

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

碩士論文

在 LTE 直接通訊中資源保留的效能分析

Performance Analysis of Resource Reservation in
LTE Direct Communications

研究生：江宗翰

指導教授：陳志成 教授

中華民國一〇一年七月

在 LTE 直接通訊中資源保留的效能分析

Performance Analysis of Resource Reservation in LTE

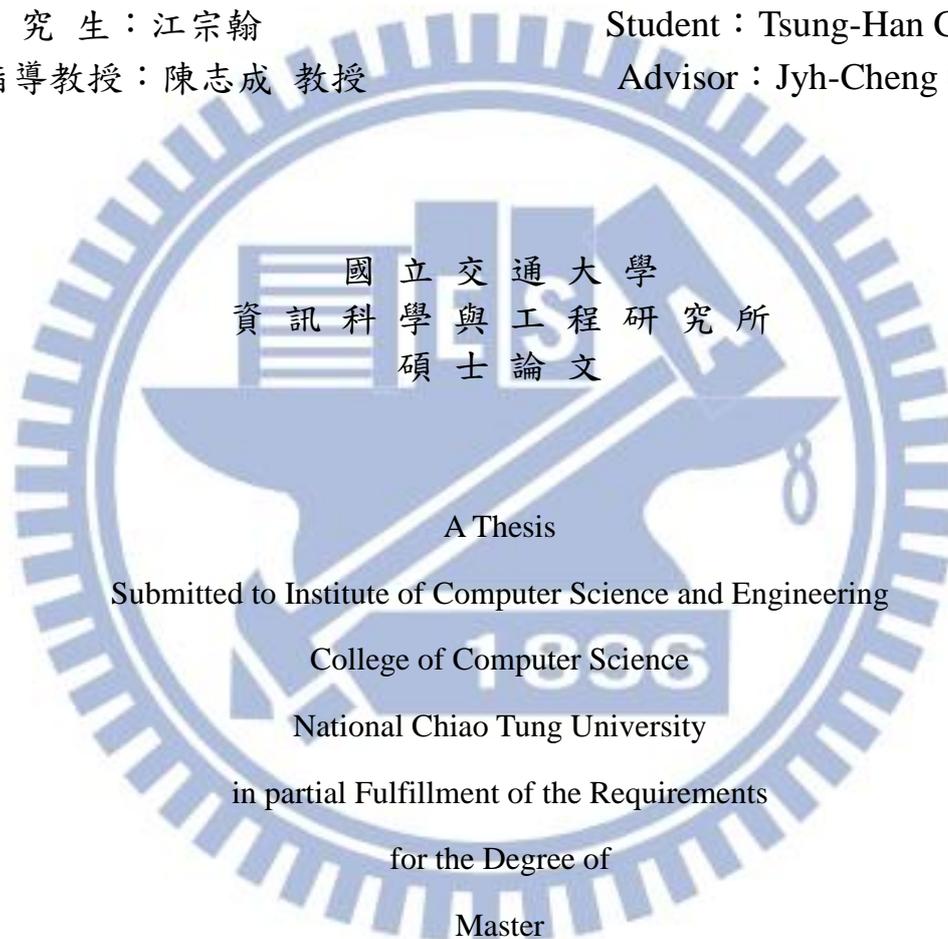
Direct Communications

研究生：江宗翰

Student：Tsung-Han Chiang

指導教授：陳志成 教授

Advisor：Jyh-Cheng Chen



in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Computer Science and Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

在 LTE 直接通訊中資源保留的效能分析

學生：江宗翰

指導教授：陳志成 教授

國立交通大學資訊科學與工程研究所碩士班

中文摘要

最近以鄰近為基礎(proximity-based)的應用服務日趨增加，這些應用服務主要是探測(discovery)鄰近有相同應用服務的裝置，並進一步的交換資訊。雖然目前一些通訊技術可提供這類的應用服務，例如：藍芽(Bluetooth)、WiFi Direct 等，但都有傳輸距離短、傳輸速率低、訊號容易受到干擾等缺點。因此，鄰近服務(proximity-based services, ProSe)在 3GPP 最近幾次會議中成為相當熱門的議題，希望藉由提升現有的 3GPP 標準技術以全面支援這類型的應用服務，並且可用於公共安全(public safety)的領域當中。雖然直接通訊能夠帶給使用者更大的便利性，也能降低系統不必要的負擔，但因為頻譜是有限的，如果大量的 D2D 使用者加入到系統中時，很有可能會大量影響原本在系統內的 cellular 使用者。因此本論文主要目的在於探討不同的 D2D 使用者數量對於原本在系統內 cellular 使用者的影響，並且針對這種影響提出一套改良的演算法。模擬結果證明我們提出的演算法能使 cellular 使用者保有一定程度的服務品質，另外我們也發現遺忘因子的值對於資源分配的公平性有很大的影響。

關鍵字：直接通訊、鄰近通訊、鄰近服務、長期演進

Performance Analysis of Resource Reservation in LTE Direct Communications

Student : Tsung-Han Chiang Advisor : Prof. Jyh-Cheng Chen

Institute of Computer Science Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

In recent years, proximity-based applications have become increasingly popular. One of the major purposes is to discover the devices installed the same applications such that information can be exchanged between these devices. Some communication technologies, such as Bluetooth and WiFi Direct, can support such applications. However, there are some weaknesses such as short communication distance, low transmission rate and susceptible to interference. Therefore, the 3GPP is now actively discussing on how to provide proximity-based services (ProSe) by using LTE. However, the throughput of cellular users will be affected when a large number of D2D users join to the networks because of the limited spectrum. Therefore, this thesis aims to explore the impact of different number of D2D users for cellular users. In this thesis, we propose an effective algorithm to solve this problem. The simulation results show that the proposed algorithm can guarantee the cellular user's throughput to a certain degree. The results also indicate that the *forgetting factor* has a significant impact on the fairness of resource allocation.

Key words: LTE Direct Communications, LTE Device-to-Device (D2D) Communications, Proximity Communications, Proximity-based Services

誌謝

很開心能夠順利的完成碩士論文，首先要謝謝我的指導教授—陳志成教授，因為有老師的細心指導，才讓我了解行動通訊網路這塊領域，從一開始的制定題目到最後的深入討論，老師都給予很大的幫助及鼓勵；也要謝謝宋映蓉博士以及劉仁煌學長提出的寶貴建議，每次的討論都能找到自己所沒發現的盲點，使得論文能朝著正確的方向邁進；同時也感謝林一平教授不辭辛勞地擔任這次口試委員並提供許多寶貴的意見。

另外也要謝謝實驗室的學長學弟們，在這兩年的研究生生活中，有了你們實驗室才會歡笑不斷。謝謝梁睿琦學長以及陳凱修學長，在剛起步的時候給予許多指導，也謝謝碩一的學弟妹們，有了你們接手研究計畫及打點實驗室的雜事，才讓我有更多時間能專注在研究論文上。

最後要謝謝我的家人在背後的支持與鼓勵，使得這兩年可以心無旁騖的專心學習並且無後顧之憂，沒有你們就沒有這篇論文。



目錄

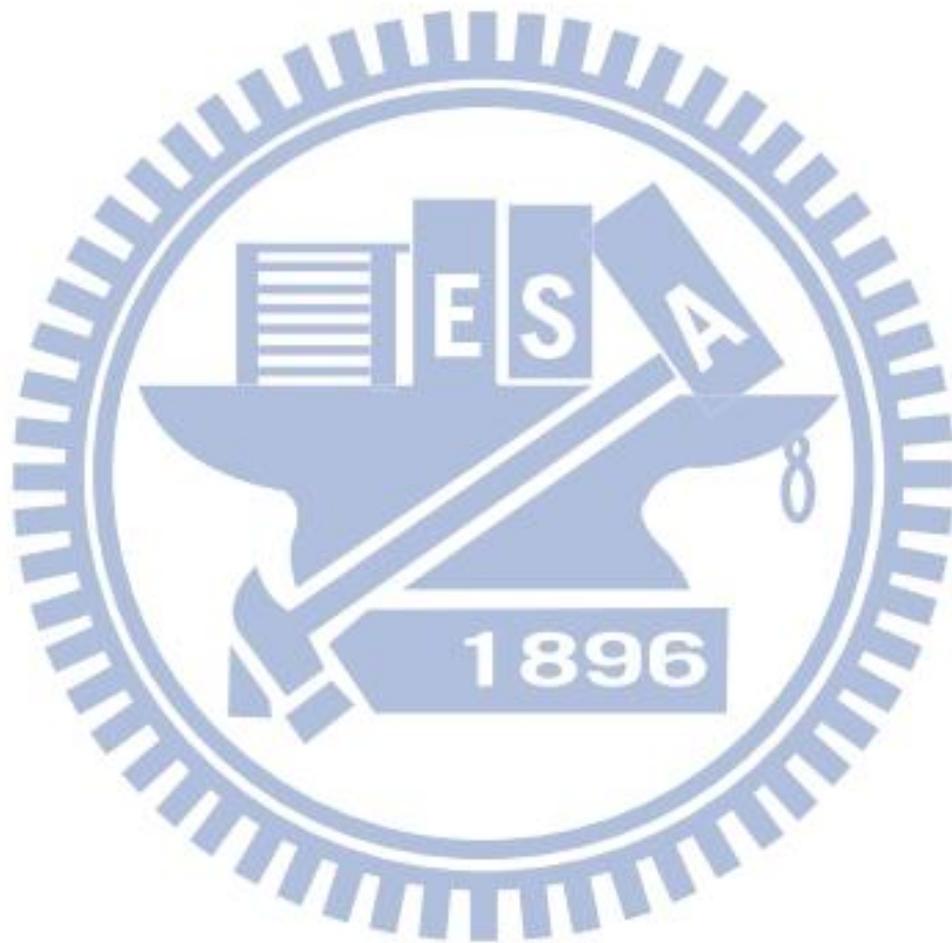
中文摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	v
表目錄	vi
一、 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 章節結構.....	3
二、 LTE 簡介	4
2.1 LTE 介紹.....	4
2.2 LTE 系統架構.....	5
2.3 LTE 傳輸技術.....	5
三、 資源配置演算法	9
3.1 Round-Robin Scheduling.....	10
3.2 Proportional Fair Scheduling.....	11
3.3 Proposed PFS with Boundary between D2D and non-D2D Users.....	12
四、 效能分析	14
4.1 模擬環境與參數設定.....	14
4.2 模擬分析.....	15
4.2.1 0.5 倍的 D2D Packet Size	15
4.2.2 1 倍的 D2D Packet Size	18
4.2.3 2 倍的 D2D Packet Size	21
4.2.4 遺忘因子對公平性的影響.....	24
五、 結論	26
參考文獻	27

圖目錄

圖 1 目前兩個 UE 互相溝通的資料路徑	1
圖 2 Direct path mode	2
圖 3 Locally routed mode	2
圖 4 LTE 基本架構圖	5
圖 5 單一資源區塊結構	6
圖 6 OFDMA 資源區塊配置	7
圖 7 SC-FDMA 資源區塊配置	8
圖 8 UE 和 eNodeB 互動流程圖	9
圖 9 Example - RR 排班演算法	10
圖 10 Example - 比例式公平排班演算法	12
圖 11 在 0.5 倍情況之下的 Cellular Throughput	15
圖 12 在 0.5 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User	16
圖 13 在 0.5 倍情況之下的 D2D Throughput	16
圖 14 在 0.5 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User	17
圖 15 在 0.5 倍情況之下的 System Throughput	17
圖 16 在 1 倍情況之下的 Cellular Throughput	18
圖 17 在 1 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User	19
圖 18 在 1 倍情況之下的 D2D Throughput	19
圖 19 在 1 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User	20
圖 20 在 1 倍情況之下的 System Throughput	21
圖 21 在 2 倍情況之下的 Cellular Throughput	22
圖 22 在 2 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User	22
圖 23 在 2 倍情況之下的 D2D Throughput	23
圖 24 在 2 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User	23
圖 25 在 2 倍情況之下的 System Throughput	24
圖 26 Total Fairness	25

表目錄

表 1 各頻寬所擁有的資源區塊數量.....	7
表 2 模擬參數設定.....	14



一、緒論

1.1 研究動機

最近以鄰近為基礎(proximity-based)的應用服務日趨增加，這些應用服務主要是探測(discovery)鄰近有相同應用服務的裝置，並進一步的交換資訊。雖然目前一些通訊技術可以提供這類的應用服務，例如：藍芽(Bluetooth)、WiFi Direct 等，但都有傳輸距離短、傳輸速率低、訊號容易受到干擾等缺點。因此，鄰近服務(proximity-based services, ProSe)[1]在 3GPP 最近幾次會議中成為相當熱門的議題，希望藉由提升現有的 3GPP 標準技術以全面支援這類型的應用服務，並且可用於公共安全(public safety)的領域當中。

到目前為止，兩個鄰近的裝置互相傳輸資料必須透過核心網路轉送，故無法全面支援 ProSe，而且會造成 3GPP 網路不必要的負擔，如圖 1 所示。

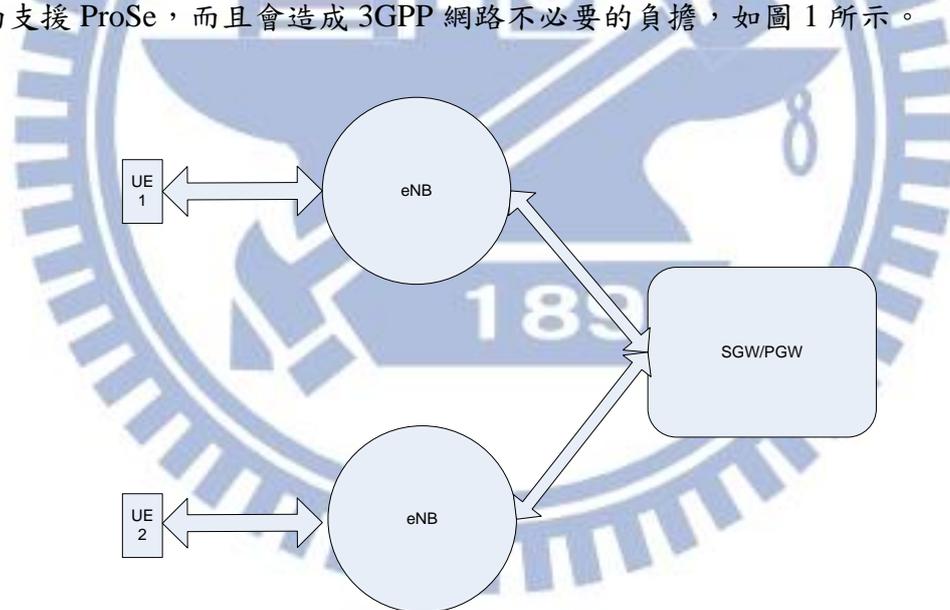


圖 1 目前兩個 UE 互相溝通的資料路徑

在 3GPP SA1 第 56 次和第 57 次會議中，已經分別採用 direct mode 和 locally routed 兩種傳輸模式架構並且放進 TR22.803[1]當中。

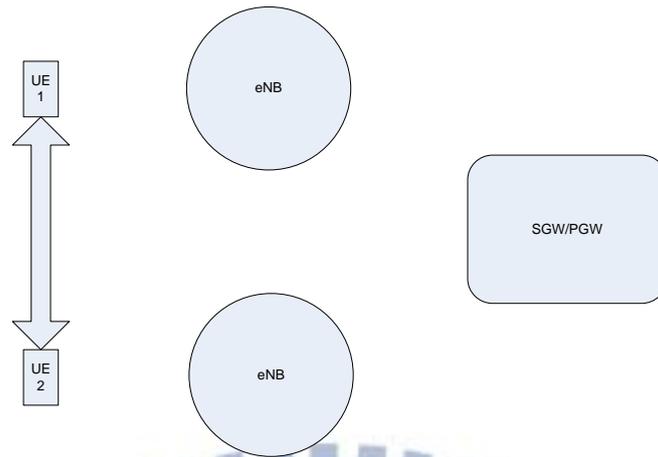


圖 2 Direct path mode

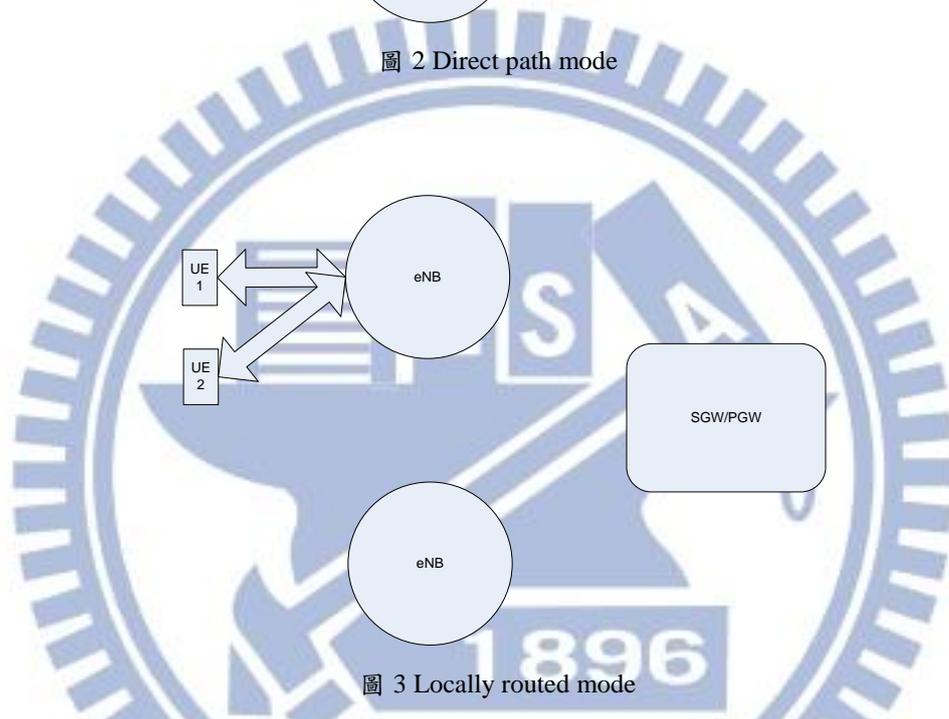


圖 3 Locally routed mode

LTE 直接通訊(LTE direct communications, LTE Device-to-Device Communications, LTE D2D)或稱鄰近通訊(Proximity Communications)的應用範圍大致可分為商用與社交、網路分流以及公共安全三個領域。例如：商家可以發送限時特價的廣告給鄰近的使用者；與鄰近的使用者進行互動或是分享檔案；當災難發生時，在沒有網路覆蓋的裝置可以進行直接通訊等。目前高通(Qualcomm)、英特爾(Intel)等公司正積極制定使用範例以及相關的要求規範。

雖然直接通訊可以帶給使用者更大的便利性，也能降低系統不必要的負載，但因為頻譜是有限的，如果大量的 D2D 使用者加入到系統中時，很有可能會大量影響原本在系統內的 cellular 使用者。因此本論文主要目的在於探討不同的 D2D 使用者數量對於原本在系統內 cellular 使用者的影響，並藉由提出的演算法保證 cellular 使用者至少有一定程度的服務品質。

1.2 章節結構

以下是各章節的簡述：

- 第二章 LTE 簡介

在這個章節中將簡單介紹 LTE、系統架構以及採用的傳輸技術。

- 第三章 資源配置演算法

在這個章節中將介紹兩種典型的資源配置演算法以及提出的演算法。

- 第四章 效能分析

在這個章節中我們利用 NS-2 進行模擬，並將模擬結果作分析比較，證明提出的演算法的確有減輕 D2D 使用者對 cellular 使用者的影響，並保證 cellular 使用者有一定程度的服務品質。

- 第五章 結論

我們將在這個章節中做一總結。



二、LTE 簡介

2.1 LTE 介紹

Long Term Evolution (LTE)是第三代合作夥伴計畫(3rd Generation Partnership Project, 簡稱 3GPP)標準組織所訂定出來的新一代通訊網路標準，這項標準是由 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)演化而來，最早是制定於 3GPP Release 8，其主要目標如下[2]：

1. 提高尖峰資料傳輸率(Peak Data Rate)：為了滿足未來大量高需求的服務應用，例如：視訊通話、行動電視等，期望能在 20MHz 的頻寬中能夠達到下載 100Mbps、上傳 50Mbps 的尖峰傳輸速率。
2. 降低延遲：可分為控制層面(C-plane)的延遲和使用層面(U-plane)的延遲[3]。控制層面的延遲是指 UE 從 idle 或 dormant 狀態切換到 active 狀態所花費的時間，其具體目標是將 idle 狀態切換到 active 狀態所花費的時間降至 100ms 以下，將 dormant 狀態切換到 active 狀態所花費的時間降至 50ms 以下；使用層面的延遲是指資料封包從 UE 傳輸到核心網路中的服務閘道(serving gateway)或是從服務閘道傳輸到 UE 所花費的時間，這段時間主要由服務品質(QoS)參數所決定。
3. 架構簡單化：架構簡單化是指盡可能減少 UE 和核心網路之間所需要經過的存取節點個數，因而降低設備投資(COPEX)和營運支出(OPEX)，以及上述提到的延遲時間。此外，採用 ALL-IP 的核心網路能更進一步地將架構簡單化。
4. 可調式頻寬：可調式的頻寬大小有利於頻譜的配置。最後因為採用 OFDM 技術，LTE 可提供 1.4、3、5、10、15 以及 20MHz 的頻寬。
5. 支援異質性網路：目前許多區域已經佈署了 pre-LTE 的網路，例如：GSM、UMTS，以及 non-3GPP 的網路，例如：WiFi、WiMAX，LTE 期望將 3GPP 網路和 non-3GPP 網路做整合互通，期望提供 UE 最佳的移動性。

隨著技術的演進，3GPP 從 Release 10 開始制定符合 ITU IMT-Advanced 規格的 LTE-Advanced (LTE-A)。到目前為止，LTE-A 已經超越了 ITU IMT-Advanced 而達到 ITU-R 的規格需求。相對於 LTE 的 4x4 通道技術，LTE-A 以 MIMO 多重天線收發技術，提供了最多 8x8 MIMO DL，也就是 8 個下載通道，以及 4x4 MIMO UL，也就是 4 個上傳通道的能力，下載傳輸速率可達到 1Gbps，上傳

傳輸速率可達到 500Mbps，並導入將來納入 Release 11 的協同多點傳輸機制(Co-ordinated Multi-point Transmission，即 CoMP)與 3GPP Release 8 規範的中繼傳輸(Relays)功能。

2.2 LTE 系統架構

LTE 可大致分為兩個部分：Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)以及 Evolved Packet Core (EPC)。EPC 是以 IP 為基礎的多重存取核心網路，使得營運商可以在單一核心網路中整合運作 3GPP 網路以及 non-3GPP 網路[5]，主要是由移動管理實體(mobility management entity，MME、服務閘道(serving gateway，S-GW)、數據封包閘道(packet data network gateway，PDN-GW)以及家庭用戶伺服器(home subscriber server，HSS)所組成，負責移動性管理(mobility management)、策略管理(policy management)、安全性(security)等功能；E-UTRAN 中只有 evolved NodeB (eNodeB)一個元件[5]，將原本在 UTRAN 中 NodeB 和無線電網路控制器(radio network controller，RNC)整合在一起，負責無線電資源配置(radio resource allocation)、新連線的存取控制、資料封包的轉送等功能。

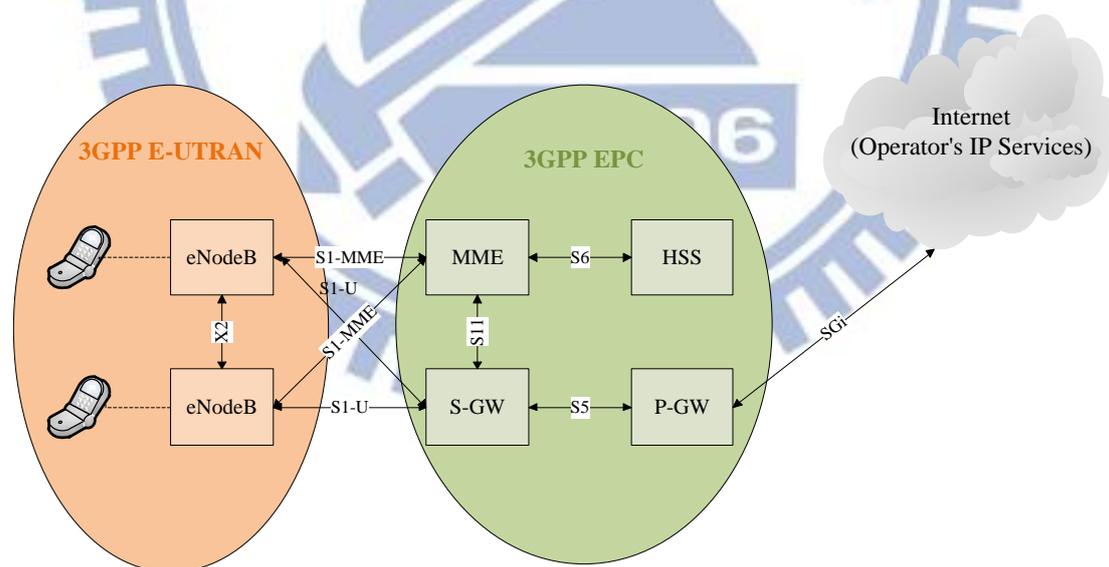


圖 4 LTE 基本架構圖

2.3 LTE 傳輸技術

LTE 在下行鏈路中採用 Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

(OFDMA)傳輸技術，與過往的 Time-Division Multiple Access (TDMA)[6]和 Code-Division Multiple Access (CDMA)[7]傳輸技術相比，最大的差異就是資源配置的方式。CDMA 可讓多位使用者同時間利用不同編碼進行傳輸；TDMA 在同個時間點只能讓一位使用者在該頻段進行傳輸；而 OFDMA 允許多位使用者同時間使用不同的子載波進行傳輸[8]。在 LTE 中，資源區塊(physical resource block)被認為是最小的資料傳輸單位，並且一個資源區塊只能給一位使用者使用。以 FDD-LTE[9]為例，它是由一個時間槽(time slot)與連續的 12 個子載波所組成，而一個子載波固定為 15kHz，表一為在不同的頻寬下系統擁有的資源區塊數量[10]。圖 6 是在 OFDMA 傳輸技術下配置資源區塊給 4 位使用者的例子。

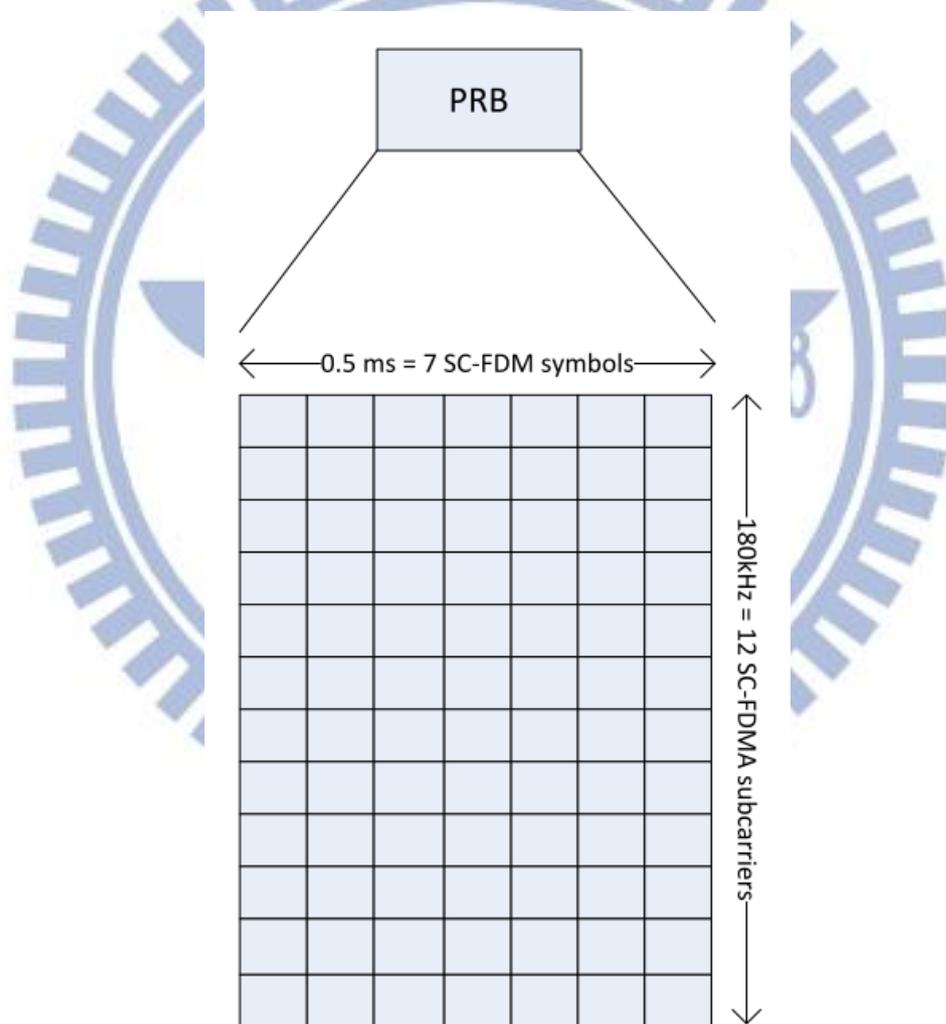


圖 5 單一資源區塊結構

Channel bandwidth	1.4	3	5	10	15	20
N_{RB}	6	15	25	50	75	100

表 1 各頻寬所擁有的資源區塊數量

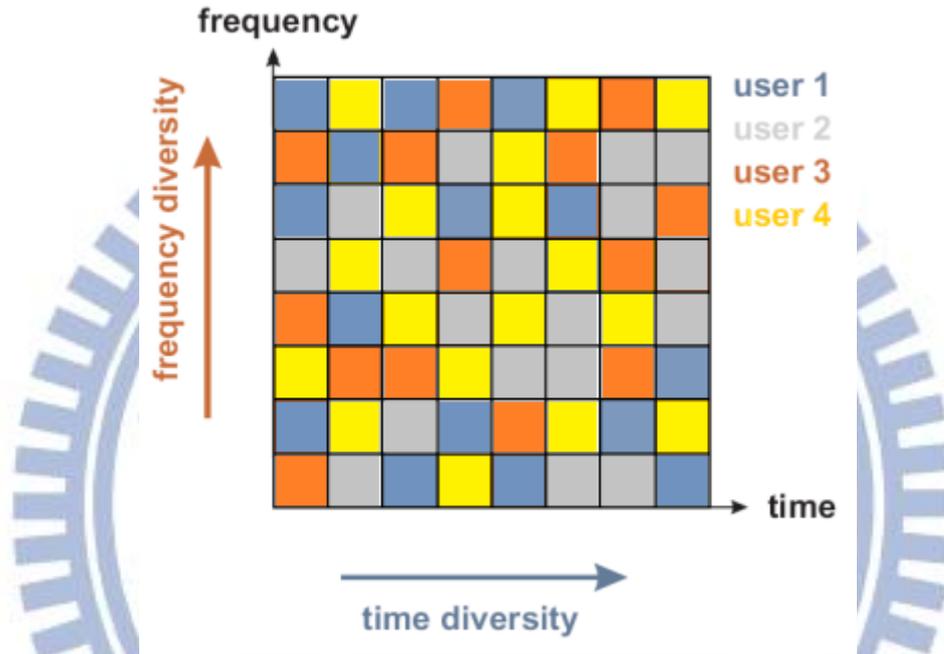


圖 6 OFDMA 資源區塊配置

在上行鏈路方面，LTE 採用 Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA) 傳輸技術，主要原因是在 OFDMA 傳輸技術中具有 Peak-to-Average Power ratio (PAPR) 問題[8]，較高的 PAPR 會使得 UE 在進行傳輸資料時有較差的功率效益，而 SC-FDMA 結合了 OFDMA 許多彈性的部分，同時具有較低的 PAPR，進而延長 UE 的電池使用時間。但由於單載波的特性，使用者只能在連續頻率的資源區塊(resource block)上進行傳輸[11]，如圖 7 所示。

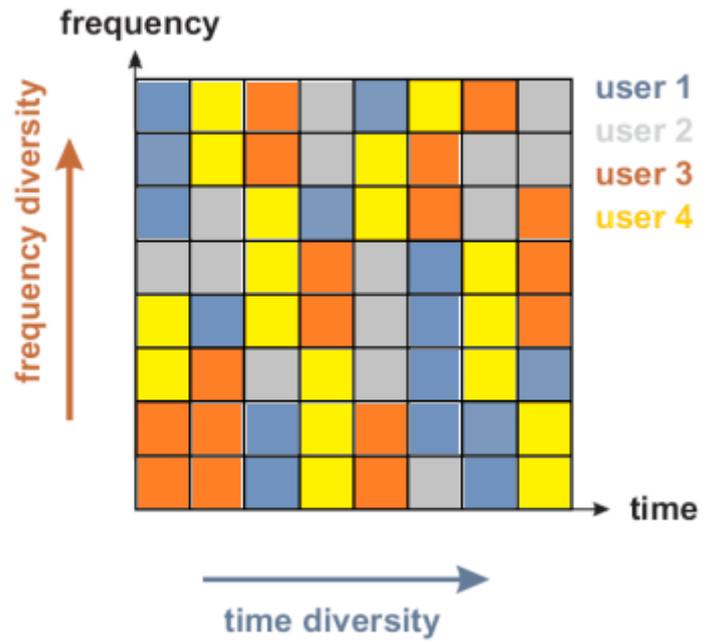


圖 7 SC-FDMA 資源區塊配置



三、資源配置演算法

在上個章節有提到資源區塊被認為是最小資料傳輸單位，因此在每個時間槽 eNodeB 必須要知道每位使用者對所有資源區塊的無線電通道狀態(radio channel condition)[12]，例如：在 LTE 上行鏈路中，每位使用者都會發送探測參考信號 (Sounding reference signals, SRS)，用來當作通道品質指標(channel quality indicator, CQI)，之後根據排班演算法的不同，這有可能會成為在進行資源配置時一項重要的指標。而每個資源區塊可以攜帶的資料量是由調變與編碼方式(modulation and coding scheme, MCS)決定，而調變與編碼方式是由適應性調變編碼技術(adaptive modulation and coding, AMC)依據通道狀況所決定，因此使用者對資源區塊的 CQI 可以決定該使用者可以使用該資源區塊傳送多少資料量。

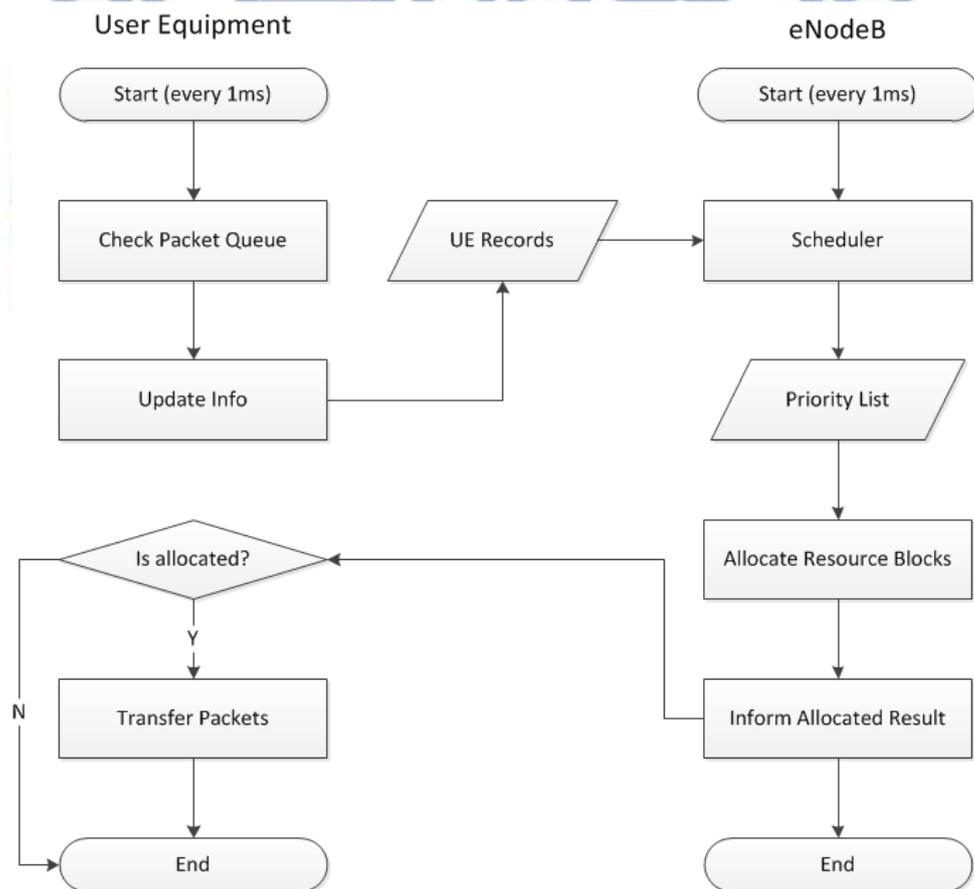


圖 8 UE 和 eNodeB 互動流程圖

圖 8 是在每個時間槽 UE 和 eNodeB 的互動流程圖，UE 會在每個時間槽檢查自己有沒有資料要傳送，如果有資料要進行傳送會告知 eNodeB 有多少資料量，

之後根據排班演算法會產生一組優先順序遞減名單，然後依據這組名單開始配置資源區塊，直到所有 UE 都被滿足需求或是資源區塊已完全配置出去，最後通知所有 UE 配置的結果，UE 會依照被分配到的資源區塊數量及選擇的調變與編碼方式計算出可以傳送的資料量，若是有 UE 在這次沒有被配置到資源區塊，會在下個時間槽再重複一次上述的過程，直到需求被滿足為止。

接下來介紹兩種經典的排班演算法：Round-Robin 排班演算法以及比例式公平排班演算法。

3.1 Round-Robin Scheduling

Round-Robin (RR)排班演算法是最基本的排班演算法之一，它會輪流配置資源區塊給各個使用者，因此每位使用者得到資源區塊的機率是相同的。以下是以 RR 排班演算法分配資源區塊的例子：

Time	A		B		C		D		E	
	Request	Transfer								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	100	0	0	70	0	130	0	20	0
2	100	0	0	0	140	100	260	0	40	0
3	200	0	10	0	110	0	390	100	60	0
4	300	20	20	0	180	0	420	0	80	80
5	380	80	30	20	250	0	550	0	20	0

圖 9 Example - RR 排班演算法

假設資源區塊總數為 100，有 5 位使用者 A、B、C、D、E 分別在每個時間點要求 100、10、70、130、20 個資源區塊，而 B 是在第 3 個時間點才開始要求。

在配置的過程中會出現兩種情況：第一種情況是這次配置已經滿足該使用者的需求，或是已經配置給該使用者最大額度的資源區塊，下個時間點從下一位使用者開始配置，這種情況以咖啡色表示；第二種情況是這次的配置並未滿足該使用者的需求，下個時間點給該使用者上一次配置不足的部分，這個情況以粉紅色表示，但連續兩次配置給該使用者的資源區塊數量不可超過最大額度。

從上表中可以看到使用者 C 在第二個時間點已經被配置了最大額度的資源區塊，下個時間點要從使用者 D 開始配置，而使用者 B 在第三個時間點開始有需求，即使只有少量需求，他也必須等到第五個時間點才會被分配到資源區塊，而等待時間會隨著使用者的增加而拉長，進而降低 throughput。因此 RR 排班演算法若放在上行鏈路中可以總結出以下問題：

1. 等待時間 vs.服務品質：在上述的例子中，使用者 B 必須等到 RR 排班演算

法配置完一輪才會得到資源區塊，而這段時間長度取決於系統中使用者個數，若是等待時間過長，使用者 B 的服務品質可能會大幅下降。

2. 最大額度 vs. 封包延遲時間：預設的最大額度如果太小，可能會造成封包延遲時間大幅地拉長；如果最大額度設定太大，可能會造成資源分配上的不公平。
3. 系統 throughput：RR 排班演算法並沒有考慮到通道品質的情況，因此系統的 throughput 會因為通道品質不佳的使用者而受到限制。

3.2 Proportional Fair Scheduling

比例式公平排班演算法(proportional fair scheduling, PFS)是目前在 LTE 中最常用的排班演算法之一，它試著最大化系統 throughput 的同時，又讓所有使用者至少有一定程度的服務品質。[12]將 $r_i^c(t)$ 定義為：在時間 t ，使用者 i 利用資源區塊 c 所能達到的傳輸速率；將 $x_i^c(t)$ 定義為：是否在時間槽 t ，將資源區塊 c 配置給使用者 i ，因此當 $x_i^c(t) = 1$ 時，表示使用者 i 在時間槽 t 可以利用資源區塊 c 傳送 $r_i^c(t)$ 的資料量；如果將 $\lambda_i^c(t)$ 作為 PF 指標，也就是使用者 i 在時間利用資源區塊 c 傳送的權重值，其公式如下：

$$\lambda_i^c(t) = r_i^c(t) / R_i(t) \quad (1)$$

其中 $R_i(t)$ 定義為：到時間 t 為止，使用者 i 的平均傳輸速率。其公式為：

$$R_i(t+1) = [(1 - \beta) * R_i(t)] + [\beta * r_i(t)] \quad (2)$$

其中 β 為遺忘因子(forgetting factor)， $r_i(t)$ 為使用者 i 在時間 t 的傳輸速率。因此，比例式公平排班演算法配置資源區塊的目標如下：

$$\max \sum_i \sum_c x_i^c(t) \lambda_i^c(t) \quad (3)$$

在這篇論文中，我們將 $r_i^c(t)$ 理想化，也就是每位使用者利用資源區塊 c 所能達到的傳輸速率都是一樣的，因此 $\lambda_i^c(t)$ 的值取決於 $R_i(t)$ 的大小，而這樣的假設也能滿足在 SC-FDMA 傳輸技術中必須配置給同個使用者連續頻率的資源區塊的限制。以下是比例式公平排班演算法分配資源區塊的例子：

Time	A			B			C		
	Request	Transfer	Avg. Rate	Request	Transfer	Avg. Rate	Request	Transfer	Avg. Rate
0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
1	100	100	1000.99	0	0	1	70	0	1
2	100	0	990.9801	0	0	1	140	100	1000.99
3	200	0	981.070299	10	10	100.99	110	0	990.9801
4	300	0	971.259596	10	10	199.9801	180	0	981.070299
5	400	70	1661.547	10	10	297.980299	250	0	971.259596

D			E		
Request	Transfer	Avg. Rate	Request	Transfer	Avg. Rate
0	0	1	0	0	1
130	0	1	20	0	1
260	0	1	40	0	1
390	90	900.99	60	0	1
430	10	991.9801	80	80	800.99
550	0	982.060299	20	20	992.9801

圖 10 Example - 比例式公平排班演算法

在這個例子中， β 設為 0.99。在每個時間點所有使用者都會計算平均傳輸速率，初始值為 1。之後依照平均傳輸速率小到大給予配置資源區塊的優先順序，分別以紅、橙、黃、綠、藍 5 種顏色表示，紅色優先值最高，其次是橙色，藍色的優先值最低。

從上表中可以看到，即使使用者 B 在第三個時間點才開始有需求，也會因為他的平均傳輸速率最低而優先配置給他資源區塊。隨著時間的推進，由於使用者 B 和使用者 E 的需求量比其他使用者少，進而平均傳輸速率也是比其他使用者低，因此當他們有需求時，比例式公平排班演算法會優先配置資源區塊給他們，剩餘的資源區塊由使用者 A、C、D 去競爭。

3.3 Proposed PFS with Boundary between D2D and non-D2D Users

雖然比例式公平排班演算法看似公平，但並不完全適用於有 D2D 使用者的情況當中，其原因在於若是有大量 D2D 使用者有小量需求時，cellular 使用者可能會有一段時間無法被配置到資源區塊進行傳輸，反之也是一樣。因此，這裡提出改良式的比例式公平排班演算法，對原本的比例式公平排班演算法稍作修改，以保證兩種使用者至少有一定程度的服務品質，以下是提出的演算法：

1. Select D2D users to schedule
2. Calculate PF metric value for all D2D users on each RB
3. Allocate RBs to corresponding users. The maximum amount of assigned RBs is $(1 - \alpha) * \text{total RBs}$, where α is guaranty factor.
4. Select cellular users to schedule
5. Calculate PF metric value for all cellular users on each RB
6. Allocate remaining RBs to corresponding users. The maximum amount of assigned RBs is number of total RBs.

由於將 cellular 使用者與 D2D 使用者分開作比例式公平排班演算法並且加入保證因子，因此當有大量 D2D 使用者有小量需求的情況發生的時候，cellular 使用者也能保有一定的服務品質。這裡的保證因子指的是保證 cellular 使用者至少有幾成的資源區塊可以使用，D2D 使用者也會因為這保證因子而被限制最多有幾成的資源區塊可以使用，此外，當 D2D 使用者流量為 0 的時候，cellular 使用者可以使用全部的資源區塊。營運商可以根據不同情況改變保證因子的值，例如：在 cellular 使用者流量較小而 D2D 使用者流量較大的時候，可以將保證因子設低一點；在 cellular 使用者流量較大而 D2D 使用者流量較小的時候，可以將保證因子設高一點。

四、效能分析

4.1 模擬環境與參數設定

在本論文中，我們以 NS-2 軟體[20]進行模擬及分析不同數量的 D2D 使用者對於 cellular 使用者的影響，並將提出的演算法與原本的比例式公平排班演算法作比較。

我們模擬在 3GPP TR22.803 中定義的 locally routed 傳輸模式架構，如圖 3 所示。在以下的模擬中，設定上行鏈路有 20MHz 的頻寬，根據表一系統擁有 100 資源區塊，並假設 eNodeB 每秒最多可以處理 100Mb 的資料量，因此在每個子訊框最多可以處理 100kb 的資料量。為了簡單起見，假設每位使用者對每個資源區塊的通道品質都是一樣，以至於調變與編碼技術也都是一樣，因此這裡每個資源區塊可以攜帶 1kb 的資料量。

假設在 eNodeB 底下有 100 位 cellular 使用者，D2D 使用者從 0 位增加到 200 位，以下是詳細的參數設定表：

參數	設定值
Bandwidth	20MHz
Resource Blocks	100
System Capacity	100Mbps
Amount of data on each RB	1Kb
Cellular Users	100
D2D Users	0 ~ 200
Avg. Cellular Packet Size	5Kb
Avg. D2D Packet Size	2.5Kb, 5Kb, 10Kb
Packet Arrival Rate (Poisson)	100
α (guaranteed factor)	0.2, 0.4, 0.6, 0.8
β (forgetting factor)	0.01

表 2 模擬參數設定

4.2 模擬分析

以下我們模擬了在遺忘因子設為 0.01 之下，D2D 使用者的資料封包大小為 cellular 使用者的 0.5 倍、1 倍、2 倍的情況。

4.2.1 0.5 倍的 D2D Packet Size

從圖 11 和圖 12 可以看到 cellular throughput 以及平均每位 cellular 使用者的 throughput 都很穩定的分別維持在 50Mbps 以及 500Kbps；而在圖 13 和圖 14 中可以看到除了保證因子為 0.6 和 0.8 的方法以外，其他方法的平均每位 D2D 使用者的 throughput 都維持在 250Kbps，並且隨著 D2D 使用者的數量增加，D2D throughput 也會等比上升。這是因為 D2D 流量還沒有受到保證因子限制的緣故，從圖 15 可以發現在 D2D 使用者的數量增加到 200 的時候，系統整體的 throughput 才剛好達到 100Mbps。因此在未達到滿載的情況下，可以不需要設定保證因子($\alpha=0$)，因為系統有足夠的能力滿足每位使用者的需求。

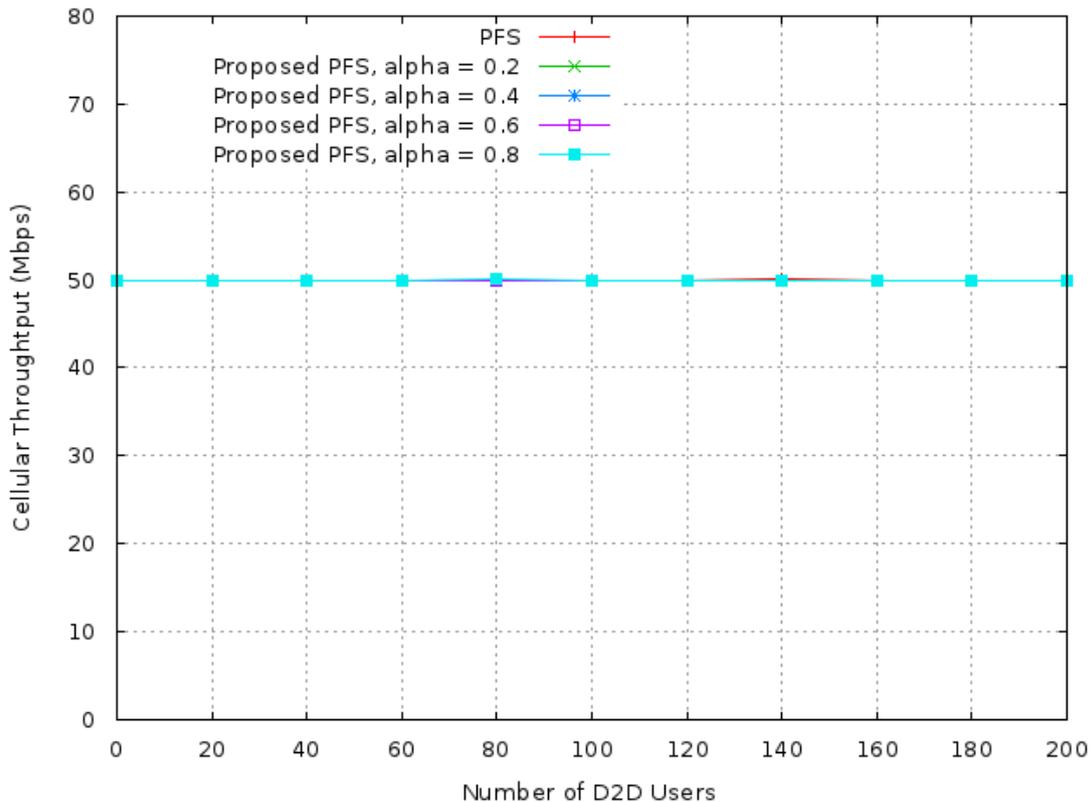


圖 11 在 0.5 倍情況之下的 Cellular Throughput

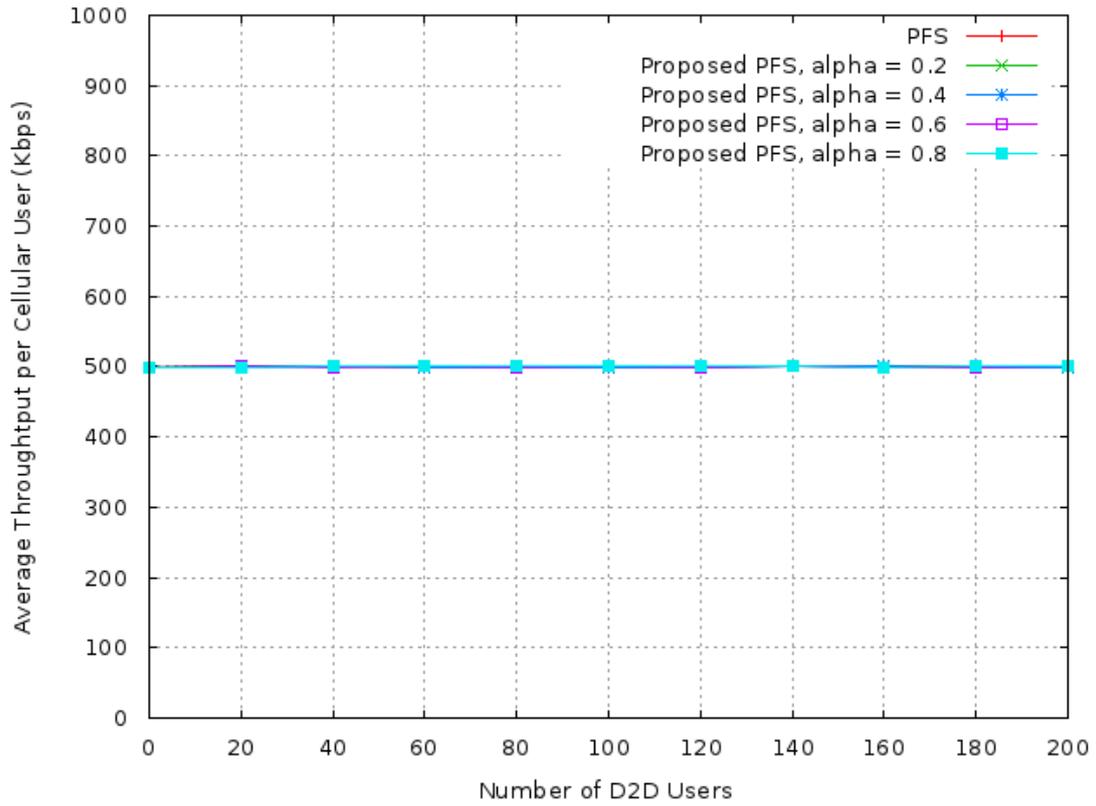


圖 12 在 0.5 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User

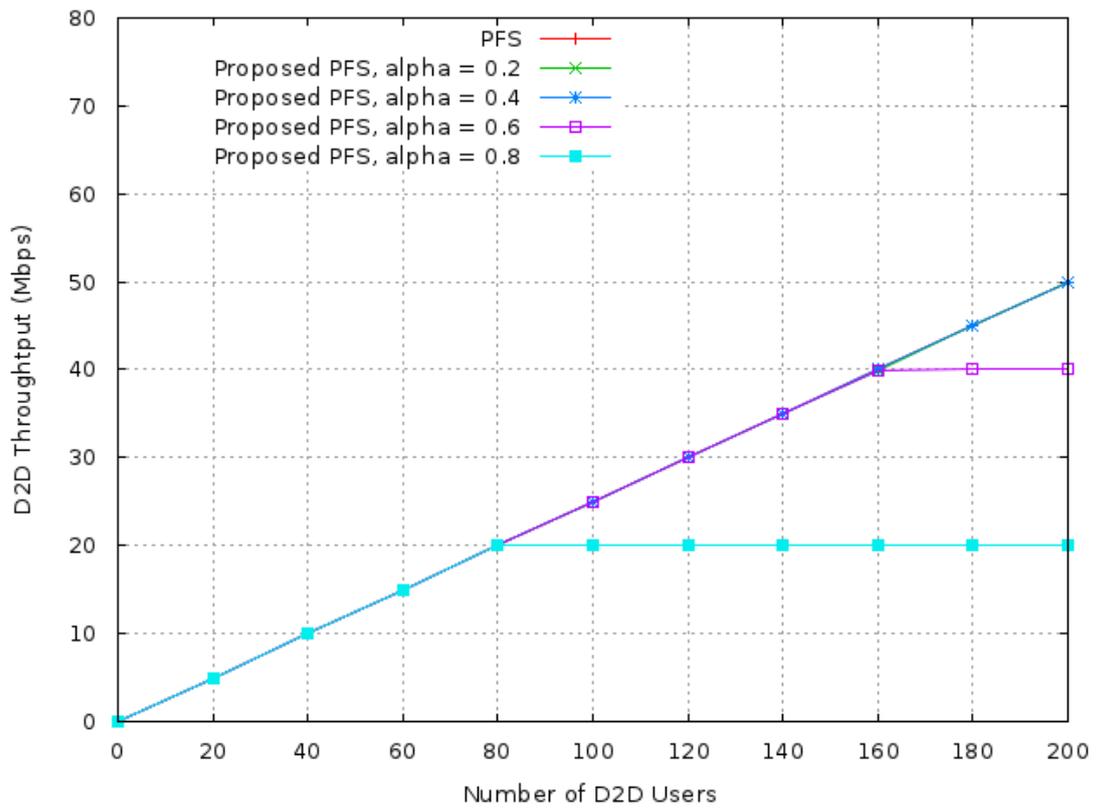


圖 13 在 0.5 倍情況之下的 D2D Throughput

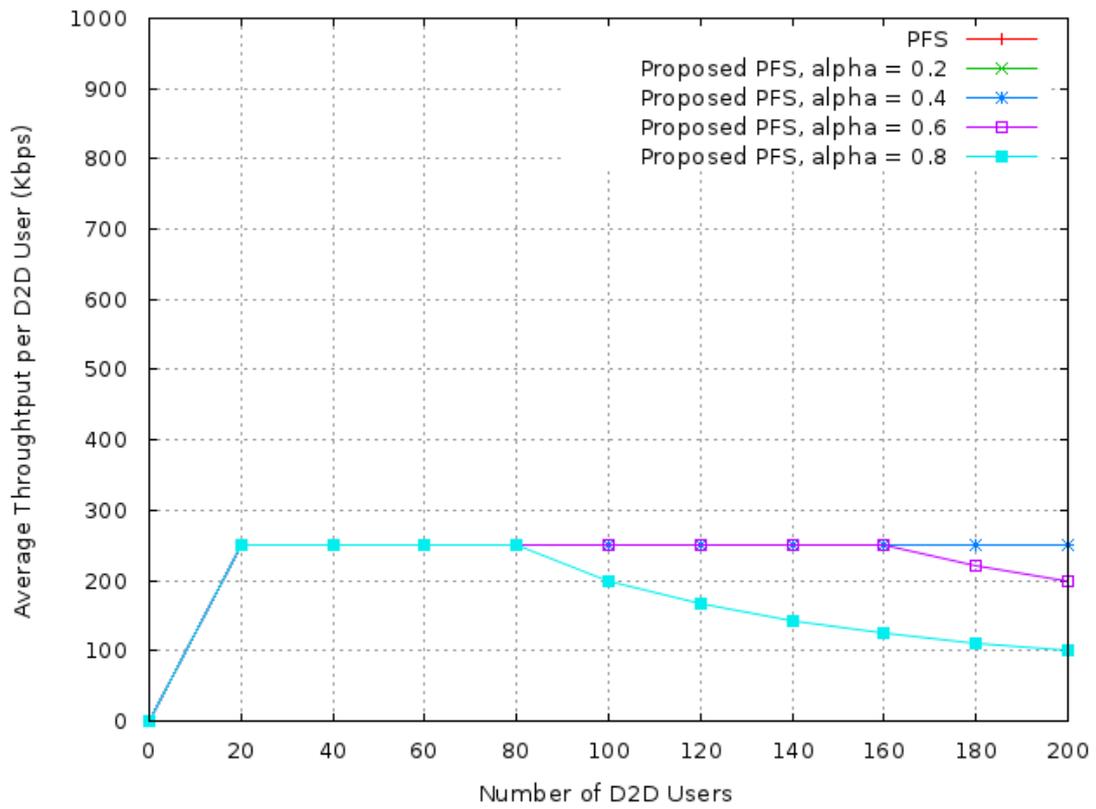


圖 14 在 0.5 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User

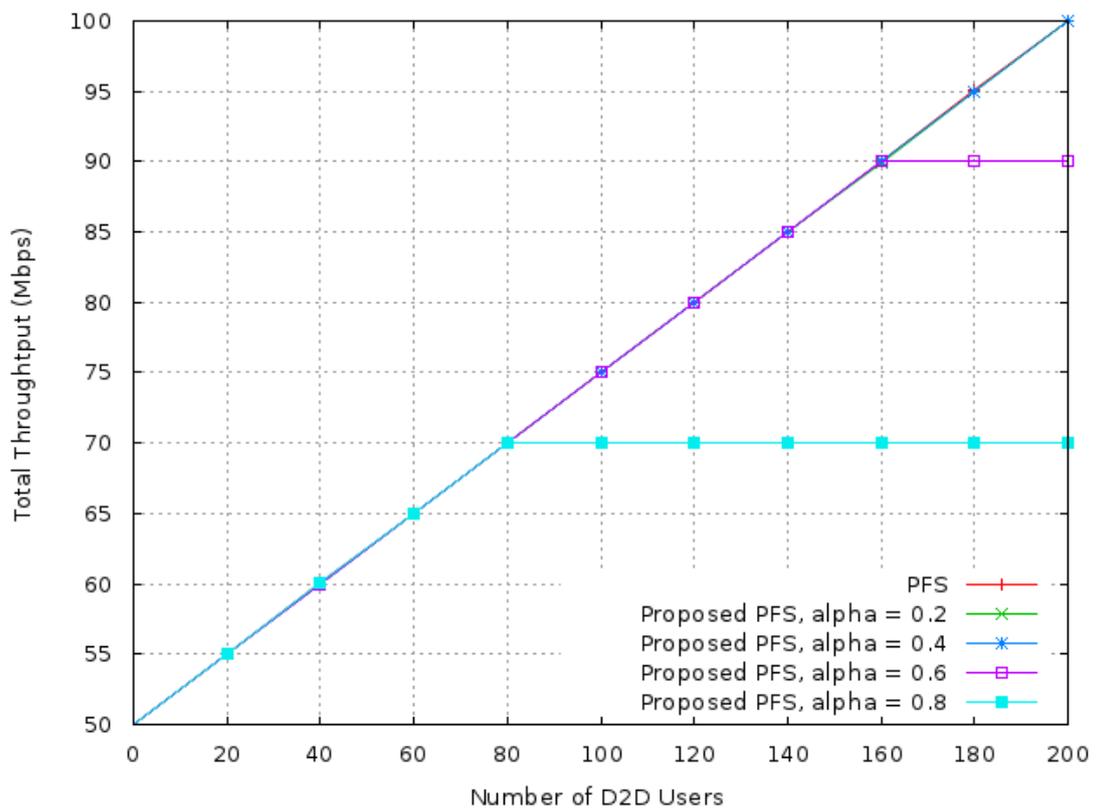


圖 15 在 0.5 倍情況之下的 System Throughput

4.2.2 1 倍的 D2D Packet Size

從圖 16 可以看到，在 D2D 使用者的數量增加到 100 之前，系統還並未處於滿載情況，因此 cellular throughput 都能維持在 50Mbps 左右；但當 D2D 使用者數量增加到 100 以上時，若以原本的比例式公平排班演算法配置資源，cellular throughput 會逐漸下降，在 D2D 使用者數量達 200 位的時候，cellular throughput 會下降至 33Mbps 左右。

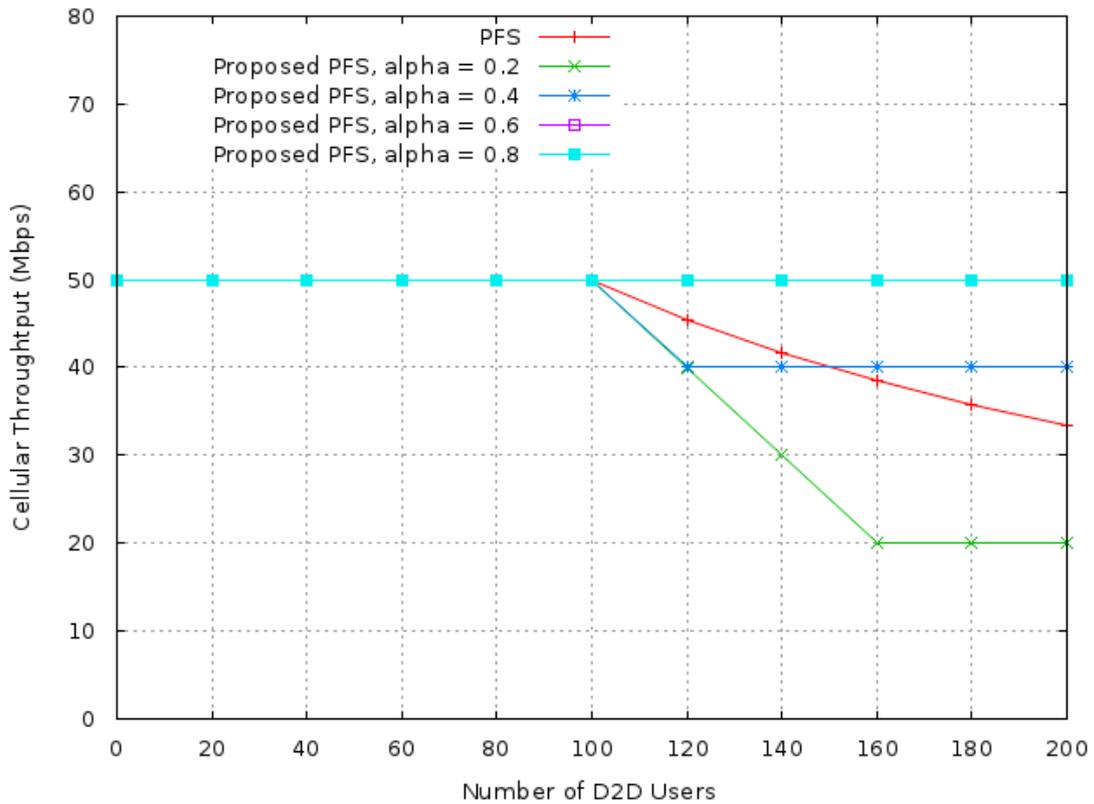


圖 16 在 1 倍情況之下的 Cellular Throughput

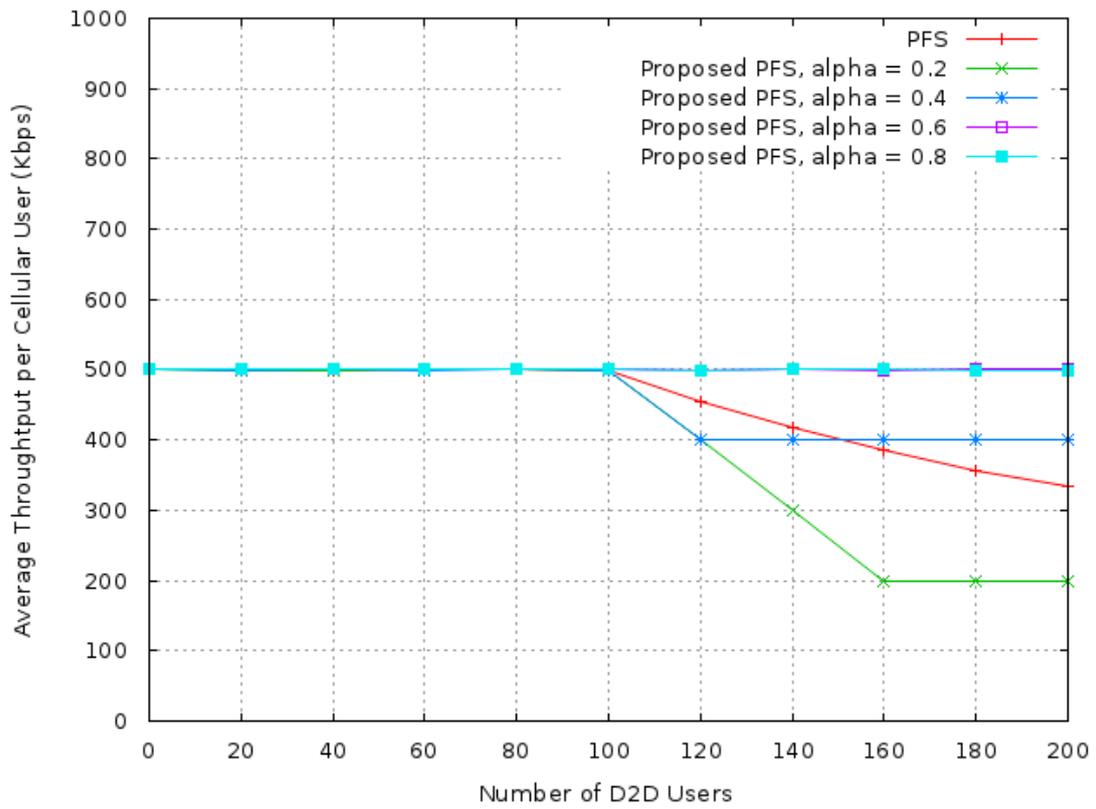


圖 17 在 1 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User

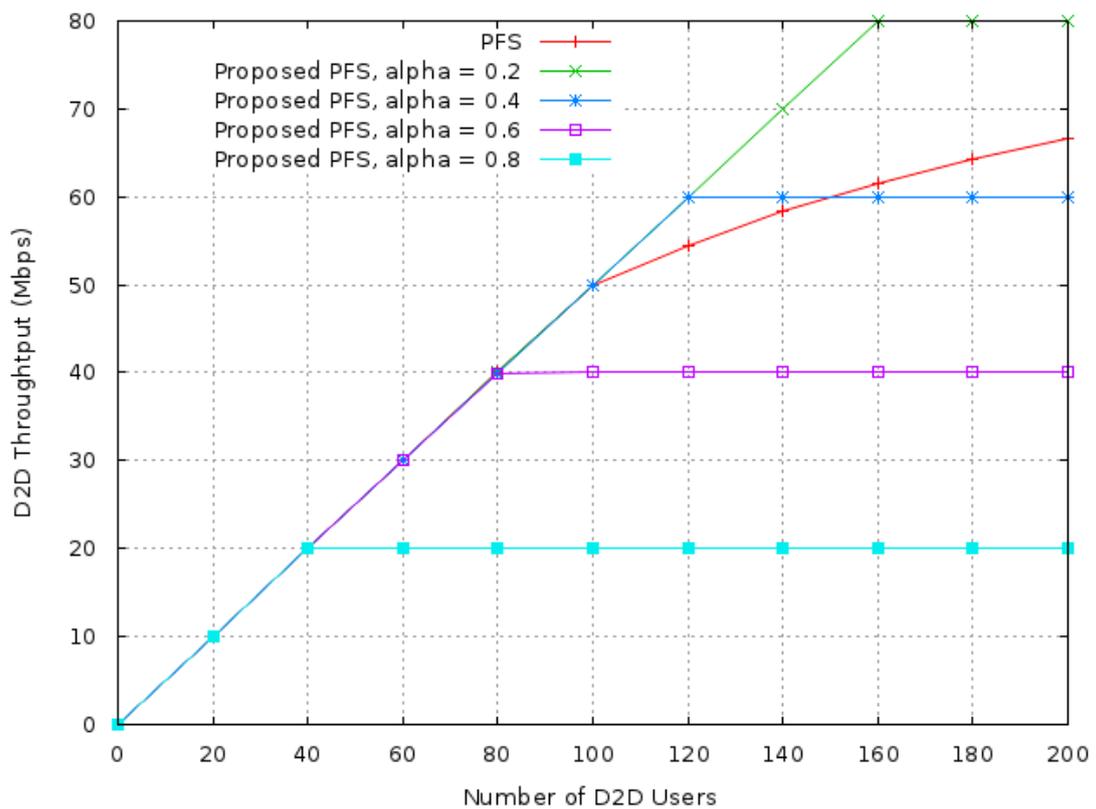


圖 18 在 1 倍情況之下的 D2D Throughput

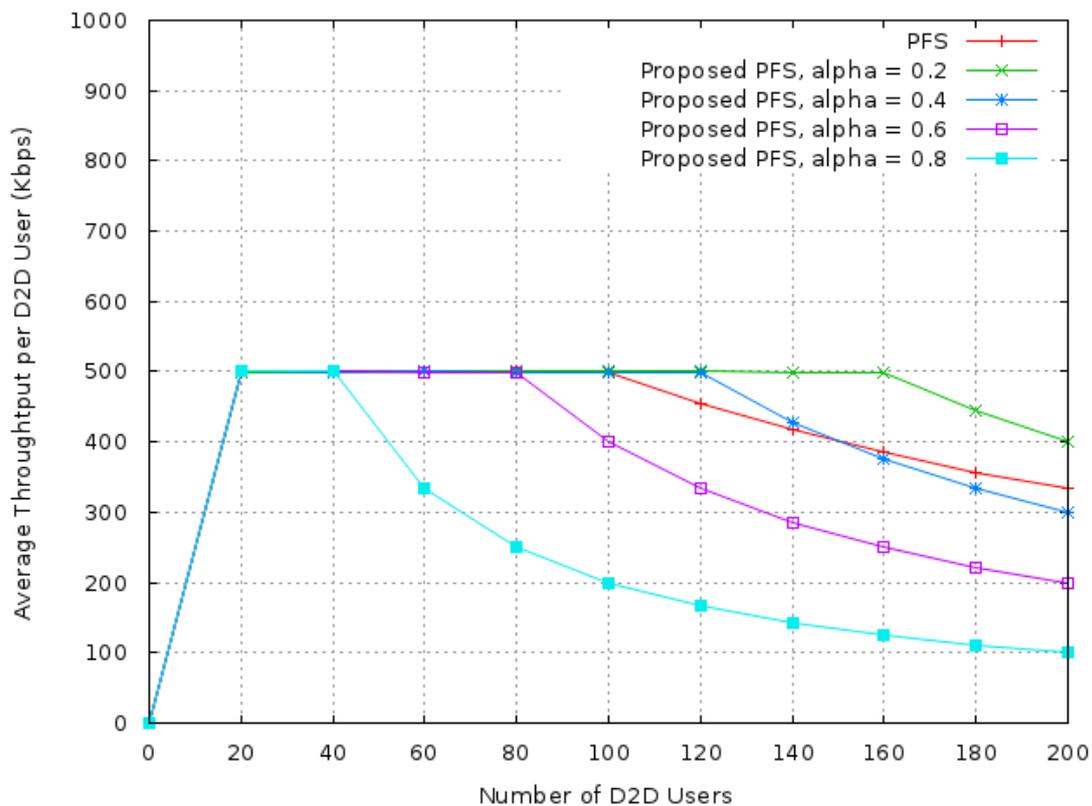


圖 19 在 1 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User

而在我們提出的演算法保證因子設為 0.4 的情況下，雖然在 D2D 使用者數量為 120 的時候，cellular throughput 以及平均每位 cellular 使用者的 throughput 都比原本的比例式公平排班演算法來的低，但之後隨著 D2D 使用者數量的增加，它們會分別維持在 40Mbps 以及 400Kbps，這是因為我們保證 cellular 使用者至少有 40% 的資源區塊可以用；相對地，D2D throughput 會被限制在 60Mbps。

圖 20 是系統整體的 throughput，可以看到除了保證因子設為 0.6 及保證因子設為 0.8 的方法下，其他方法都可達到系統最大的 throughput，這是因為保證因子限制了 D2D 使用者的 throughput 所導致。因此，在滿載的情況之下，將保證因子設為 0.4 或 0.5 會使得系統有最大輸出，並且 cellular 使用者也保有原本 80% 以上的 throughput。

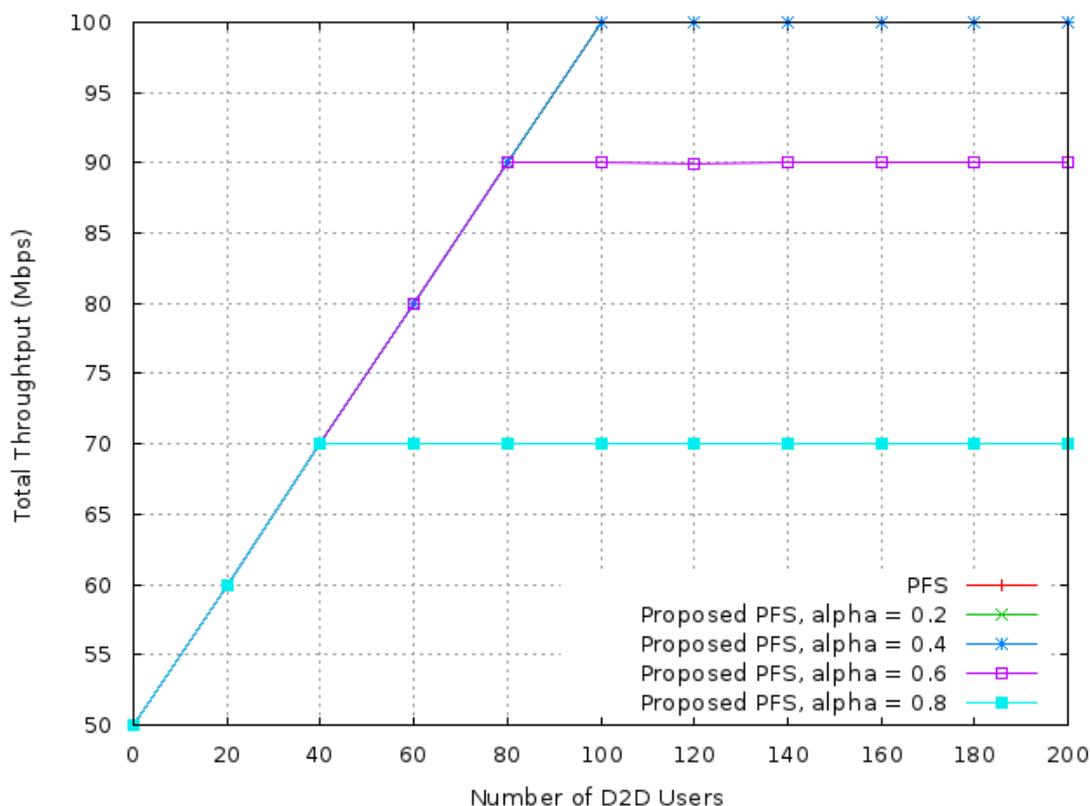


圖 20 在 1 倍情況之下的 System Throughput

4.2.3 2 倍的 D2D Packet Size

雖然圖 21 看起來與圖 16 相似，但其實在 D2D 使用者的數量增加到 50 位的時候系統就已經達到滿載，而因為比例式公平演算法配置資源的特性——優先配置資源區塊給具有最高 $\lambda_i^c(t)$ 的使用者，如前面所述，在本論文中假設每位使用者利用資源區塊 c 所能達到的傳輸速率都是一樣的，因此 $\lambda_i^c(t)$ 的值取決於 $R_i(t)$ 的大小。所以在這模擬的情況中，平均每位 cellular 使用者的 throughput 會維持在 500Kbps 直到平均每位 D2D 使用者的 throughput 降至 500Kbps 左右後才開始競爭資源區塊，進而兩邊的 throughput 都開始下降。

當 D2D 使用者的數量增加至 60 位的時候與前述的模擬情況一樣，在保證因子設為 0.4 的方法下，cellular throughput 以及平均每位 cellular 使用者的 throughput 會分別維持在 40Mbps 以及 400Kbps，而 D2D throughput 會被限制在 60Mbps，因此模擬結果證明我們提出的演算法能有效地保證 cellular 使用者有一定程度的服務品質。

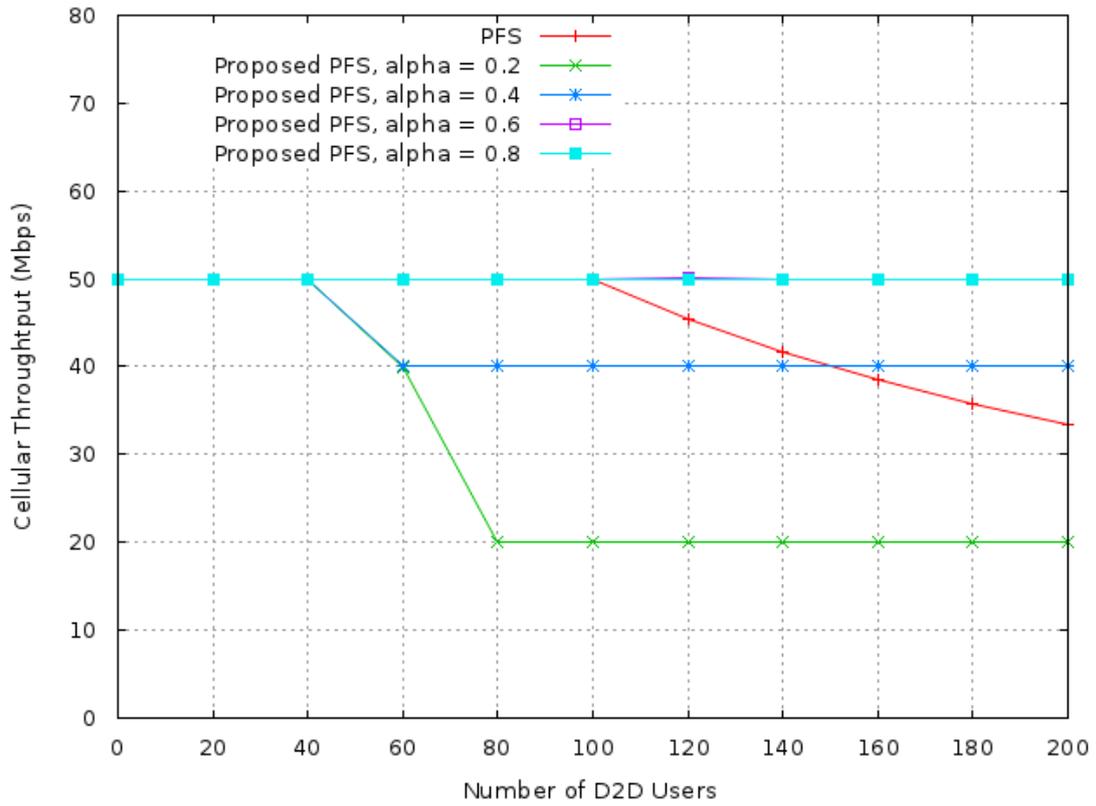


圖 21 在 2 倍情況之下的 Cellular Throughput

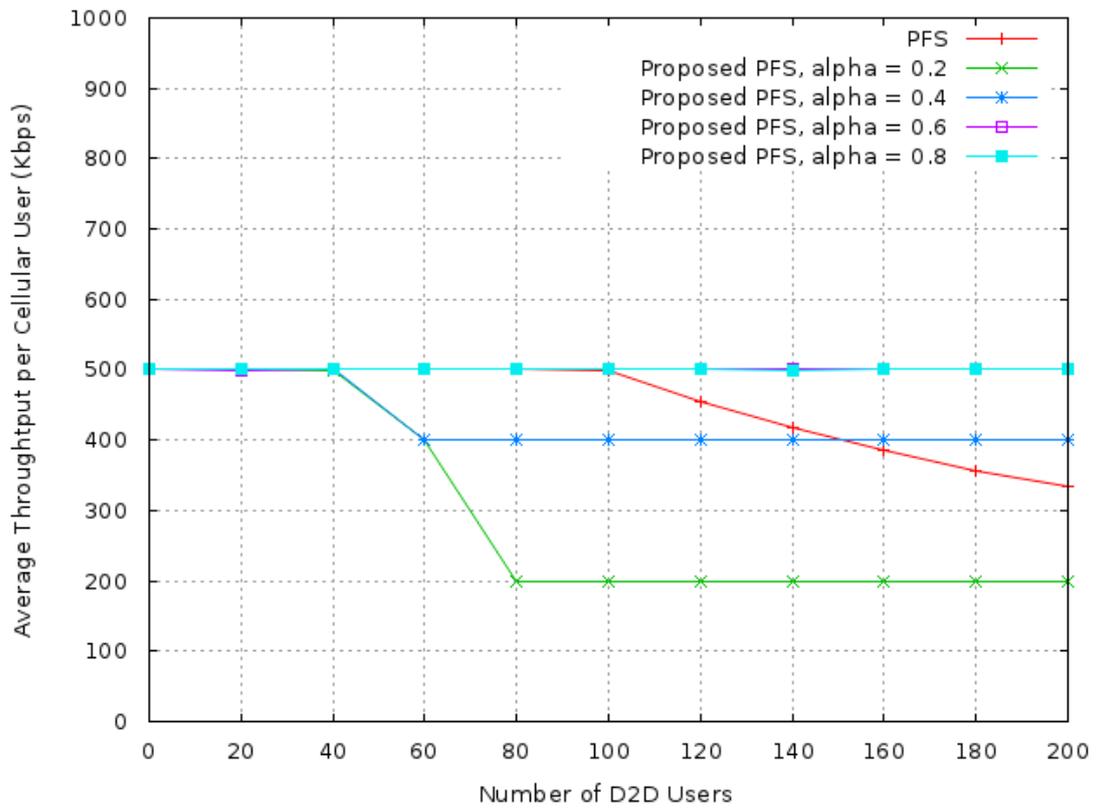


圖 22 在 2 倍情況之下的 Average Throughput per Cellular User

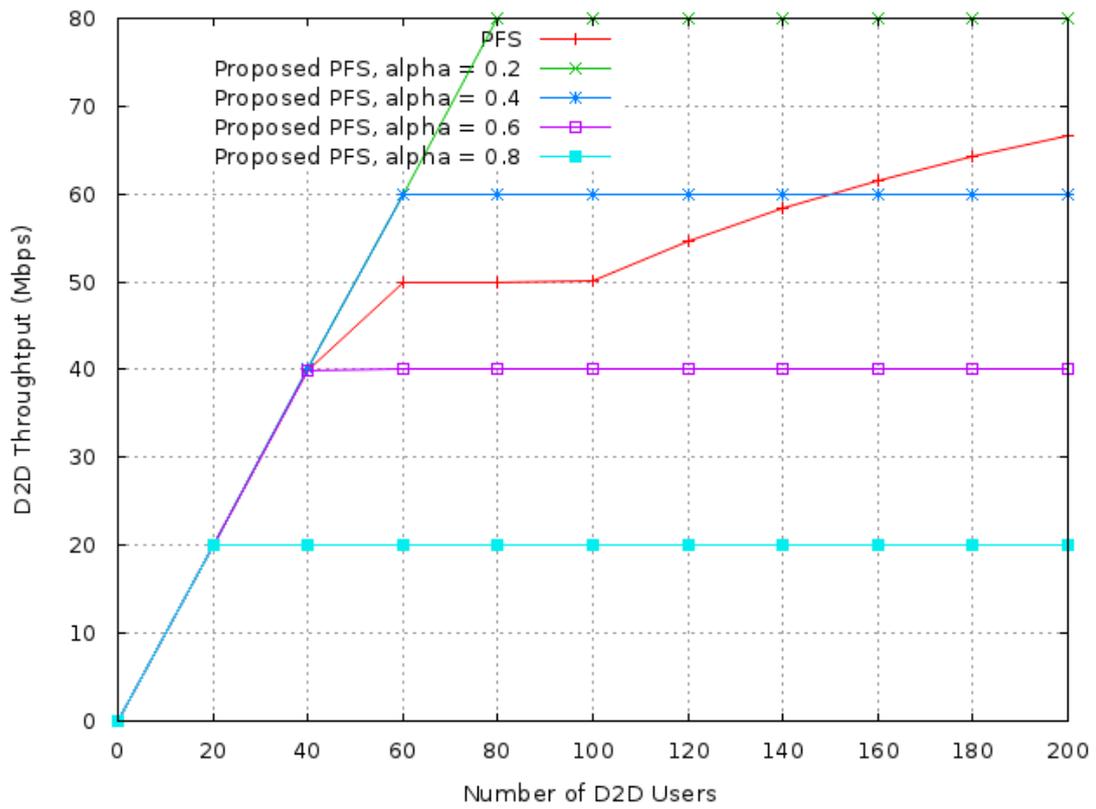


圖 23 在 2 倍情況之下的 D2D Throughput

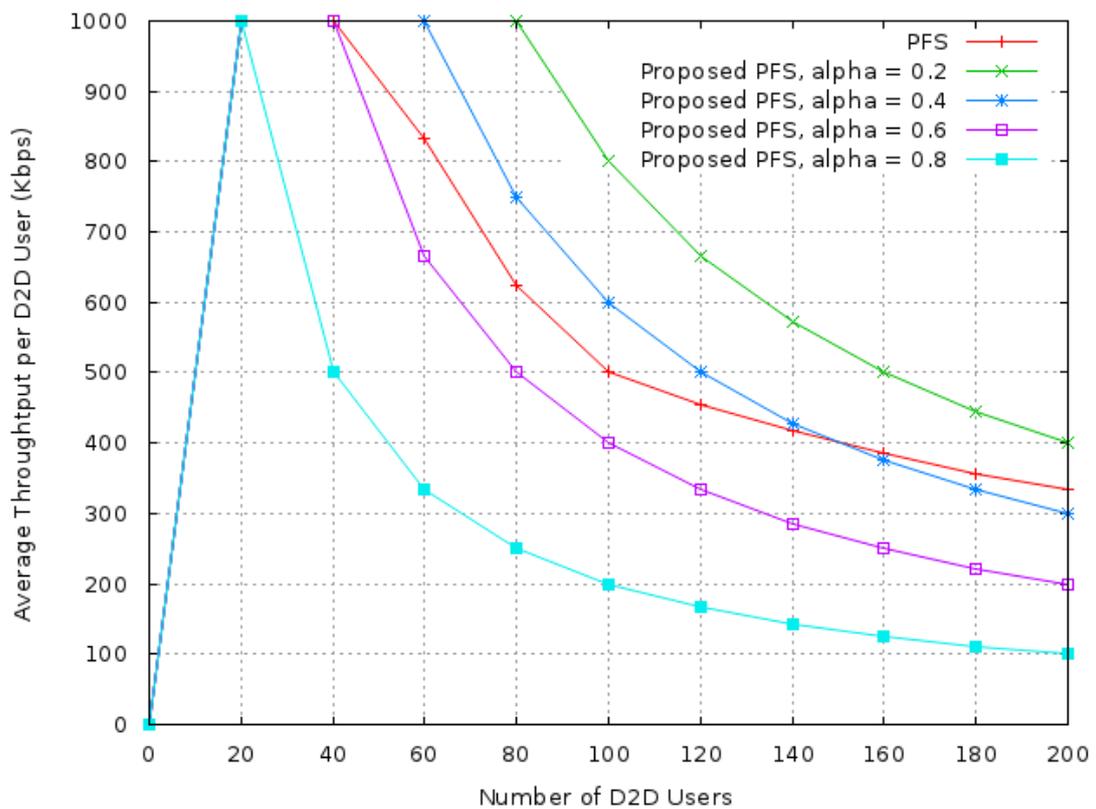


圖 24 在 2 倍情況之下的 Average Throughput per D2D User

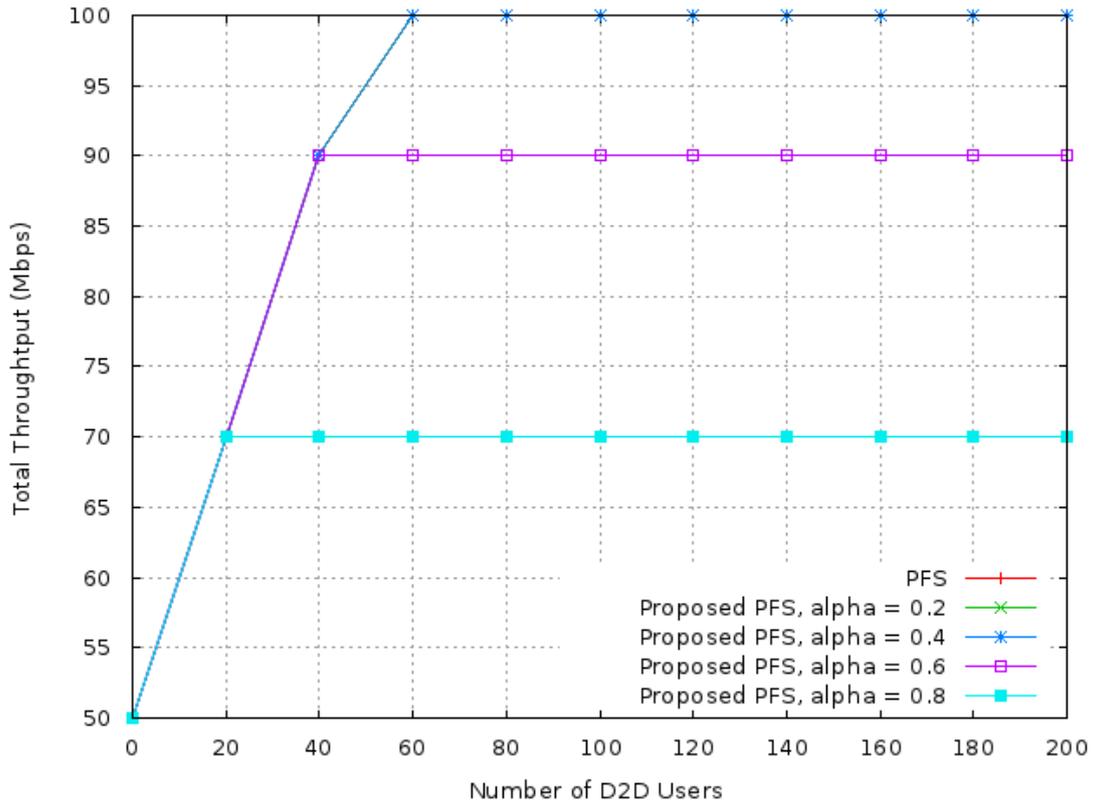


圖 25 在 2 倍情況之下的 System Throughput

4.2.4 遺忘因子對公平性的影響

我們在模擬的過程中發現遺忘因子對於公平性(Fairness Index)有著很大的影響力，這是當遺忘因子設定越大的值， $R_i(t)$ 的波動幅度就會越大，如果該使用者有一段時間沒有被分配到資源區塊，那麼他的 $R_i(t)$ 就會很快地降到底(預設值為 1)，因此某些使用者很有可能會發生 starvation 的情況。計算公式如下：

$$F_{\phi}(\Delta t) = \frac{[\sum_{i=1}^N \phi_i(\Delta t)]^2}{N * \sum_{i=1}^N \phi_i(\Delta t)^2} \quad (4)$$

其中 N 為系統內使用者的個數， $\phi_i(\Delta t)$ 為在 Δt 內使用者 i 的 throughput，最後計算出來的結果就是在 Δt 內每位使用者的 throughput 的公平性，最佳的值為 1。

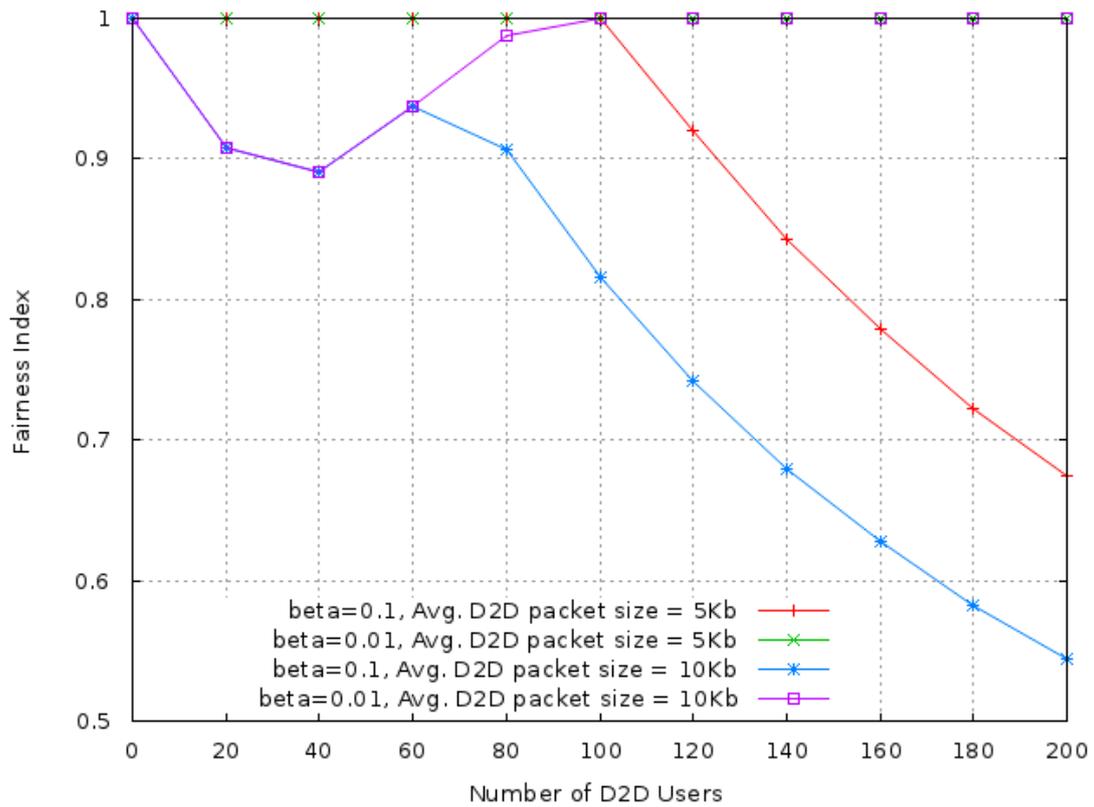


圖 26 Total Fairness

圖 26 以原本的比例式公平資源配置演算法為例，當遺忘因子設為 0.1 及 0.01 時的整體公平性分析。可以看到遺忘因子設為 0.1 的時候，即使平均 cellular 封包大小和平均 D2D 封包大小一樣，整體公平性在系統滿載的時候還是會逐漸下降，這代表著使用者之間的 throughput 差異越來越大，也就是說某些使用者可能會遭受到 starvation；而遺忘因子設為 0.01 的時候，即使平均 D2D 封包大小為 cellular 封包大小的 2 倍，在系統滿載的時候也保有公平性。因此，當系統內使用者數量越多的時候，遺忘因子的值越趨近於 0 其公平性越佳。

五、 結論

在本論文中，我們發現當直接通訊加入至目前的系統中後，cellular 使用者的 throughput 會隨著 D2D 使用者的數量增加而下降，影響到 cellular 的服務品質。並且在原本的比例式公平資源配置演算法之下，當有大量 D2D 使用者有小量需求的時候，cellular 使用者可能會有一段時間無法被配置到資源區塊，因此，我們提出了一套改良的比例式公平資源配置演算法，並加入保證因子，使得 cellular 使用者有一定程度的服務品質。

從模擬結果可以發現，加入保證因子後，儘管 D2D 使用者的數量持續增加，D2D 使用者的 throughput 會達到一個上限值，因此 cellular 使用者能夠被保證有一定程度的 throughput；而根據情況的不同，營運商可以預先設定保證因子的值，甚至 eNodeB 可以根據目前的流量動態地調整保證因子。另外，模擬結果也顯示了遺忘因子對於公平性的影響，我們發現當系統內使用者數量越多的時候，遺忘因子的值越趨近於 0 其公平性越佳。

參考文獻

1. 3GPP, “Technical Specification Group SA; Feasibility Study for Proximity Services (ProSe),” TR 22.803, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), May 2012
2. 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN),” TR 25.913, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Dec. 2009.
3. 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description,” TS 36.401, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Sept. 2011.
4. K. Bogineni, R. Ludwig, P. Mogensen, V. Nandlall, V. Vucetic, B. Yi, and Z. Zvonar, “LTE Part I: Core network,” in *Proc. of IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 40-43, Feb. 2009.
5. 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2,” TS 36.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Mar. 2012.
6. Y. Wang and I. Henning, “A Deterministic Distributed TDMA Scheduling Algorithm for Wireless Sensor Networks,” in *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 2759-2762, Sept. 2007.
7. S. Liu, Z. Luo, Y. Liu, and J. Gao, “Spreading Code Design for Downlink Space-Time-Frequency Spreading CDMA,” in *Proc. of IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 2933-2946, Sept. 2008.
8. G. Berardinelli, L. Ruiz de Temino, S. Frattasi, M. Rahman, and P. Mogensen, “Ofdma vs. sc-fdma: performance comparison in local area imt-a scenarios,” in *Proc. of IEEE Wireless Communications*, vol. 15, pp. 64-72, Oct. 2008.
9. 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation,” TS 36.211, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Dec. 2011.
10. 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception,” TS 36.104, 3rd Generation Partnership Project

- (3GPP), Mar. 2012.
11. 3GPP TSG-RAN WG2 Meeting #57, R2-070585, "Resource fragmentation in LTE uplink", St. Louis, USA, Feb, 2007.
 12. S.-B. Lee, I. Pefkianakis, A. Meyerson, S. Xu and S. Lu, "Proportional fair frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE uplink," in *Proc. of IEEE INFOCOM Mini-Conference*, 2009.
 13. M. Salah, "Comparative performance study of LTE uplink schedulers," in *Queen's University*, 2011.
 14. Y.-R. Haung, Y.-B. Lin, "A bandwidth-on-demand strategy for GPRS," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 4, pp.1394-1399, July 2005.
 15. K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-Device communication as an underlay to LTE-advanced networks," in *IEEE Communication Magazine*, vol. 47, no. 12, pp. 42-40, Dec. 2009.
 16. K. Doppler, M. Rinne, P. Jänis, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-Device Communications; Functional Prospects for LTE-Advanced Networks," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2009.
 17. H. S. Chae, J. Gu, B. Choi, and Y. Chung, "Radio Resource Allocation Scheme for Device-to-Device Communication in Cellular Networks Using Fractional Frequency Reuse," in *Proc. of 17th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2011.
 18. P. Jänis, V. Koivunen, C. Ribeiro, J. Korhonen, K. Doppler, and K. Hugl, "Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlaying cellular networks," in *Proc. of IEEE Vehicular Technologies Conference (VTC Spring)*, April 2009.
 19. B. Wang, L. Chen, X. Chen, X. Zhang, and D. Yang, "Resource Allocation Optimization for Device-to-Device Communication Underlaying Cellular Networks," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2011.
 20. The network simulator - ns-2, available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns>