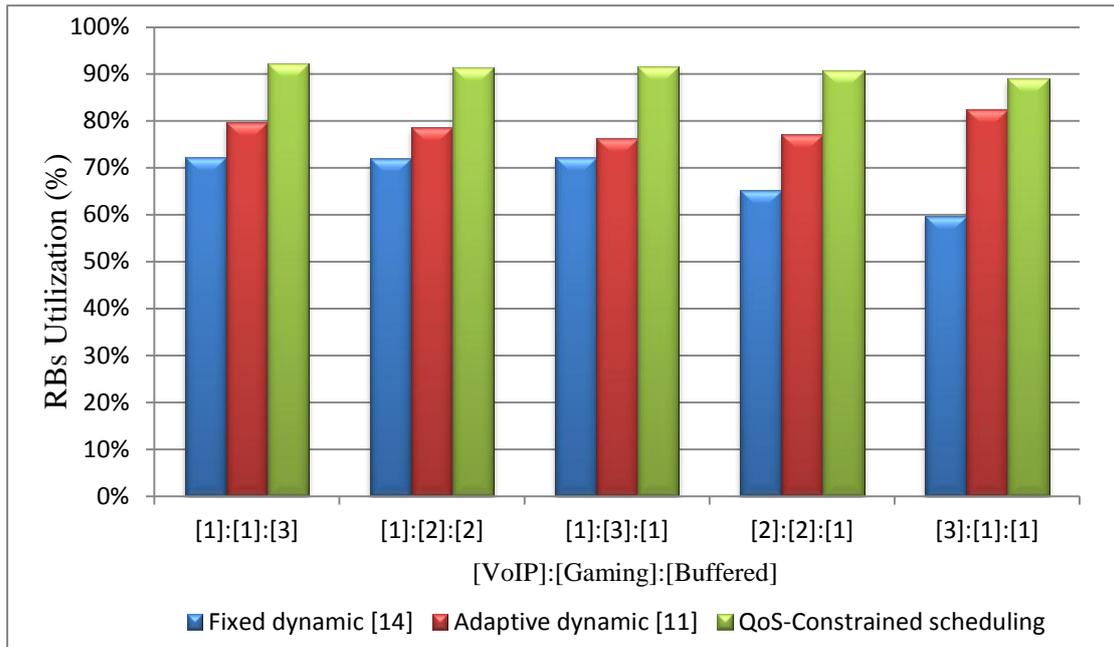


圖 4-10 RBs utilization

Traffic ratio	Improvement (compare to fixed dynamic)	Improvement (compare to adaptive dynamic)
1:1:3	20.1%	12.5%
1:2:2	19.3%	12.9%
1:3:1	19.5%	15.3%
2:2:1	25.6%	13.6%
3:1:1	29.2%	6.6%

表 4-10 RBs utilization improvement

最後我們對 RBs 利用率與整體 throughput 進行比較。圖 4-10 說明在降低調變後，在未超過整體 RBs 可以配置的數量下，使得 RBs 資源能夠更彈性且有效的配置，比固定子載波動態配置最多提升 29.2%和適應性動態分配機制最多提升 15.3%，如表 4-10 所示。圖 4-9 說明 RBs 彈性的配置將使得 throughput 相對大幅提升，比固定子載波動態配置最多提升 54.2%和適應性動態分配機制最多提升 16.8%，如表 4-9。

第五章 結論與未來研究

5.1 結論

在本論文中，我們介紹 LTE 的整體架構，討論在 LTE 上行 SC-FDMA 系統中資源排程的相關文獻，並針對 SC-FDMA 系統在頻寬資源分配上做進一步研究。我們的結論是在 SC-FDMA 系統下做頻寬資源分配，除了考慮 QoS 要求與整體通道品質條件進行資源分配外，還需注意「RB 在配置上需連續配置」與「配置的 RBs 需使用相同調變技術」兩大限制。

本論文針對不同網路實際狀況提出三階段演算法，其主要貢獻為以下三點：

1. Time domain scheduler 的設計為滿足不同等級的網路服務(QoS)需求為主要考量。針對 GBR 承載服務的分類提供穩定的 RB 資源分配，對 non-GBR 承載服務則依據最大位元速率在剩餘頻寬資源中進行分配。
2. Frequency domain scheduler 的設計考量在通道條件下維持 QoS 需求。我們讓 QoS 類別中通道品質較好的用戶優先進入系統，減少頻帶資源的浪費；並利用 non-GBR 承載服務對於延遲的低敏感度，彈性分配頻帶資源以增加頻帶的使用率。
3. RBs allocation 機制中討論到若沒有限制降低調變的次數，在系統效能上的提升將會是有限的，甚至可能因此減少。所以在第四章中我們透過實驗決定在不同比例的網路服務負載下降低調變的最大限制。在滿足 QoS 服務需求的同時，也因為限制降低調變次數，盡可能利用頻帶資源下提升整體系統效能。

5.2 未來研究

目前我們的研究，有些問題並未在本論文中討論，以下歸納出兩點未來可能的延伸性研究：

1. 目前我們研究 non-GBR 承載的降低調變限制是固定的，但在 LTE 標準中，動態移動的 UE 是可以隨狀況使用不同的調變。每個基地台下的 UE 不僅調變在改變，數量也隨時在變動，而使用不同的調變代表與基地台的距離遠近。而在自適應調變考量上則需要更精準的調整，所以未來研究可探討在動態網路環境中，遵守 SC-FDMA 兩大限制前提下，如何在多變的通道環境更精確的決定連線調變。
2. 在本論文中，我們並未針對 HARQ 封包的重傳次數加入排程考慮，而在 LTE 中對於 HARQ 封包的重傳次數有嚴格的限制，也就是說若封包重傳次數愈多，應該給予更高的優先權以增加傳送的成功率。所以，在未來研究中可以因應實際需求將本論文設計的排程機制加入 HARQ 封包重傳次數的限制。

參考文獻

- [1] Agilent Technologies, “3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges,” pp. 81-86, June 2009.
- [2] Moray Rumney, “3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA,” *Agilent Measurement Journal*, pp. 18-27, January 2008.
- [3] Harri Holma, and Antti Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, Wiley: IEEE Press, June 2009.
- [4] Hyung G. Myung, Junsung Lim, and David J. Goodman, “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission,” *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 1, no. 3, pp. 30-38, September 2006.
- [5] 3GPP, R99, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS): Quality of Service (QoS) concept and architecture,” TS 23.107 v. 3.9.0, February 2002.
- [6] Rabie Almatarneh, Mohamed Ahmed, and Octavia Dobre, “Frequency-Time Scheduling Algorithm for OFDMA Systems,” *Electrical and Computer Engineering, IEEE*, pp. 776-771, May 2009.
- [7] Yong Li, Na Lu, Mugen Peng, and Wenbo Wang, “Multiuser Resource Allocation for OFDM Downlink with Terminal Bandwidth Limitation,” *Wireless Communications and Networking Conference, IEEE*, pp. 1-5, April 2010.
- [8] Xu Yang, Yapeng Wang, Dapeng Zhang and Laurie Cuthbert, “Resource Allocation in LTE OFDMA Systems Using Genetic Algorithm and Semi-Smart Antennas,” *Wireless Communications and Networking Conference, IEEE*, pp. 1-6, April 2010.
- [9] H. Fattah and H. Alnuweiri, “A Cross-Layer Design for Dynamic Resource Block Allocation in 3G Long Term Evolution System,” *Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE*, pp. 929-934, October 2009.

- [10] O. Nwamadi, X. Zhu, and A. Nandi, "Enhance Greedy Algorithm Based Dynamic Subcarrier Allocation for Single Carrier FDMA Systems," *Wireless Communications and Networking Conference, IEEE*, pp. 1-6, April 2009.
- [11] F. Calabrese, "Scheduling and Link Adaptation for Uplink SC-FDMA Systems," *PhD Thesis/ Department of Engineering, Science and Medicine, University of Aalborg*, April 2009.
- [12] Suk-Bok Lee, Ioannis Pefkianakis, Adam Meyerson, Shugong Xu and Songwu Lu, "Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink," *INFOCOM 2009, IEEE*, pp. 2622-2615, April 2009.
- [13] Yun-Fang Chen, Chin-Min Hu, "Inter Cell Interference mitigation in OFDMA Cellular System," *Department of Communication Engineering, National Central University, Taiwan, R.O.C.* 2010.
- [14] O. Nwamadi, X. Zhu and A. K. Nandi, "Dynamic Physical Resource Block Allocation Algorithms for Uplink Long Term Evolution," *Communications 2011, IET*, vol. 5, pp. 1020-1027, May 2011.
- [15] Liang Zhang, "Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution," *Master Thesis/ Department of Electrical Engineering, Automatic Control, University of Linköpings*, September 2010.
- [16] "The Network Simulator ns-3" (NS-3). Retrieved:
<http://www.nsnam.org/docs/release/3.13/tutorial/singlehtml/index.html>,
February 2012.
- [17] "ns-3 LTE module documentation-LENA M2 documentation" Open Source Project. Retrieved:
<http://lena.cttc.es/manual/>, February 2012.