#### **目錄**

[**目錄** 1](#_Toc17368735)

[**第一章** **緒論** 2](#_Toc17368736)

[1-1前言與動機 2](#_Toc17368737)

[1-2論文架構 6](#_Toc17368738)

[**第二章** **文獻回顧** 7](#_Toc17368739)

[**第三章** **網路架構** 10](#_Toc17368740)

[**第四章** **排程** 11](#_Toc17368741)

[4-1基地台QoS排程決策方法 11](#_Toc17368742)

[4-2 流程 12](#_Toc17368743)

[4-3 GTT決策 13](#_Toc17368744)

[4-4 GTT優先序 15](#_Toc17368745)

[4-5分配無線電資源塊 16](#_Toc17368746)

[**第五章** **模擬實驗** 18](#_Toc17368747)

[**第六章** **結論** 19](#_Toc17368748)

[**參考文獻** 20](#_Toc17368749)

#### **緒論**

##### 1-1前言與動機

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。LTE使用OFDMA技術處理下行資料流並且分配無線電資源塊(resource Blocks)，但是LTE資料流排程問題，在3GPP標準中並沒有明確規範並且針對性討論此問題。另一方面，3GPP將LTE資料流分類為Guarantee bit rate(GBR)與non-GBR兩大類，在現有排程方法中，大多數將針對GBR給予優先權，以確保QoS標準，但此方法可能造成non-GBR無法取得足夠無線電資源塊造成飢餓問題，在第五代行動網路服務尚未發展成熟與建置完整之前，基於現有架構下，需要更有效率處理下行資料流的排程方法，因應日漸增加的數據量。本文提出基於QoS的排程方法能夠在保證GBR能夠符合QoS標準，並且能夠增加non-GBR吞吐量，確保有足夠資源。

在本文，我們主要探討使用者裝置的下行資料流排程問題。在3GPP基地台架構中，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)。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。

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。

如上所討論，媒體存取控制層負責即時決定使用者裝置於一個TTI內可以使用之無線資源區塊數量，然而大部分的媒體擷取層排程機制僅考慮優先處理QoS等級較高之資料流，但若是一昧地優先處理優先權高的資料流則可能會耗費過多的無線資源進行較無效率之傳輸，也因此造成優先權較低之資料流無法被即時地處理，因此我們需要討論在盡量不讓下行資料流封包因為傳送時間到期而被丟棄的條件下，該如何有效地排程下行資料流的傳送順序，而所決定之順序亦不能造成違害優先權高之資料流之權益與造成優先權低的資料流無法傳送。

上述觀察結果促使我們開發基於QoS排程算法，以有效地增進LTE流量調度問題。除了提高LTE傳輸效率外，我們的QoS排程算法還有兩個主要目標：1）滿足GBR的QoS時限以及封包遺失率要求， 2）確保non-GBR的數據傳輸。第一個目標意味仍需要確保GBR優先權與有足夠資源，而第二個目標表明我們應該確保non-GBR仍然有足夠資源進行傳輸。為此， QoS排程算法不僅考慮每個流的信道質量、封包此刻狀態，還考慮其QoS指標（QCI）。QoS排程算法設計動態閥值條件式，該條件是式加入連線狀態與QCI以及封包本身狀態進行計算，用以判斷GBR封包狀態。並且額外群組GTT，用以分類出已經進入較緊急狀態GBR，確保GBR符合QoS標準，因此它可以提高傳輸效率並有利於GBR流量。然後，QoS排程算法通過考慮盡量減少封包因為超過時限而被丟棄，以減少封包遺失比率。

本文有以下貢獻：

1. 提出估計封包所需時間算法：本文提出封包傳送所需時間估計算式，以判斷該封包是否有能力在QoS標準時限內傳送完成。
2. 提出動態閥值算式：本文提出基於GBR狀態動態閥值算式，該算式同時考慮連線狀態與封包狀態，並且可符合不同GBR標準。
3. 從結果顯示在滿足GBR要求下，在non-GBR也可以順利傳送完成。

##### 1-2論文架構

#### **文獻回顧**

隨著LTE/LTE-A提升資料傳輸速度，以至於近年來多媒體應用服務的使用量大增，參考文獻[22]QoS標準的制定讓封包可以有較好的分類依據，本篇論文也依據QoS標準相關規範設計。

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。參考文獻[21]中，作者提出四階段排成方法，第一階段，利用CQI進行分配無線電資源塊，第二階段，丟棄無法在時限完成傳送封包，第三階段，回收過多或是並未使用的無線電資源塊，第四階段，若仍有未分配無線電資源塊，在此階段分配。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。

最後，根據我們的調查，本計畫與先前技術相比有以下幾點的特點與貢獻：。在媒體擷取層排程決策方面，本計畫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。

#### **網路架構**

在網路架構中，我們假設只有一個基地台eNB，與多個裝置組成，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={b1, b2, …, 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。

#### **排程**

##### 4-1基地台QoS排程決策方法

在前一章節的分流策略中，所提出的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多寡仍得取決於媒體擷取層(MAC layer)的排程結果，因此在這一章中，我們將討論基地台的媒體擷取層排程方式。如本文先前所討論，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。然而承如我們於參考文獻章節所討論，大多數的媒體擷取層排程方式是有著一定之決策順序：首先優先選擇優先權高的資料流佇列，接著再依據資料流佇列內資料的剩餘傳送時間再來做一個排序(其目的為讓快到期之封包來有機會先被傳送出去)，當處理完相同優先權的資料流後，再依照相同的流程邏輯來選擇剩餘資料流間最高優先權的資料流佇列來處理該佇列之資料。依據上述之邏輯，大多數的排程方法為先滿足較高優先權的資料流，即便較高優先權之資料流有較充裕的剩餘傳送時間，較低優先權之資料流還是無法先行傳送，並且造成較低優先權資料流的封包過期，也因此我們需要討論在滿足優先權的條件下，該如何盡量避免較低優先權之資料流無法在時限內送出資料。

在本文中，我們提出的解決方案之主要概念為依據暫存於基地台的資料流之狀態來重組所有資料流之優先權順序，並且盡量不讓封包因為過期而被丟棄，因此我們提出在媒體擷取層排程前先將所有資料流中符合條件式之GBR封包（傳送時間剩餘及其他參數條件TTI）加入一個即將過期封包集合(簡稱: GTT集合)中，以確保該封包能順利傳送。

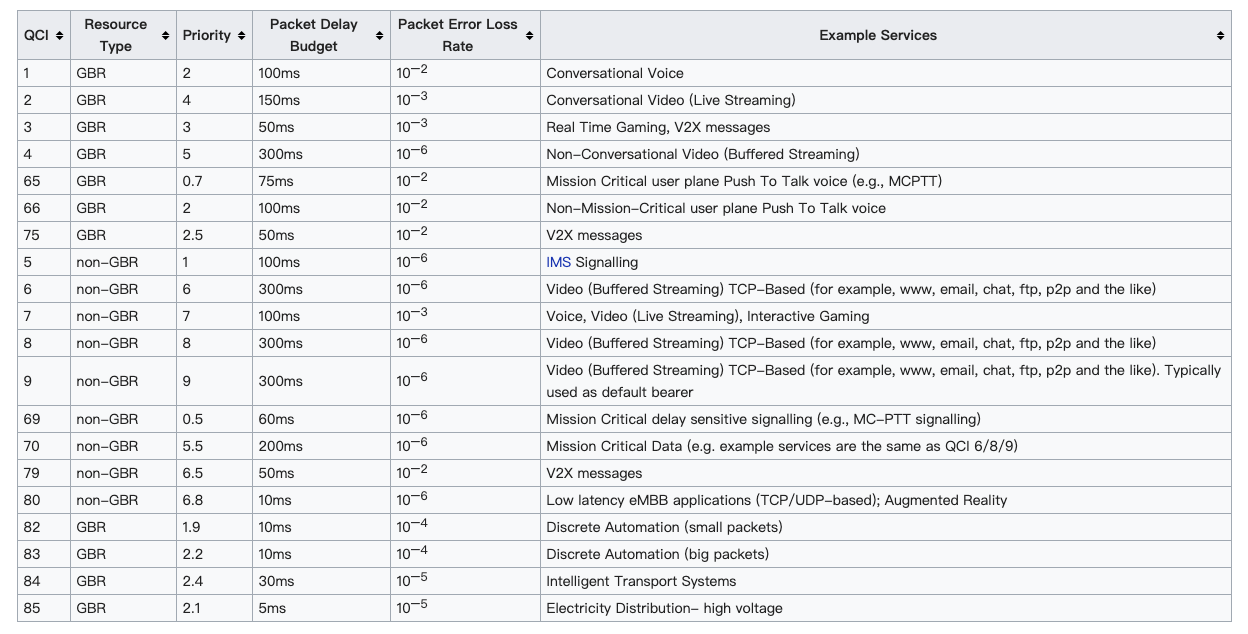
##### 4-2 流程

我們在本文中提出的QoS排程決策方法主要聚焦在兩個議題中，在*QoS*標準中QCI表將所有封包區分為兩大類，GBR封包和non-GBR封包，GBR封包對於延遲及封包過期導致調包（packet lost）較為敏感，然而在兩種封包中GBR封包是比較重要的，在我們提出的方法中首要條件就是確保GBR封包可以在符合延遲以及掉包情況下，能順利傳送完成，在大多數情況下UE與eNB間狀況不可能永遠保持一致，因此我們設計的方法在我們可預期狀況下都能處理不同狀況的連線。

在本文設計的排程方法（下圖）中，每一TTI皆在封包佇列中進行運算，使得符合條件之GBR封包進入GTT群組中，在GTT群組中再次計算取得新的優先順序，並且優先自GTT群組中分配無線資源區塊，再行由封包佇列中分配無線資源區塊，完成此TTI決策。

上述排程要求在大多數此類型論文中皆具備，在文獻回顧中我們也都能看到，處理有相當多不同的方法，也是符合QoS標準最基本的要求，但是在符合QoS標準的要求時可能會導致non-GBR封包飢餓問題（starving problem），本文提出的排程方法是基於確保non-GBR封包能夠成功傳送並且使得GBR封包能符合QoS標準要求。





##### 4-3 GTT決策

為了確保GBR封包能夠順利傳送並且符合QoS標準，我們必須對GBR封包進行辨識以及知曉目前封包狀況，因此在每一個TTI皆會在封包佇列中進行運算，讓需要優先處理的GBR封包進入GTT群組，以確保有優先順序可以取得無線電資源區塊，以免因為超過處理時間導致封包過期。

而在此之前，首先需要對現在封包佇列的所有封包，計算其是否已經過期，或是依據目前UE與eNB間網路狀態，無法在時限內重送完成。因此我們使用以下判斷式判斷封包是否需要直接被丟棄。

我們需要取得該封包需要，預計傳送時間，因此定義出使用以下算式 1。

* ：對應封包*p*大小。
* ：對應封包*p*之*CQI*資料流速率。

算式 1

我們取得封包p的大小，以及UE回傳之訊號狀態並且對應CQI編碼率計算資料流速率，將此兩變數相除以取得該封包在該訊號狀態下預計需要傳送時間，我們將此結果定義為方便後續算式計算。

當我們取得對應封包之預計傳送時間後，可以進一步計算該封包是否能在QoS標準對應之QCI表中時限傳送完成，為此我們設計以下條件算式 2。

* ：對應封包p之預計傳送時間。
* ：對應封包p之QCI表中規定下剩餘傳送間。

算式 2

在算式二中計算中的結果為，封包p在此狀態下預計完成傳送所需時間時間，而為在QoS表準中CQI表中對應該類型封包延遲時間表標準下所剩餘傳送時間，因此在兩參數相除後所得到結果若為大於1數字則代表分子預計傳送時間時間大於CQI中規定傳送時間所剩餘時間，因此該封包必須丟棄。符合算式三在進行後續步驟。

再經過上述三個算式後，剩下都所有封包都是能夠在時限內完成傳送封包，接著我們需要辨別封包為GBR或non-GBR，GBR再進行計算封包狀態是否需要進入GTT群組，為此我們提出以下算式 3門檻式判別GBR封包是否需要進入GTT。

* *tp*：對應封包*p*之剩餘時間。
* ：對應封包*p*之*QoS*容許傳送時間。
* *lp*：對應封包p實際的遺失比率（lost rate）
* ：對應封包*p之QoS*容許遺失比率（lost rate）
* ：對應封包p之預計傳送時間。

算式 3

上述算式四左式中，第一組分數中是為了計算該封包剩餘時間與其標準中傳送時限比值，以取得剩餘時間佔在標準時限之比例，該分數結果為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。

上述算是四左式，第二組分數是將QoS標準QCI表中對應容許的封包丟失率轉換為門檻參數，封包丟失率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，為此將期取log值，只取次方，又因為前面提過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。

上述算式四右式中，第一組分數與上述算式三相同，在此取得預計傳送時間佔剩餘時間比例，此分數得到介於0到1結果，當此數值越接近1時可能影響右式大於或等於左式越大，影響該分式越接近1可能狀態如下：1. 剩餘時間變小，越接近預計所需傳送時間。2. 在過程中某一TTI時，該UE訊號狀況變差，導致預計傳送時間上升。

上述算式四右式，第二組分數將該資料流實際封包遺失率轉換為算是參數，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，該參數則隨著封包遺失率越大該參數則變大。

上述算式左式為本文提出門檻式，兩組分數由QoS標準取其參數計算出，該門檻式會隨著實際狀況與時間，進一步動態下降門檻。右式則是該封包當TTI實際狀態，若該封包實際狀態超過左式門檻值時則該GBR封包就判定符合進入GTT群組。

##### 4-4 GTT優先序

進入*GTT*中之GBR封包仍需要進行重新排序以利再分配無線電區塊，因此，進入GTT封包再行利用以下算式 4進一步重新計算GTT中封包的優先順序，計算結果越小者則優先順序越高，反之亦然。

對於GTT集合內所有符合條件式之封包，我們依照其*Qn*(*.*)數值來做排序，若*Qn*(*.*)數字越小，則代表其剩餘時間較少、對應到之優先權較高、且所回報之CQI數值較大，也因此我們可以給予*Qn*(.)數值較小的封包較高之優先權，並且可以盡早被送出，反之若*Qn*(*.*)數字越大，則該封包之優先權較低。

在GTT集合中，依據每個封包對應的資料流之QoS等級、剩餘時間與使用者設備之訊號品質來做一個權衡考慮。我們假設此網路的所有資料流QoS等級有以下之特性: 若某個服務的優先權越高(或越低)，則會有一個較低(或較高)之QoS對應參數。也因此在決策時，對於一個封包*p*，我們可以得到下列三個參數值:

* 封包*p*所連結到的資料流之QoS對應參數: *qp*
* 封包*p*的剩餘傳送時間: *tp*
* 封包*p*所對應的使用者裝置回報之CQI值: *cp*

得到上述三個參數後，對於封包*p*，我們可以計算一個新的QoS數值:

算式 4

算式 4中，所代表QoS對應參數（也就是對應之QCI）值，程如上述圖中所演示QCI值數字越小對封包標準及限制揭越高，符合本文在此預設優先順序，因此放置於分子進行運算；為剩餘時間，剩餘時間基於剩下時間越小，需要給予封包較高的優先權，因此對於結果影響屬於數字大小越小，優先序越大，放置於分子；對應到使用者裝置所回報之訊號狀態，該數值屬於數字越大，訊號越強，若使用者裝置訊號越強可使用資料量較大之編碼率，對於該章節所得到最終目標提高吞吐量相關，因此若該使用者裝置訊號越強，該封包優先順序也應該較大，由於該數值與優先順序呈現反比，故該變數放置於分母。

##### 4-5分配無線電資源塊

計算結束後，則開始分配無線電資源塊，優先順序根據GTT群組中重新計算之封包之優先順序，優先分配無線電資源塊，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mac排成混合使用，基於這些封包依照給定排程依序分配剩下無線資源區塊。

本文中使用該方法排程意圖在確保GBR封包在符合QoS標準之延遲以及封包遺失標準傳送，該方法可以在確保封包在QoS標準內傳送，若該GBR封包已經有較高的遺失率（該UE可能訊號不良好）在該算式中已經有對其進行觀測並加入門檻算式中，對於訊號不良好知UE則會有滑動觀測時槽觀測，在UE回報訊號不良時，在編碼會進行調變，在單位RB可攜帶資料也會下降，因此該算式會對其封包有較大的剩餘時間冗余，期望在時間較充裕情況下可以讓其封包傳送完成。

對於其non-GBR封包是否會造成飢餓問題，在稍後的模擬實驗中會進行驗證，GBR封包是相對對於時間較為敏感之封包種類，但相對於每一封包容量較小，因此對於non-GBR封包影響在可預期範圍內，並且在上述門檻公式中會進入GTT群組之GBR封包為真正意義上重要且較為危急之封包，在影響上可看出確保在範圍內，在模擬實驗中可看到在確保吞吐量提升同時確保QoS並且non-GBR也不會被過度犧牲。

#### **模擬實驗**

#### **結論**

#### **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. (in press)

[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]You-Chiun Wang, Song-Yun hsieh,”Service-differentiated downlink flow scheduling to support QoS in long term evolution”

[22]3GPP,”3GPP TS 23.107:Quality of Service(QoS)concept and architecture”Dec.2015