1. 前言

行動網路的普及驅動了多樣化的行動通訊應用之發展使得人們對於行動網路服務的依賴越來越深，而近年來高品質影音串流、擴增實境、虛擬實境等應用的推出，更是需要更大的網路頻寬才得以順暢地運行，也因此使用者們對行動網路的速度與品質也有更高的要求。在第五代行動網路服務尚未發展成熟與建置完整之前，我們需要一個過渡的行動網路規範來提供更快速與更可靠之網路服務， 3GPP組織正積極地制訂4.5G世代行動網路規範 (稱做LTE advance pro, LTE-A Pro規範)。在原本4G LTE/LTE-A網路中，使用者裝置(User equipment, UE)連接到基地台(Evolved Node B, eNB)來獲取行動網路服務，而一個基地台底下的使用者裝置共享所連結到之基地台的無線資源。而在LTE-A Pro規範中，網路業者可以在一個基地台的涵蓋範圍底下多增加附屬之小基地台(small cell)，在有小基地台存在之網路下，3GPP組織於規範中定義了雙連接(Dual connectivity)技術來進一步提升網路容量與服務品質。

圖1顯示了一個以LTE-A Pro網路為基礎來提供雙連接服務之網路示意圖，在此網路中，大涵蓋範圍的基地台擔任主基地台Master eNB (MeNB)角色，而在MeNB的涵蓋範圍下亦裝設多個小基地台Secondary eNB (SeNB)來同時提供行動網路服務，雙連接技術的主要概念為允許使用者裝置能夠同時接收來自主基地台MeNB和小基地台SeNB之載波訊號(如圖1中的UE2與UE3)，藉此來提高使用者裝置所能接收到的下載資料流速率，此外亦可以提高網路總吞吐量。



圖1: 網路示意圖



圖2: 雙連接網路之通訊協定堆疊

在本研究中，我們探討使用雙連接技術來支援處理使用者裝置的下行資料流。圖2顯示雙連接功能之網路Layer 1與Layer 2通訊堆疊架構，其中Layer 1為無線通訊實體層(Physical layer, PHY)，Layer 2包含有三個子層分別為: 媒體存取控制層(media access control layer, MAC)、無線連結控制層(radio link control layer, RLC)、與封包資料匯聚層(Packet Data Convergence Protocol, PDCP)。在此網路架構下，MeNB與SeNB藉由標準X2傳輸介面來連接，X2傳輸介面可能為ADSL線路或是光纖網路來實現基地台間之連線。使用者裝置上可以有多組的無線乘載(Radio bearer)，無線乘載搭載著使用者的資料流及紀錄著該資料流之服務品質(Quality of Service, QoS)設定值，該設定值依據3GPP所定義之QoS class identifier (QCI)機制來給定[1]，使用者裝置的資料流會被指定至所規範之QoS等級劃分，等級劃分對應到一QCI數值(QCI value)。在近期之規格中，QCI等級共分為15個等級，每一個等級定義有相對應之優先權順序值、可容忍之延遲、以及可容忍之封包遺失率等參數。而這15個等級依據資料來源之特性可再被分為Guarantee bit rate(GBR)與non-GBR兩大類，GBR類的資料流需要較快速地被處理，主要用來支援即時服務，例如影音串流、線上遊戲等，而non-GBR類型的資料則是主要是用以非即時服務，如TCP協定為基礎之網路服務等，而一般來說non-GBR類型的資料流能有較高的延遲容忍值，而GBR類型之資料流需要較快速地被傳送至使用者裝置上。由圖2，MeNB為使用者裝置的資料平面(Data plane)與控制平面(Control plane)主要服務提供者，當使用雙連接技術時，使用者裝置的下行資料流(Downstream data)之分流與處理是由MeNB的PDCP層來負責，也就是說MeNB的PDCP層會決策將核心網路送達之下行資料流送交至MeNB的RLC層或是經由X2介面來送交至SeNB的RLC層，而被分流的下行資料流將於使用者裝置端的PDCP層來匯流後送交於使用者裝置上層。我們可以看到在此架構下，SeNB的存在可使得使用者裝置能獲取額外之下行資料流服務，或亦分擔MeNB的負載來提升整體網路之吞吐量。在此架構下，使用者裝置的上行資料流(Upstream data)僅藉助MeNB來傳送至核心網路。

在LTE/LTE-A網路中，下行資料的無線資源被切割為無線資源區塊(Radio resource block)為單位，基地台的媒體擷取層於每傳輸時間間隔(Transmission time interval, TTI)時間(通常為1 ms)做一次資源分配決策，該決策將決定下一個TTI區間時間內，每個與其連線的使用者裝置可以分配到之無線資源區塊數量。在決策前，基地台之媒體擷取層蒐集來自使用者裝置之頻道品質回報(Channel quality indictor, CQI)數值 (CQI數值越高，則代表訊號越好，亦即可使用較高之傳輸速率)，接著依據網路業者所決定之自適應調變與編碼演算法(adaptive modulation and coding, AMC)來決定該使用者裝置可以於一無線資源區塊時間內使用何種調變與編碼方法(modulation and coding scheme, MCS)，根據MCS結果，媒體擷取層便可選定該使用者裝置於一個無線資源區塊可以搭載的資料量(以bit為單位)，接著計算並分配適當數量的無線資源區塊給予該使用者裝置。此外，在分配無線區塊資源時，媒體擷取層亦可參考無線乘載上所設定之QoS參數設定值，較高優先權之資料流可以有較高的機會被優先處理。

在此研究中，我們提出保障使用者裝置下行資料流的服務品質(Quality of service, QoS)的資料排程方法，我們所提出的方法分為兩個階段，首先在第一個階段的方法中，我們提出一個下行資料分流方法，當收到網際網路的資料流時，MeNB決策是否要將部分的資料流轉導至SeNB，所提出的方法考量資料流的QoS等級，當執行分流決策時，所提出的方法盡量地確保資料流因為轉導而造成封包被丟棄的現象。而在執行完分流決策後，接下來我們提出基地台的媒體擷取層排程方法，所提出的方法亦考量資料流的QoS等級，並且讓快到期以及封包丟棄率高於一定水平的資料流能有較早的傳輸機會。本研究所提出之方法與先前技術相比有以下幾點的特點與貢獻：首先在分流決策上，我們將資料流的QoS參數以及基地台的無線資源納入分流考量，而分流計算之目標為能夠最大化網路之吞吐量，所提出之方法預計能夠於多項式時間(polynomial time)快速地執行結束，並且能應用於需要快速決策結果之基地台無線資源控制機制上。在媒體擷取層排程決策方面，我們所設計之方法通盤考量資料流之QCI、CQI以及剩餘傳送時間等參數，並考慮不同QCI間的資料可以混合比較，所設計之方法能夠在不將封包丟棄之狀況下盡量地滿足最大化網路吞吐量與資料流之QoS。

2. 文獻探討

我們首先討論關於LTE-A雙連接技術相關之文獻。參考文獻[2]描述使用雙連接技術的異構網路中，使用者裝置該如何選擇服務基地台(Serving eNB)以獲取最大的下行資料流量，所提出之方法推估使用者裝置連接狀況所帶來之干擾效應，並且計算每個使用者裝置理論上之資料流速率，所得到之資料流速率總和輔以所提出之公式來計算裝置的連線目標可能有三種結果: (i)僅連接至MeNB、(ii)僅連接至SeNB或(iii)連線至MeNB與某一SeNB，然而該方法僅依據使用者裝置回報之訊號品質來做理論速率之判讀，因此可能不符合實際網路狀況，且所提出之方法亦無考慮該如何執行資料流分流。參考文獻[3]提出雙連接網路之資料分流方法，在所提出之方法中，SeNB固定回報使用者的連線能力和滯留在SeNB的暫存資料量給MeNB，此文獻將所蒐集到之資訊整合至一線性規劃公式，該公式的目標式為最大化網路整體之吞吐量，而伴隨之產物為整體的分流規劃，在每經過一固定之時間週期，MeNB利用該線性規劃公式來計算各個資料流於MeNB與SeNB的分流比例。參考文獻[4]提出一個使用non-orthogonal multiple access (NOMA)技術來提升MeNB與SeNB之傳送效率，有別於使用時間或是頻率來當作無線多工技術，NOMA提出將傳送功率也做為是一個可以分離訊號之維度，類似於[3]之方式，該作者定義一個利用以NOMA技術為基礎之線性規劃來計算分流比例。參考文獻[5]提出了一個公式來計算使用者裝置同時接收來自MeNB與SeNB的資料可以為使用者裝置帶來多少額外的效益，並且用使用者裝置所量測到之SINR數值和資料流之平均延遲來計算應該將多少比例之資料交由SeNB代為傳送。參考文獻[6]提出一個能增加節能效益之分流方法，其主要概念是利用頻寬、訊號品質以及使用者裝置所使用之功率來計算整體的能源效益，接著選擇能較為省電之SeNB來代傳資料。參考文獻[7]中介紹一個雙連接網路MeNB與SeNB資料分流方法，在此論文中，使用者裝置的資料流被分為前景資料(具雙連接裝置之資料)與背景資料(其它裝置之資料)，所提出之方法觀測MeNB與SeNB之暫存資料量與使用者裝置之訊號強度來決策該如何分流資料，並且分流時以前景資料為優先，藉此設定來提升網路吞吐量，然而決策時獨厚前景資料流而忽略其它單一連結之使用者裝置，因此可能不適用於實際網路環境。參考文獻[8]提出一個可使得網路資料流比例較為公平之分流方法，其觀察為若一使用者裝置距離SeNB很近，則意味著該使用者裝置能收到較多資料量，該論文提出一個機制來使得使用者裝置能公平地於MeNB與SeNB所能獲取近似的總資料流速率，但為了達到公平性，所提出之方法可能使得MeNB耗費過多的資源給予訊號較差之使用者裝置。雖然以上討論之參考文獻([3][4][5][6][7][8])提出決策資料流分流方式與比例，但這些方法在執行分流決策時並沒有將資料流之QoS設定納入考量。在參考文獻[9]中，使用者裝置建構一個將其資料流之QoS參數、傳輸能量消耗以及線路費用等三個因子整合之花費，該花費公式是依據賽局理論概念來實現，接著MeNB在蒐集了所有使用者裝置之花費後，可依造花費之多寡來分配系統資源給予使用者裝置，所提出之方法綜合考量多個影響使用者裝置效能之參數，但是所提出之方法需要先利用使用者裝置之運算核心做計算，然而所提出之計算過程需耗費不少運算時間才得以完成，也因此亦耗費使用者裝置之電量，並且可能因運算過久造成回報過時資訊給予MeNB。

在LTE/LTE-A網路中，基地台的媒體擷取層定期執行排程演算法來決定下行資源的配置，目前有不少的排程方法已被提出，這些方法可以依據有無考量QoS參數來被分為兩大類。首先在無考量QoS參數之排程方法中常見的排程方式有三種，第一種為Round robin (RR)，在RR的方法中，每個使用者裝置有相同的機會來共享無線資源，這樣子的排程方法的缺點是訊號品質較差之使用者裝置亦會得到相同的資源，因此可能會降低系統的總吞吐量。第二種為Max CQI，在這個方法中，每次排程皆選擇通道品質(Channel quality)較佳之使用者裝置給予較多之資源，然而這樣子的方法的好處是整體系統的吞吐量可以有效的提升，但缺點是通道品質較差的使用者裝置則因為沒有分配到資源或被分配到較少資源而導致會有較差的使用者體驗。第三種為Proportional fair (PF)，PF方法的設計是要在RR與Max CQI方法間取得一個平衡之方法，此方法嘗試公平地分配資源，並且同時間考慮最大化系統的吞吐量，其方法為考慮使用者裝置當前的通道品質與其歷史的平均傳輸資料流速率間的比值來決定其優先順序，比值越高的使用者裝置，則可以有較高的優先權可以取得無線資源。接下來我們討論考量QoS參數之排程研究，首先參考文獻[10]計算每個封包所剩餘的傳輸時間 (Head of line packet delay)由低至高做升序排列，在資源分配的時候，優先選擇剩餘的可傳輸時間較少的封包所相對應的資料流來傳輸。參考文獻[11]將封包剩餘傳輸時間、封包遺失率、以及使用者裝置的通道品質納入計算優先權時的依據，該作者的目標是希望能在控制封包遺失率於一標準值的條件下，來盡量地維持所有資料流的公平性。然而參考文獻[10][11]的方法雖然可以有效地降低封包遺失之機率，但是沒有考量到整體的系統效能以及不同QoS等級的資料流間的比序。參考文獻[12]修改了RR與Max CQI的方法來加入考量資料流QoS比序，在所提出的QoS RR方法中，QoS等級較高的服務可以獲得額外資源，而在QoS Max CQI方法中，較高優先權且CQI數值較高的使用者裝置可以優先被配置到無線資源。參考文獻[13]中，作者將資料流分為即時與非即時兩種，所提出的方法優先分配資源給即時性資料流。雖然參考文獻[12][13]所提出的方法可以給予QoS較高的資料流較多的資源，但是並沒有考慮到封包的傳輸剩餘時間，並且可能使得較低優先權之封包被捨棄。參考文獻[14]討論在小細胞網路下來達到QoS排程之方法，作者的目標為在高負載的網路中亦要能夠保障串流資料的服務品質，所提出之方法利用一個可以動態調整之權重值來執行排程，並且保證高優先權的資料流可以取得一定數量之資源。接著參考文獻[15]提出一個兩階段的排程方法，首先第一階段的排程依據封包剩餘傳輸時間來給定資料流優先權順序，接著對於較低優先權之資料流則是使用類似於PF的排程方式來保證分配資源給予低優先權之資料流。參考文獻[17]中，作者提出一個兩階層之排程架構，首先第一階層次作者利用賽局理論來達到各個QoS等級內資料流的公平性，接著在第二階層作者利用背包客演算法來給予無線資源。然而我們發現到為了達到封包不掉落之目的，參考文獻[14][15][17]所提出的方法可能耗費過多無線資源來支援訊號品質較差之使用者裝置。在參考文獻[16]中，作者提出以線性規劃公式為基礎之排程方法，在所提出之線性規劃公式中，作者考慮了所有可能影響排程效果之因子，並以整體系統面之角度來評估所有資料流的QoS，而我們發現到參考文獻[16]所提出之方法複雜度過高，且亦無法整合於LTE-A系統利用無線資源區塊(Radio resource block)分配資源之機制。

3. 系統模型

給定一個LTE-A Pro雙連接型態之網路，該網路由一個MeNB和*l*個SeNB組成(標示為集合*S*={*s*1, *s*2, …, *sl*})，我們假設MeNB與SeNB的工作頻帶是隸屬於不同的頻率上，也因此MeNB與SeNB間的無線訊號並不會相互干擾。在本研究中，我們將MeNB和*l*個SeNB之間的X2介面連線的負載能力標示為*Rbh*(*s*1), *Rbh*(*s*2), …, *Rbh*(*sl*)。網路中有*m*個使用者裝置(標示為集合*U*={*u*1, *u*2, …, *um*})，使用者裝置們的連線狀態可以被分為兩個集合，分別為: (1) *UM*集合，該集合表述僅與MeNB連線的使用者裝置，(2) *UC*集合，該集合表述使用雙連接技術同時與MeNB與一SeNB連線的使用者裝置。我們假設*m*個使用者裝置共產生了*m*個無線乘載(Radio bearer)，這些無線乘載分別標示於集合*B*={*b*1, *b*2, …, *bm*}，按照無線乘載所屬之使用者裝置的連線狀況，這些無線乘載們亦可以相對應的分為兩個集合*BM*及*BC，*為了簡化表示方式，我們定義無線乘載*bi*為屬於使用者裝置*ui*之無線乘載，該無線乘載亦即代表使用者裝置*ui*之下行資料流。在此網路中，對於一個無線乘載*bj*我們標記其資料流速率(incoming rate)為*rin*(*bj*)，而每個無線乘載都會被指派一個QCI等級，由QCI等級，我們可以得知該無線乘載的資料流所能容忍之延遲(latency)時間(標記為*lmax*(*bj*))。在本研究中，我們令*lmax*(*bj*)為封包到達MeNB的PDCP層後起算直到封包傳遞至使用者裝置的可容忍之延遲時間。

4. 下行資料分流方法

在這一節，我們提出使用者的下行資料於MeNB與SeNB間分流的方法，我們提出一個線性規劃公式來評估網路內的所有資料流分流比例，令MeNB在每週期重新執行所設計之分流決策(*k*為一個系統參數值)，所設計的線性規劃公式的目標式為最大化系統總吞吐量，並能由計算結果決定出每個無線乘載(資料流)該分流到對應之SeNB的比例。也就是說，對於一個無線乘載*bj*，我們將決定一*rsp*(*bj*)數值，該參數代表著無線乘載*bj*上的資料流分流到SeNB之資料流速率(Data rate)，在上述的討論中 *rsp*(*bj*)為變數，將於接下來線性規劃公式求解時來計算出。在所設計的線性規劃公式中，我們尚需定義以下參數：

1. *Rbmax*­: 代表一段*It*週期內，MeNB與SeNB可以使用的最多無線資源區塊(Radio resource block)總數量。
2. : 代表使用者裝置*ui*目前連接至SeNB *sk*
3. 與: 由於網路無法即時完全地處理完使用者裝置的下行資料，因此這兩個參數分別代表使用者裝置*ui*的下行資料暫存於MeNB與SeNB的資料量。
4. 與: 代表*下一段It*週期內，MeNB與SeNB所*預估*可以分配給使用者裝置*ui*的資料量，這兩個參數的計算分別為:  
   其中與為MeNB與SeNB可以分配給使用者裝置*ui*的無線資源區塊數量，此參數為變數，將於接下來線性規劃公式求解時來計算出。與為使用者裝置*ui*可於MeNB與*ui*所連接之SeNB的一無線資源區塊可乘載的資料量(此資料量數據為一個估計值，其計算方式為藉由前一段時間裝置*ui*的平均CQI回報值來預估)。
5. 與: 由於一個使用者裝置*ui*的無線乘載*bi*可能由MeNB或是MeNB與SeNB同時服務，因此與代表著*ui*的資料流對應於MeNB與SeNB上的資料流速率，可以分為下列兩種狀況：(1) 若(此*ui*的資料僅透由MeNB服務)，則且。(2)若(此*ui*的資料由MeNB與SeNB 來服務)，則且

在此研究中，所提出之線性規劃公式的目標式為最大化系統的總吞吐量，也就是下一個階段*It*，MeNB與所有SeNB分配給所有使用者裝置的資料量總和。

subject to

*C1: ,*    
*,*

*C2:*

*C3:*

*C4:*

*C5: , for MeNB*

*C6: ,*

*C7: , and*

*C8: ,*

首先在限制式C1中，若無線乘載*bi*是屬於*BC*集合中的，則代表*bi*所對應之使用者裝置*ui*同時被MeNB與SeNB所服務，因此*bi*是可以分流的，此時*bi*分流到SeNB的資料流速率必定小於或等於*bi*原始資料流速率。而另外一方面，如果*bi*是屬於*BM*集合中的，此時則代表*bi*所對應之使用者裝置*ui*僅被MeNB所服務，因此*bi*是不可以分流的，也就是。在限制式C2中，對於任一使用者裝置*ui*而言，在下一*It*階段所預估可以於MeNB傳輸的資料量必定是小於等於以下兩點(i)與(ii)的總和: (i)當前*ui*遺留於MeNB的資料量、(ii) *ui*下一個階段時間*It*需透由MeNB來傳送的資料量，也就是與*It*與乘積。於限制式C3對於任一同時連接於MeNB與SeNB的使用者裝置*ui*而言，在下一*It*階段所預估可以於SeNB傳輸的資料量必定是小於等於以下兩點(i)與(ii)的總和: (i)當前*ui*遺留於SeNB的資料量、(ii) *ui*下一個階段時間*It*需透由SeNB來傳送的資料量，也就是與*It*與乘積。接著限制式C4裡頭對於任一個SeNB *sk*而言，我們可以找到相對應與*sk*建立雙連接的所有使用者裝置*ui*以及其對應之無線乘載*bi*，此限制式規範分流至SeNB *sk*的資料流速率的總和不能超過MeNB與SeNB間的X2介面連線的負載能力。限制式C5中對於MeNB而言，我們可以於下一個*It*階段可以分配的所有無線資源區塊(resource block)總量必定會大於等於下一個*It*階段分配給各個使用者裝置的無線資源區塊總和。類似於限制式C5，限制式C6中對於任一個SeNB *sk*而言，我們可以於下一個*It*階段可以分配的所有無線資源區塊總量必定會大於等於下一個*It*階段分配給連接至*sk*的使用者裝置之無線資源區塊總和。限制式C7規定對於可以分流到SeNB的無線乘載*bi*而言，我們需要保障分流到SeNB的資料流可以於可容忍之延遲時間內被處理掉，而分流後所造成的延遲為以下兩點(i)(ii)的總和: (i)第一個為MeNB與SeNB間的X2介面連線所造成的傳輸延遲，也就是下一階段*It*所分流的資料總量除以所對應之X2介面的負載能力、(ii) 第二個為送交至SeNB後的處理時間，針對*ui*所對應的*bi*而言，SeNB需要先處理的暫存資料量加上下一個*It*階段的分流資料量，而處理的時間可以估算為這些資料量除以所預估下一個階段*ui*的傳輸能力。最後，承限制式C7，在限制式C8中，SeNB處理使用者裝置*ui*分流加上暫存的資料時間必須小於等於下一階段*It*所分配給*ui*於SeNB上的無線資源區塊數量乘上一個無線資源區塊的單位時間(也就是*It*數值)。由以上之公式，我們所需要處理的變數為與 (對於所有的*ui*於*U*集合中)以及 (對於所有的*bi*於*B*集合中)，所需處理之變數數量小於整體公式之總量，亦即上述之線性規劃公式可以找到一組最佳解。

5. 基地台QoS排程決策方法

在上一節的分流策略設計中，所提出之目標式為最大化系統總吞吐量，然而在實際網路運作系統吞吐量之多寡得取決於媒體擷取層(MAC layer)的排程結果，在本節，我們提出媒體擷取層排程方式，在LTE-A Pro網路中，當使用者裝置的資料傳送至MeNB或SeNB時，媒體擷取層將會依據使用者裝置所回報之訊號品質、資料流之優先權、剩餘資料量以及剩餘傳送時間等因素來決定每個TTI的無線資源區塊(Resource block)該如何分配。在3GPP的QoS標準中QoS class identifier(QCI)之定義封包區分為兩大類: Guarantee bit rate (GBR)封包和non-GBR封包，其中GBR封包對於延遲及封包過期導致packet lost較為敏感，在我們提出的方法中首要目的就是確保GBR封包可以在符合延遲要求，以及避免packet drop的情況下能順利傳送完成。

在所提出的方法中，媒體擷取層為每一個資料流維護一個佇列(Queue)，在每個排程週期到達時，所設計之排程方法在封包佇列中進行運算，並且將符合特定條件之GBR封包進入一個Guarantee to transmit (GTT)群組中，在GTT群組中，所設計之方法將再次計算並藉此取得新的優先順序。最終，封包傳遞的順序將為優先自GTT群組中分配無線資源區塊，再由媒體擷取層封包由各個資料流佇列中挑選資料流來分配無線資源區塊。所提出之方法亦會保障不會讓non-GBR封包產生飢餓問題(starvation)。

接下來我們講述該如何判斷哪些封包滿足GTT群組之條件。首先在每個TTI期間，所提出之方法先對封包佇列的所有封包來計算其是否已經過期，若是已經過期了，則會將該封包直接丟棄。若某封包即將到期，我們則依據目前使用者裝置與基地台間的訊號品質狀態，來判斷是否可能無法在時限內傳送完成，首先假設一個封包*p*，我們首先預估傳送封包*p*所需要的時間，令為封包*p*的大小，而為封包*p*所對應的使用者裝置之預估的下行資料速率，因此我們可以得到封包*p*的預估傳送時間為。接著藉由查詢封包p的QoS要求，我們可以預估是否時間已經超出封包*p*剩餘可使用的傳輸時間()，若是則先將封包*p*先行丟棄。

在執行完上述步驟後，對於所有的資料流剩下都所有封包都是能夠在時限內完成傳送封包，接著我們辨別封包為GBR封包或non-GBR封包，針對某個GBR封包p，若該封包滿足下列不等式，我們則會將封包*p*劃分進入GTT群組。

在上述的公式中為封包*p*之QoS容許傳送時間。為封包*p*之QoS容許遺失率(lost rate)。接下來為封包p所處的資料流當前的真實封包遺失率。在上述的公式中，小於等於符號的左式可以視為是門檻值，這個門檻值與右式的計算值會一直隨著時間而動態地變動。接下來我們討論上述算式之設計意義：首先在上述的算式左式中，第一組分式計算封包*p*剩餘傳送時間與其QoS標準中傳送時限比值，藉此我們可以取得剩餘時間佔QoS時限之比例，該分式結果為0到1數值若越接近1則代表剩餘時間越大，所影響門檻會增大。而左式的第二組分式則是將QoS標準QCI表中對應容許的封包遺失率門檻轉換為參數，由於封包遺失率門檻是一個相當小的小數，我們需要將其轉換為數量級以影響門檻算式，為此將其取log值，又因為該數字本身是一個相當小的小數，因此取log值後是負數，因此再多加入一負號維持算式正負特性。

接著，算式右式中，第一組分式取得預計傳送時間佔剩餘時間之比例，當封包p的剩餘傳送時間越少，則會使得左式越小而右式越大，也因此使得上述的式子成立的可能性越大。而若是所預估的傳輸時間越長(例如封包較大，或是訊號變差)，也會使得上述式子成立的機會越高。最後，上述算式右式的第二組分式則是將該資料流實際封包遺失率轉換為算式參數，如同左式第二組分數相同，資料流實際封包遺失率也是一小數，為此將其取log，取得其次方再行取負號維持，正負特性，若所計算的結果實際封包遺失率越高，則會使得右式超越左式門檻的機會越高。

當選擇封包*p*進入GTT群組後，所提出之方法會再計算封包*p*於GTT群組的優先權數值，其計算方式如下：

其中為封包*p*所連結到的資料流之QoS QCI對應參數QCI值數字越小對封包標準及限制越高，也因此優先權越高。為封包*p*的剩餘傳送時間，剩餘的傳輸時間越小，則需要給予封包較高的優先權。最後為封包*p*所對應的使用者裝置回報之CQI值，若該數值越大則代表訊號越強，亦即使用者裝置可使用較大之編碼率來傳輸資料，由於我們的目標為提高系統吞吐量，因此若該使用者裝置訊號越強，該封包優先順序也較大。

對於每個在GTT群組的封包*p*，所提出的方法會計算上述之數值，接下來依據每個封包所計算的值做排序，若值越小，則優先權越高。最後，無線資源分配的方式則是先根據GTT群組計算之封包之優先順序，優先分配資源，在GTT集合內封包分配完全後，若有剩餘之無線資源區塊亦可以依據QoS等級基於現有媒體擷取層排程依序分配所剩下的無線資源區塊。

6. 模擬結果

7. 結論

在本論文中，我們提出一個兩階段的排程方法來支援雙連接網路的下行資料處理，在所提出的方法中，第一階段的方法我們先決定資料如何地於MeNB以及SeNB間分流，第二階段的方法我們再決定資料於基地台處該如何地傳送，所提出的方法主要考量能保障QoS資料的傳輸成功率，由模擬結果顯示，所提出的方法也能確實地保障QoS資料能夠被成功傳送，並且也能夠顯著地提升系統吞吐量。

參考文獻

[1] LTE QoS Class Identifier. https://en.wikipedia.org/wiki/QoS\_Class\_Identifier

[2] Y. Shi, H. Qu, and J. Zhao, “Dual connectivity enabled user association approach for max-throughput in the downlink heterogeneous network”, Wireless Personal Communications, 96(1), 529-542, 2017.

[3] M. S. Pan, T. M. Lin, C. Y. Chiu, and C. Y. Wang, “Downlink traffic scheduling for LTE-A small cell networks with dual connectivity enhancement”, IEEE Communications Letters, 20(4), 796-799, 2016.

[4] Y. Wu and L. Qian. “Energy-efficient NOMA-enabled traffic offloading via dual-connectivity in small-cell networks”, IEEE Communications Letters, 21(7), 1605-1608, 2017.

[5] H. Wang, C. Rosa, K. Pedersen, “Dual connectivity for LTE-advanced heterogeneous networks”, Eurasip Wireless Networks, 22(4), 1315-1328, 2016.

[6] A. Prasad, A. Maeder, “Backhaul-aware energy efficient heterogeneous networks with dual connectivity”, Eurasip Telecommunication Systems, 59(1), 25-41, 2015.

[7] P. Taksande, A. Roy, and A. Karandikar, “Optimal traffic splitting policy in LTE-based heterogeneous network”, in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2018.

[8] S. Singh, M. Geraseminko, S. P. Yeh, N. Himayat, and S. Talwar, “Proportional fair traffic splitting and aggregation in heterogeneous wireless networks”, IEEE Communications Letters, 20(5), 1010-1013, 2016.

[9] A. Awad, A. Mohamed, and C. F. Chiasserini, “Dynamic network selection in heterogeneous wireless networks”, IEEE Consumer Electronics Magazine, 6(1), 53-60, 2017.

[10] K. Sandrasegaran, H. Ramli, and R. Basukala, “Delay-prioritized scheduling for real time traffic in 3GPP LTE system”, in Proc. of IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), 2010.

[11] N. Khan, M. Martini, Z. Bharucha, and G. Auer, “Opportunistic packet loss fair scheduling for delay-sensitive applications over LTE systems”, in Proc. of IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC), 2012.

[12] O. Gemici, I. Hokelek, and H. Cirpan, “Trade-off analysis of QoS-aware configurable LTE downlink schedulers”, in Proc. of International Conference on Telecommunications (ICT), 2013.

[13] C. Wang and Y. Huang, “Delay-scheduler coupled throughput-fairness resource allocation algorithm in the long-term evolution wireless network”, IET Communications, 8(17), 3105-3112, 2014.

[14] E. K. Hong, J. Y. Baek, Y. O. Jang, J. H. Na, and K. S. Kim, “QoS-guaranteed scheduling for small cell networks”, ICT Express, 2018.

[15] N. K. Madi, Z. M. Hanapi, M. Othman, and S. K. Subramaniam, “Delay-based and QoS-aware packet scheduling for RT and NRT multimedia services in LTE downlink systems”, Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, 2018(1), 2018

[16] S. Chaudhuri, I. Baig, and D. Das, “A novel QoS aware medium access control scheduler for LTE-advanced network”, Computer Networks, 135, 1-14, 2018

[17] N. Ferdosian, M. Othman, B. M. Ali, and K. Y. Lun, “Fair-QoS broker algorithm for overload-state downlink resource scheduling in LTE networks”, IEEE Systems Journal, 99, 1-12, 2017

[18] GLPK (GNU Linear Programming Kit. https://www.gnu.org/software/glpk/.

[19] NS-3 LTE module. https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte.html

[20] LTE-sim. https://github.com/lte-sim/lte-sim-dev

[21] 3GPP, “3GPP contribution R2-132859: Throughput evaluation and comparison of with and without UP bearer split,” Aug. 2013.