

A Utility-based Resource Allocation and Scheduling Scheme

胡誌中¹ 陳振庸² 楊峻權¹ 麥毅廷^{2*}

¹ 國立暨南國際大學資訊工程系

² 修平科技大學資訊網路技術系

*Corresponding author: wkb@wkb.idv.tw, wkb@ieee.org

摘要

長程演進技術(Long Term Evolution, LTE)是由電信相關業者所組成的 3GPP 組織所制訂之無線通訊傳輸標準之一，具有與現有行動通訊網路(3G UMTS, 3.5G HSDPA...等)相容的特性，是目前 4G 標準中最被看好的一種網路接取技術，在 LTE 架構之下，規範了行動用戶(UE)如何透過無線訊號與 LTE 核心網路(Evolved Packet Core, EPC)的基地台(E-UTRAN NodeB, eNB)連線並進行無線通訊。

本文中所探討的是在 LTE 網路架構下的 eNB 設備上 MAC 層的資源分配排程，如何在有限的資源底下做出最有效的利用又符合每個資料的服務等級，以及公平性與吞吐量之間的平衡，一直是排程所探討的問題。文中我們將 MR(Max Rate)演算法作用在 LTE 上時，發現原來的 MR 演算法可能結果並不是最佳的，我們將 MR 演算法在特定情況底下做調整，能夠使得其依然達到最大化使用率的目的。最後我們從不同的觀點切入探討公平性的議題，提出一套作用於不同 QCI 間的公平性的作法。

關鍵詞：LTE, MAC schedule, 吞吐量, 公平性

1. 前言

隨著人們對行動網路的需求越來越大，電信相關產業在行動電話發展上，也逐步推陳出新開始提供網路相關連線服務，其中長期演進技術(LTE)[1]在最近幾年是備受矚目的新一代行動無線寬頻技術。

LTE[1]可以讓電信業者除了傳統語音電話外，還能提供更經濟便利的無線寬頻服務，網路頻寬更超越 3G 無線網路的效能、帶來更為優異的表現。LTE 已正式被 3GPP 列為無線標準技術，由於 LTE 技術是由電信通訊相關領域所提出，能與現有 GSM/UMTS 等服務網路相容，讓 LTE 的佈建比 WiMAX 等技術更為便利。

LTE 在採用 OFDMA(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access,正交分頻多重存取)的調變技術，相較於過去電信技術如 GSM(Global System for Mobile Communications,全球行動通訊系統)、UMTS[2](Universal Mobile Telecommunications System,通用行動電信系統)所使用的 CDMA(Code Division Multiple Access,分碼多重存取)，OFDMA 可以提供更大的吞吐量，配合 2x2 4x4 MIMO(Multi-Input Multi-Output)的天線技術，並可同時支援 TDD 與 FDD 模式，可以大幅提

高無線技術的傳輸效能。

LTE 技術現在日趨成熟，也越來越有未來 4G 網路標準的趨勢，但是至今仍然沒有一套在 LTE eNB 設備上標準的 MAC schedule[3]演算法，當今有許多研究主張將 PF(Proportionally Fair)[4][5]以及 MR[6]帶入 LTE 中，基於 PF 演算法的公平性[7]以及 MR 演算法最大化吞吐量[8]的特性，但是當 MR 演算法實際運用在 LTE 上，加入 QCI(Quality Class Identifier)的考量後[9]，發現其可能在特定情況底下無法達到最大化吞吐量的目的，因此我們將原有的 MR 演算法做改變，使其運用在 LTE 上時，依然能達到最大化吞吐量的目的，另外我們運用傳統的 PF 演算法做改變，提出一套針對延遲的公平性演算法。

本論文接下來第二章節會介紹現有 LTE 的標準以及相關的文獻探討。第三節我們會對發現的問題做詳細的描述，並提出我們的改進方式，然後是對於延遲公平性的演算法。最後是本論文之總結的部分。

2. 技術標準介紹與文獻探討

2.1 LTE 標準介紹

LTE 已經在 Release8[10]定了完整的網路架構，如圖 1 所示：

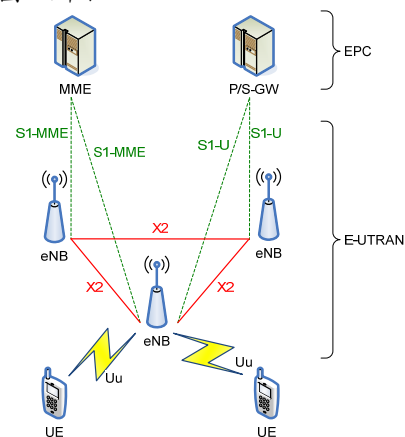


圖 1 LTE 基本架構圖

LTE 架構主要分為 E-UTRAN(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)以及 EPC(Evolved Packet Core)還有外部網路的部分。

E-UTRAN 為 LTE 的無線接取服務技術，

在 E-UTRAN 底下有 UE(User Equipment,使用者設備)及 eNB(eNodeB,基地台)。eNB 透過 Uu 介面與負責服務的 UE 連接, eNB 間可以透過 X2 介面戶相連接溝通。另外, eNB 也透過 S1 介面連往後端的核心網路(Core Network,CN 也稱作 Evolved Packet Core,EPC)。EPC 中主要含有 MME(Mobility Management Entity)、S-GW(Serving Gateway)以及 P-GW(Packet Data Network Gateway)這三個部分, 其中 eNB 透過 S1-MME 介面與 MME 連接, eNB 透過 S1-U 介面與 S-GW 連接。

在 LTE 網路環境當中, UE 傳輸資料之前除了需要和 eNB 建立好 RRC 連線以外, 還要為每條連線建立 bearer, 使用 bearer 的目的在於為每個 traffic 分 QoS 等級, UE 的資料都是透過對應的 bearer 傳送到 EPC, 每個設備之間所運作的 bearer 如圖 2[11]所示:

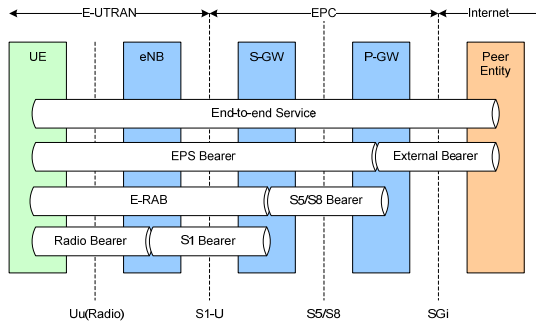


圖 2 EPS bearer 架構圖

2.2 訊框架構

基於 OFDM 的技術, LTE 下行鏈路資源分配可以看成是一種以時間和頻率劃分的二維資源分配系統, 如下圖所示: X 軸為時間, Y 軸為頻率。最大的時間單位稱做一個無線訊框(Radio frame)長度為 10 毫秒(ms), 在一個無線訊框中是由 10 個子訊框(Subframe)所組成, 每個子訊框長度為 1 毫秒, 一個子訊框又分為 2 個時槽(Time slot), 一個時槽為 0.5 毫秒, 又可劃分成 7 個 OFDM 符元(Symbols), 每個時槽是由數個 RB(Resource block)[12]所組成, 又一個 RB 是由 7*12 個 RE(Resource element)所組成如圖 3 所示:

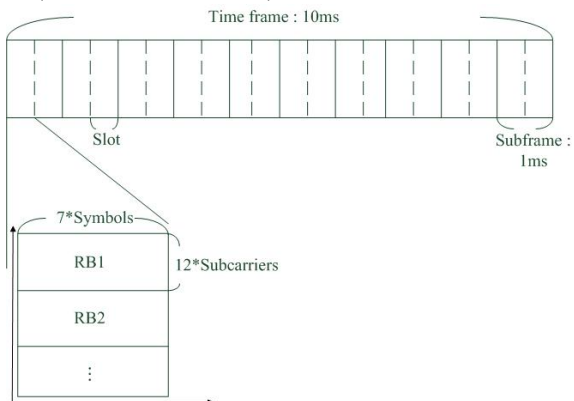


圖 3 訊框架構

2.3 QCI 及 CQI

QCI 是每個 bearer 中最重要的參數之一, 它定義了 EPS 應該為該 bearer 提供的 QoS 的特性。在 3GPP 的標準中, 定義了 9 種不同的 QCI 等級每個 QCI 等級各有不同的參數如圖 4[13]所示:

QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget	Packet Error Loss Rate	Example Services
1	GBR	2	100 ms	10 ⁻²	Conversational Voice
2		4	150 ms	10 ⁻³	Conversational Video
3		3	50 ms	10 ⁻³	Real Time Gaming
4		5	300 ms	10 ⁻⁶	Non-Conversational Video
5	Non-GBR	1	100 ms	10 ⁻⁶	IMS Signaling
6		6	300 ms	10 ⁻⁶	Video, TCP-based
7		7	100 ms	10 ⁻³	Voice, Video, Interactive Gaming
8		8	300 ms	10 ⁻⁶	Video, TCP-based
9		9			

圖 4 QCI 表

參數包含有:

- Resource Type: 定義該 QCI 為 GBR(Guaranteed Bit Rate)或是 Non-GBR(Non-Guaranteed Bit Rate), 若為 GBR 則 EPS 需為其提供一定的 Bit Rate, Non-GBR 則否。
- Priority: 定義該 QCI 相較於其他 QCI 的優先權順序。
- Packet Delay Budget(PDB): 定義該 QCI 所能忍受最大的延遲上限。
- Packet Error Loss Rate(PELR): 定義該 QCI 所能忍受最大的封包丟失率。

CQI(Channel Quality Indicator)是一個定義 Channel 品質好壞的級數。UE 會定期測量它與 eNB 間的通訊品質好壞, 然後回報給 eNB 知道, 以供其排程使用, 當然 eNB 也能夠依需求隨時要求 UE 回報當時的 CQI[14]。在 LTE 中定義了 16 種不同的 CQI 等級, 如圖 5[15]所示:

CQI index	modulation	code rate*1024	efficiency
0	Out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

圖 5 CQI 表

參數包含有：

- Modulation：指該 CQI 的實體層調變方式，一般來說 64QAM 同樣時間所能傳送的資料大於 16QAM，16QAM 又大於 QPSK，但越高的調變方式對於環境越嚴格，否則錯誤率會上升。
- Code rate：指該 CQI 在一串資料裡面有多少比率是真正的資料，剩下的是偵錯碼，其數值越接近 1024 所能傳的資料就越多。
- Efficiency：指該 CQI 等級的 Resource Element 所能 bearer 的資料數 (bit)。

2.4 MAC Schedule

MAC schedule 是作用在 eNB 上，將從 EPC 傳來要送給 UE 的下行封包進行排程後透過 Air Interface 傳送給 UE。如圖 6，MAC schedule 的最小單位為一個 RB。TTI(Time Transmission Interval)為傳輸間隔的時間單位，在 LTE 上一個 TTI=1ms，同時也是一次排程的時間單位。在公平性以及吞吐量之間有好的均衡一直是 MAC schedule 的一樣重要議題，公平性指的是在同樣情況底下，每個 UE 所能使用到的資源多寡是相同的，例如 UE1 在這次的排程中取得了 n bit 的 RB，則 UE1 將會在下一次排程中與其他擁有同樣 QCI 封包以及同樣 CQI 信道品質的 UE 競爭 RB 的優先權會較低。吞吐量指的是因為每個 UE 與 eNB 間信道品質都不盡相同，導致 UE 回報給 eNB 的 CQI 也不同，CQI 的不同影響了 RB 的 modulation 方式，不同的 modulation 方式導致一個 RE 所能 bearer 的 bit 數不同，RE 的大小又會影響 RB 的大小，所以將 RB 分配給不同的 UE 其所能 bearer 的 bit 數也都不同，若我們都將 RB 分配給信道品質最好的 UE，則資源會有最好的使用率，提高整體的吞吐量。LTE 將封包透過 QCI 分為兩大類：GBR 以及 Non-GBR，屬於 GBR 的封包有較為嚴謹的優先權，意指在一般狀況下優先權級數高的絕對會優先於優先權級數低的封包，而 Non-GBR 則相反，意旨可依照需求去調整 Non-GBR 封包的優先權，所以在 MAC schedule 上 GBR 排程的目標會是追求好的吞吐量，而在 Non-GBR 的排程上會考慮公平性，所以一般會將 MR 演算法運用在 GBR 的排程中，將 PF 演算法運用在 Non-GBR 的排程上。

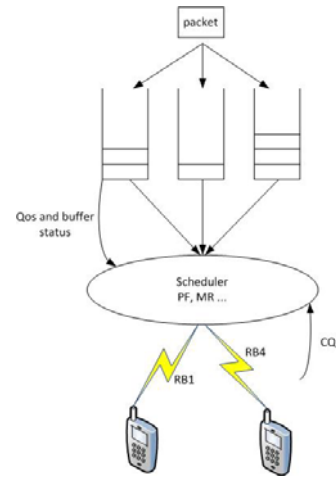


圖 6 排程示意圖

2.5 Schedule algorithm

在這裡我們介紹傳統有公平性特性的 PF 演算法以及能夠最大化吞吐量的 MR 演算法，首先是 PF 演算法的介紹：

$$P = \frac{Rate_{inst}}{Rate_{accum}}$$

$$Rate_{accum}(n) = \alpha \cdot Rate_{accum}(n-1) + (1-\alpha) \cdot Rate_{inst}$$

其中 P 為優先權級數， $Rate_{inst}$ 為 UE 在這個 TTI 的 data rate， $Rate_{accum}$ 為在這個 TTI 之前 UE 所取得的 data rate， α 為一個權重值。由上述公式可以看出若 UE 取得 RB 會得到越大的 data rate 時 P 值越高，但是若 UE 過去已經佔有過許多資源時，該 UE 在這次的 RB 分配上 P 值將會有所減小，以達到其公平性的概念。

以下是 MR 演算法：

$$k^* = \arg \max_{k,n} R_{k,n}^*(t), \quad k=1, \dots, K$$

其中 k 為 UE，R 為 data rate，n 為 RB。

由上述公式可以看出 MR 演算法唯獨考慮將 RB 分配給信道品質最好之 UE，追求最大化吞吐量的目的，其餘的因素都不列入考慮。

將 MR 演算法實際運用在 LTE 的 GBR 封包的排程時如圖 7，因為 QCI 的限制，必須加入 priority queue 演算法來排程 QCI，其步驟為：

Step1. 將封包依照 QCI 分類裝進 buffer 中。

Step2. 選出 GBR 中優先權最高封包之 buffer。

Step3. 比較每個 RB 對應這些封包的 CQI，並將 RB 分配給 CQI 最高的 UE。

Step4. 每完成一次 Step2. 則確認一次是否滿足該 bearer 的 guaranteed rate，若滿足該 bearer 之 guaranteed rate 或是所有封包都分配完成時則開始 Step4，若未滿足 guaranteed rate 且仍然有優先權最高之 GBR 封包未分配完成，則持續 Step2。

Step5. 當完成 GBR 封包最高優先權的排程後，則開始 GBR 優先權次高之封包排程，步驟與優先權最高之封包相同，如此重複直到全部 GBR 封包排程

完成，才會開始 Non-GBR 封包之排程。

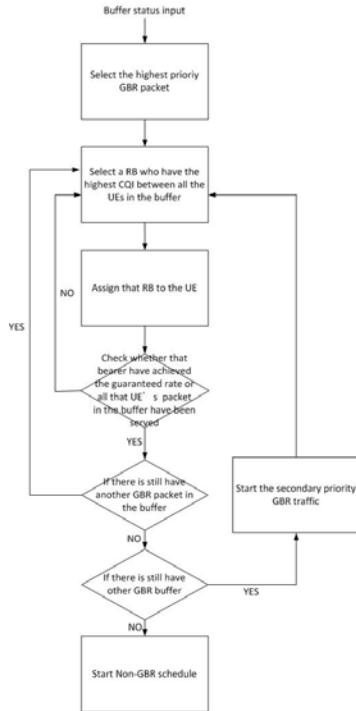


圖 7 MR in LTE

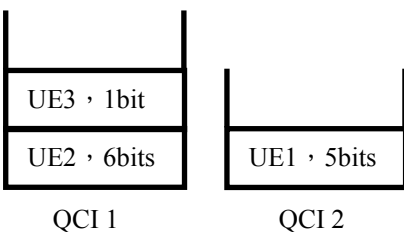
2.6 問題定義

如上一節所述，在 GBR 的排程中 scheduler 會先選擇優先權最高的 QCI，決定 QCI 之後再考慮將 resource block 分配給選定的 QCI 中 CQI 最好的 UE。我們發現使用 Priority Queue 決定 QCI 後再使用 MR 演算法分配 RB 給 UE 時，在 RB 能夠滿足所有 GBR traffic 的要求時，因為 Priority Queue 的限制，在所有 UE(不論 QCI)中擁有最高 CQI 的 UE 其沒有最高優先權之 GBR 封包時，將有可能無法達到最大化 utilization 的效果。如下例所示：

	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6
UE1	5	4	1	1	1	1
UE2	4	3	2	2	1	1
UE3	3	2	1	1	1	1

Efficiency table

RB7	RB8
1	1
1	1
1	1



在此我們將 efficiency 當作是優先權使用，並

且都無法達到 bearer 的 guaranteed rate，若使用上一節所述之 MR 演算法，其排程結果將會是：

Step1.對 QCI 1 buffer 內之封包進行排程

UE2 : RB1+RB2=7bits

UE3 : RB3=1bit

Step2.對 QCI 2 buffer 內之封包進行排程

UE1 : RB4+RB5+RB6+RB7+RB8=5bits

Step3. buffer 內沒有 GBR 之封包，結束 GBR 封包之排程，開始 Non-GBR 封包排程。

Non-GBR : null

從上面結果我們可以看出幾點問題：

1. 使用傳統的 MR 演算法，UE1 雖然對於 RB1 有最佳的 CQI，但是 UE1 沒有優先權最高之封包，導致 RB1 分配給了 UE2。
2. UE2 使用不全部它所得到的資源，導致浪費。
3. RB3 給 UE3 使用只能傳送 1bit，但是如果能分配給 UE2，則能傳送 2bits，更加增加吞吐量。

3. Resource Allocation Algorithm

3.1 演算法介紹

我們認為如果所有資源夠多，足夠滿足所有 GBR 封包的需求時，QCI 的分級就不再是那麼的重要，若我們可以將 QCI 的框架拿掉，就可以解決上述問題 1(proposal 1)，因為 UE1 有最好的 CQI，所以絕對能取得 RB1。並且加入依照需求動態調整優先權的機制(proposal 2)，即以上述為例，若 UE2 使用不完 RB2 所能提供給 UE2 的 3bits，則動態調降 RB2 對於 UE2 的優先權，使其調整為 2 符合 UE2 當前對於 RB2 的需求，這樣便能解決上述問題 2。最後是對一個 UE 有同樣 CQI 的不同 RB，在傳統 MR 演算法會隨機選擇一個 RB 分配給 UE，在此我們認為應該再進行討論，應該要比較其他仍然有封包要傳送的 UE 的優先權，選擇對於仍然有封包要傳送的 UE 的優先權最小的 RB(proposal 3)，這樣雖然不是絕對解決上述問題 3，但仍然有機會。

以下為我們所提出的演算法步驟：

Step1.依照需求更新一次 Efficiency table。

Step2.將有最高優先權的 RB 分配給 UE，若有相同優先權之 RB 則比較仍然等待排程之 UE 的優先權，選擇其最小者。

Step3.確認該 QCI 等級的 UE 是否滿足 guaranteed rate，若滿足則不再排程該 QCI 等級之 UE 封包，並將該 QCI 等級之 UE 封包從 buffer 內去除。回到 step1，直到 buffer 為空。

Step4.當完成 GBR 之排程後，開始 Non-GBR 之排程。

以下使用我們所提出的演算法跑上述之場景資源分配：

Step1. 依照需求更新 Efficiency table

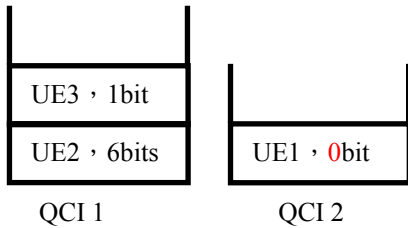
	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6
UE1	5	4	1	1	1	1
UE2	4	3	2	2	1	1
UE3	1	1	1	1	1	1

RB7	RB8
1	1
1	1
1	1

	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6
UE2	1	1	1	1	1	1
UE3	1	1	1	1	1	1

RB7	RB8
1	1
1	1

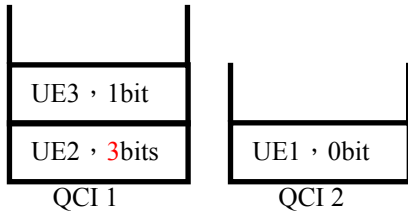
Step2.將 RB1 分給 UE1，更新 table。



	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6
UE2	4	3	2	2	1	1
UE3	1	1	1	1	1	1

RB7	RB8
1	1
1	1

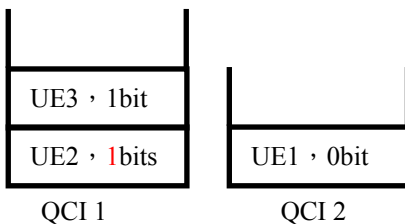
Step3.將 RB2 給 UE2，更新 table。



	RB1	RB2	RB3	RB4	RB5	RB6
UE2	3	3	2	2	1	1
UE3	1	1	1	1	1	1

RB7	RB8
1	1
1	1

Step4.RB3 給 UE2，更新 table。



Step5.RB4 給 UE2，RB5 給 UE3

結果：

UE1：RB1=5bits

UE2：RB2+RB3+RB4=6bits

UE3：RB5=1bit

Non-GBR：RB6+RB7+RB8

在這又產生個問題，我們如何去知道資源是否能滿足所有的 GBR traffic 呢，若我們將 RB 都給 CQI 最好的 UE 的話，能得到所能服務之封包大小的最大值 $Max(t)$ ，將 RB 都給 CQI 最差的 UE 時會得到所能服務之封包大小的最小值 $Min(t)$ ，我們將使用 priority queue+MR 演算法或是單純使用 MR 演算法的門檻設為：

$$T = \frac{Max(t) + Min(t)}{2}$$

在全部的 packet size 加總大於 T 時單純使用 MR，在全部的 packet size 加總小於 T 時使用 priority queue+MR。

在最後我們從不同的角度探討公平性這樣議題，傳統 PF 能展現出在不同 UE 間的 bit rate 的公平性，我們提出在不同 QCI 間能展現出對於 delay 公平性的 PF：

$$P = \frac{MQoS_{weight}}{1} \cdot \frac{Head - of - Line \ delay}{Packet \ Delay \ Budget}$$

$$D_{accum}(n) = \alpha \cdot D_{accum}(n-1) + (1-\alpha) \cdot D_{inst}$$

其中 $MQoS_{weight}$ 為該 QoS class 在 MAC 層的權重值， D_{accum} 為此 QCI 在這個 TTI 之前所經歷過的 delay，Head-of-Line delay 為此 QCI 的第一個 packet 的 delay 值，Packet Delay Budget 為此 QCI 在 QCI table 上定義的最大可容忍延遲， D_{inst} 為在這個 TTI 分配出去的 packet delay， α 為一權重值。

3.2 效能評估環境

模擬實驗的設置是由多個 UE 連接到一個 eNB 上，並且假設在每個 TTI 來的 packet 個數為 Poisson distribution，再根據底層回報的 CQI 值做 Max Rate

演算法分配 RB，我們將依序比較從在 LTE 上使用傳統 Max Rate 演算法、根據 proposal 1 改進的 Max Rate 演算法、根據 proposal 2 改進的 Max Rate 演算法、根據 proposal 3 改進的 Max Rate 演算法，最後是根據 proposal 1 + proposal 2 + proposal 3 所改進的 Max Rate。

表 1 環境設置

System capacity	20MHz
(Number of eNB, Number of UE)	(1, 5)
Number of RB in a TTI	100
CQI value of RB	Random
The value of λ	0.2、0.7
Size of audio Packet	64~384bits
Size of video Packet	4000~12000bits
Traffic Rate	12000bits

3.3 效能評估

分別由 light load ($\lambda=0.2$) 以及 heavy load ($\lambda=0.7$) 兩個場景來看，比較包含每個 TTI 分配完後剩餘下來的 RB 的 CQI 分布以及分配出去的 RB 但是使用不完造成浪費的 bit 數，選擇 load=0.2 以及 load=0.7 的目的是為了凸顯出演算法對於在 load 重但還不至於擁塞的情況下能表現出較傳統演算法還要好的吞吐量。

以下是 light load 的部分：

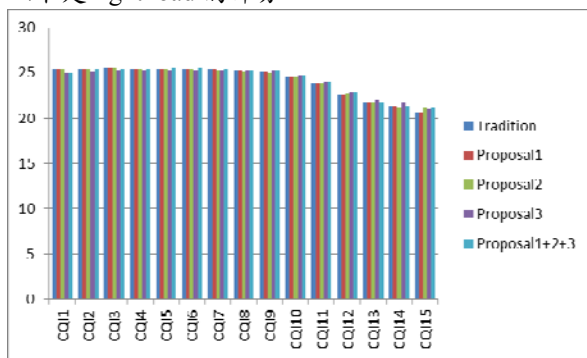


圖 8 在 light load 情況下剩餘 RB 分布圖

Y 軸為每個 TTI 中做完 GBR traffic 的排程後所剩餘下來 RB 的 CQI 平均個數的分布，基於剩餘的 RB 個數差異不大的情況下，在剩餘 RB 的 CQI 分布圖上也可以看出每個 CQI 的個數其實是差不多的，但幾乎都有多餘傳統的 Max Rate 些許的數量。

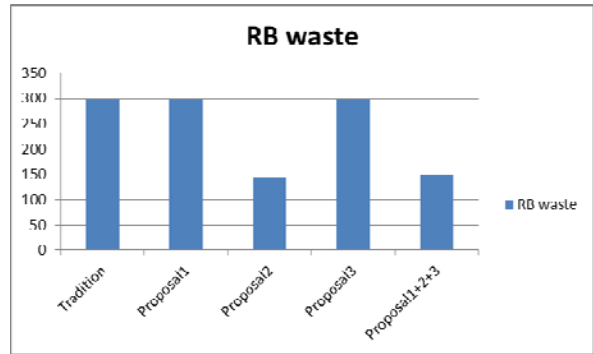


圖 9 在 light load 情況下 RB 浪費的 bit 數

Y 軸為每個 TTI 在做完 GBR traffic 的排程後，分配出去但使用不完造成浪費的 RB 的 bit 數平均，從上圖可以看到我們的 Proposal2 在 light load 的情況底下因為調降了 UE 對於其使用不完的 RB 的優先權，所以能夠有效的減少 RB 分配出去之後，使用不完的 bit 數，達到更好的使用效率。

以下是 heavy load 的情況下：

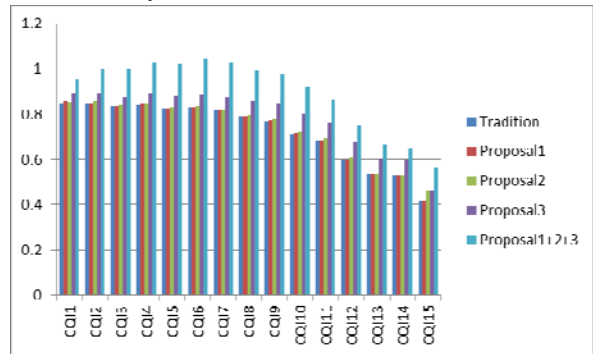


圖 10 在 heavy load 情況下剩餘 RB 分布圖

Y 軸為每個 TTI 中做完 GBR traffic 的排程後所剩餘下來 RB 的 CQI 平均個數的分布，其結果也受到了上上圖剩餘 RB 個數的影響，我們改進的 Max Rate 演算法在每個 CQI 的數量上也幾乎都較傳統的 Max Rate 演算法多了約 20% 的 RB 個數。

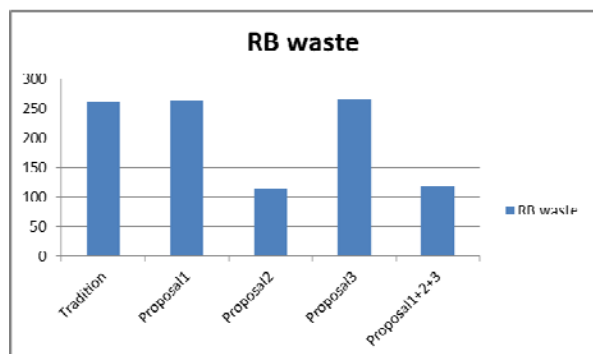


圖 11 在 heavy load 情況下 RB 浪費的 bit 數

Y 軸為每個 TTI 在做完 GBR traffic 的排程後，分配出去但使用不完造成浪費的 RB 的 bit 數平均，從上圖我們可以看到我們的 Proposal2 在 heavy load

的情況下依然能夠依靠調降 UE 對於其使用不完的 RB 的優先權進而有效的減少 RB 分配出去之後，使用不完的 bit 數。

4. 結論

在這篇論文我們探討了在 LTE 網路架構 eNB 設備上的下行鏈路資源分配排程演算法，傳統的 PF 以及 MR 演算法運用在排程上時能符合 GBR 以及 Non-GBR 類型的特性，在是在 MR 加上 QCI 的限制後，可能導致其吞吐量下降，文中我們探討其原因並且提出改進的方式，使得原有 MR 演算法在可能的情況下仍然能呈現出好的吞吐量。

參考文獻

- [1] S. Sesia, I. Toufik, and M. P. J. Baker, LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice, Wiley, Apr. 2009.
- [2] 3GPP, “Radio Access Network; UTRAN Overall Description,” Tech. spec. 3GPP TS 25.401, v. 10.2.0 (2011–06), 2011.
- [3] Roke Manor Research Ltd, "LTE MAC Scheduler & Radio Bearer QoS," 2011.
- [4] R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, “Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE,” Signal Processing Letters, vol. 16, no. 6, pp.461-464, 2009.
- [5] X. Li, B. Li, B. Lan, M. Huang, and G. Yu, “Adaptive pf scheduling algorithm in LTE cellular system,” in Proceeding of 2010 IEEE Information and Communication Technology Convergence, pp.501-504, Nov. 2010.
- [6] J.-J. Huang, W.-K. Lin, and H.-H. Ko, “A resource allocation algorithm for maximizing packet transmissions in downlink LTE cellular systems,” in Proceeding of 2011 IEEE TENCON, pp. 445-449, Nov. 2011.
- [7] S. Sun, Q. Yu, W. Meng and C. Li, “A Configurable Dual-Mode Algorithm on Delay-Aware Low-Computation Scheduling and Resource Allocation in LTE Downlink,” in Proceeding of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), pp. 1444-1449, April 2012.
- [8] O. Osterbo, “Scheduling and capacity estimation in LTE,” in Proceeding of 2011 IEEE 23rd Teletraffic Congress, pp.63-70, Sept.2011.
- [9] Y. Zaki, T. Weerawardane, C. Gorg, and A. Timm-Guel, “Multi-QoS-aware Fair Scheduling for LTE,” in Proceeding of 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference(VTC Spring), pp.1-5, May 2011.
- [10] 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN),” V8.5.0, Mar. 2008.
- [11] 3GPP, “Radio Access Network; E-UTRA and E-UTRAN Overall Description,” Tech. spec. 3GPP TS 36.300, v. 11.1.0 (2012–03), 2012.
- [12] Roke Manor Research Ltd, "LTE MAC Scheduler & Radio Resource Scheduling," 2012.
- [13] 3GPP, “Policy and charging control architecture (Release 11),” Tech. spec. TS 23.203 V11.9.0, March 2013.
- [14] T. Chen, J. Li, and C. Li, “A Novel AMC Scheme with Alterable SNR Threshold Intervals based on Cross-layer Design in WiMAX” China Communications, vol. 7, no. 2, pp. 100-109.
- [15] 3GPP, "Physical Layer Procedures (Release 10), " Tech. spec. TS 36.213 V10.0.1, January 2011.