

國立臺灣大學電機資訊學院電機工程學系

碩士論文

Department of Electrical Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Taiwan University

Master Thesis

Macrocell 與 Femtocell 共存系統數據流量建模與阻隔

機率計算

Modeling and Blocking Probability Calculation of Data

Traffic in Macrocell and Femtocell Coexistence

Networks

施懿瑄

Yi-Hsuan Shih

指導教授：張時中 博士

Advisor: Shi-Chung Chang, Ph.D.

中華民國 101 年 10 月

October, 2012



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

Macrocell 與 Femtocell 共存系統數據流量建模與阻隔機  
率計算

Modeling and Blocking Probability Calculation of Data  
Traffic in Macrocell and Femtocell Coexistence Networks

本論文係施懿瑄君（學號 R99921001）在國立臺灣大學電機工程  
學系研究所所完成之碩士學位論文，於民國 101 年 10 月 26 日承下列  
考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

施懿瑄

蔡志翁

魏玄宇

董天立

林宗男

指導教授：

張時中

系主任、所長：

顏昭勳



## 致謝

首先要感謝台灣大學電機工程研究所的栽培，提供我進修的機會，以及感謝指導教授張時中博士的諄諄教誨，使我無論在研究工作或是待人處世上都受惠良多，也使得本論文能夠順利完成。在此亦感謝口試委員：林宗男教授、黃天立博士、蔡志宏教授、魏宏宇副教授、魏學文教授提供寶貴的建議與指正，使得本論文更臻完善。本論文係由國科會計畫（編號 NSC9998-2221-E-002-138-MY3、99-2219-E-002-004 與 100-2218-E-002-027-MY3）的部份支持下完成，特此致謝。

亦要感謝兩年多研究所期間 Lab207 的夥伴們：To 輝哥，你去印度的經驗真的讓我印象深刻，希望有機會能聽你講在國外的經歷與故事；To 小高學姐，謝謝妳提供舒適的宿舍給我住，生活上也常有許多事情麻煩過妳，真是感謝妳的照顧(笑)；To 阿丞學長，研究上許多地方多虧有你的指教，適時給予我意見並一起討論讓我能漸入佳境；To 佳穎學姐，感謝妳的邀請，讓我有機會吃到 Rose & Brownie 的玫瑰巧克力(笑)，希望妳在台中工作能順利；To 翰翰學長，研究上許多 idea 都來自你，真是太感謝了；To 明儒，多謝你分享許多訊息與經驗，也謝謝你在研究上的協助，希望你在事業上能一飛衝天；To 石頭，很高興能有個學弟陪我聊得天花亂墜，祝你修課與研究上一切順利！To 松晏，平日看你總是超級認真!! 讓我相形下總是慚愧，不過相信你是個非常能找出自己樂趣的學弟，有空可以跟大家一起瘋囉；To 中煒，你跟松晏一樣認真(笑)!! 而且最近才知道你是馬拉松健將，哈，能有你三分之一運動精神就好了！另外也謝謝小招學長推薦的中醫以及眼鏡店，學長知識太廣了，幾乎什麼都可以跟你討論，也感謝跟你討論讓我在研究上更有頭緒；弘唯學長常有出遊的規劃，可惜還沒機會跟上你們安排的行程 XD，希望你們兩位出國一切順利！不保常陪我逛街吃飯，有事沒事都可以找妳出來聊聊真的很開心，祝妳之後工作順利以及出國研究的計畫能盡快成行！問了你一堆關於工作資訊，感謝紫砂的分享囉！培耕，與妳跟不保好像常在不同活

動(3Q 營等等)中不期而遇，而妳正向積極的意見也總是能讓我更勇往直前，祝妳研究上一切順利囉；另外感謝阿墨、nono、庭育學長能一起歡樂，佑政、佑榮學長當兵順利、憲憲跟庭瑋研究順利、逸群學長在國外能一帆風順、三位學弟勁瑋、兆慶及蝌蚪，希望大家都能逐漸往自己的夢想更近一步

感謝助理小胖、晴涵以及姿宜總是給予研究生們適當的協助，讓我們能專心在研究上 XD，能跟晴涵一起運動打籃球非常開心；姿宜籌畫了許多活動，讓實驗室成員參與，能融入真的非常歡樂。

由衷謝謝庭伊與田博，在我困頓徬徨的時候總是陪我聊天散心，並給予我正向的意見，祝兩位未來在工作上都能事事順心，也祝田博能順利達到你的夢想；蚊子，有時能與妳聊聊生活及研究上趣事能帶給我歡樂，祝妳在工作上能闖出一片天；感謝三位室友的陪伴與關心，多虧了妳們，讓我在台北有個溫暖的落腳處。

最後要感謝我的父母在我研究過程中始終支持我，並給予鼓勵與肯定，謝謝所有家人的相伴，有你們的關心，我在這趟旅途上走得更加平穩、開心。

## 摘要

毫微微細胞基地台(Femtocell)與巨細胞基地台(macrocell)共存系統是將來行動通訊的趨勢之一，本研究探討在無線端之連結流量需求、資源限制與數據服務效能間的關係，利用連結允入控制機制設計以作為頻寬配置決策的基礎。

具體的研究情境為一個有頻譜執照的電信業者，擁有 macrocell 及 femtocell 共存系統，用戶接取兩子系統進行數據服務，macrocell 訊務流量匯集至後端固網 Iu-ps 介面處，femtocell 訊務流量則匯集至 Iuh 介面以連結網際網路。Connection Admission Control(CAC)分別由 macrocell 子系統的 Radio Network Controller (RNC) 與 femtocell 子系統的 Femtocell GateWay (F-GW)執行，中心管理系統 Admission Control for Coexistence Coordinator (ACCC)統計並管制 macrocell 和 femtocell 用戶的訊務流量。無線資源會限制住來自 macrocell 用戶之流量，新進之用戶連結需求會被 RNC 阻隔，在 femtocell 亦同樣會被 F-GW 阻隔，而影響用戶的連網成功率。

針對用戶需求特性，假設用戶使用數據服務的行為與進行語音服務的產生雷同，以 Poisson 隨機變數描述。連結流量分析模型採用何孟翰, 2011 所提出的以語音服務為基礎；數據服務流量成分包括 macrocell 與 femtocell 子系統用戶的原始產生數據需求，以及因移動而由原子系統切換到另一子系統的數據需求流量，唯依據數據服務不同統計特性加以修改。數據連結流量具有不同的新進連結到達率，且總連結數據流量到達率(包含新進連結與切換連結)依何孟翰, 2011 模型可以 Poisson 過程建模。在單一連結的特性方面，考慮用戶瀏覽網頁及觀看視訊服務，依據 T. C. Wang et al., 2003，我們使用指數分佈模型來描述連結的使用時間。系統(基站)服務特性，WCDMA 技術以單一頻帶利用多個碼同時傳輸多個連結訊務流量，核心網路採用分封交換，多工分享連網頻寬。連網瓶頸在無線接口的 Uu 介面

WCDMA 頻寬限制，使得各數據連結傳輸速率會因同時連結的數目而改變，此特性以 Processor Sharing, PS 模型描述。實務上在 macrocell CAC 對接入網路的數據連結個數有一上限，WCDMA 技術可提供之最大傳輸速率 2Mbps 與 macrocell 單一連結基本頻寬需求之比值  $r$ ，連結傳輸速率因連結數目而變，並有一上限值，我們以有界(bounded)的狀態相依服務速率(State Dependent Service Rate, SDSR)模型描述。同樣地，對 femtocell 子系統亦有一連結數目上限。依據上述用戶連結需求的產生與流量、WCDMA 規約和頻寬共享之特性，採用  $M/\bar{M}_b/1//r$ -PS 模型。

本論文結合 J. Beckers, et al., 2001 及 W. Cohen, 1979 所分別提出的  $M/G/1/\infty$ -PS 穩態機率分析以及有限人數下(finite source population) $M/E_r/1//r$ -PS 的穩態機率分析方法，加入 bounded-SDSR 模型，其中有界(bounded)用以描述 UMTS 傳輸速率有一上限為 2Mbps，以分別求解 macrocell 與 femtocell 阻隔機率解析解。得到解析解。相較於  $M/E_r/1//r$ -PS 的解，因有界傳輸速率限制，每一連結狀態下穩態機率將上升，因而阻隔機率較 SDSR 將上升。

為使用所建模型及所得阻隔機率，依據實際上使用者行為設計當使用者長時間利用無線資源進行數據服務或使用者長時間在室內環境下使用數據服務等情境對於連結阻隔機率的影響。利用 MATLAB 軟體針對這些例子進行數值實驗，結果如下：

(1) 增設 femtocell 可有效降低 macrocell 系統的阻隔機率，因為 femtocell 提供部分用戶流量需求的接取而能減少用戶對 macrocell 接取流量。Femtocell 設置數目由 5 個增加至 20 個，macrocell 阻隔機率下降 23.5%。

(2) Macrocell 的阻隔機率會隨著總流量需求的上升而逐漸升高。當總流量的增

加幅度由 0.4 至 1 連結/秒，阻隔機率上升幅度為 21%。

(3) 用戶在室內之停留時間越久，佔用 femtocell 資源機率越高，可降低 macrocell 阻隔機率，例如用戶在室內停留時間平均值由 1700s 增加至 2400 秒，下降幅度為 1.5%。

總結本論文的本研究之貢獻如下：

1. 探討共存系統數據需求特性以及服務端連結傳輸特性，用戶利用一段持續時間使用數據服務，研究顯示可以依連結持續時間描述；

2. 因分封交換特性，傳輸速率與連結數目成反比，我們以 PS 模型描述此特性；

3. 並經由本研究分析 UMTS 傳輸速率的限制，與一般 SDSR 模型不同，我們另加進有界(bounded)的 SDSR 模型進行分析，以實際針對 UMTS 系統下共存系統的阻隔機率進行解析解。

**關鍵字：**femtocell 與 macrocell 共存系統、數據服務、連結允入控制、連結阻隔機率、有界的狀態相依速率模型、處理器分享模型



# Abstract

The femtocell and macrocell coexisting system is a trend for future mobile communications. In the thesis, we discuss the relationships among user data demand, the wireless band resource limitation and the quality of service of data service. Under the connection admission control (CAC) design, we shall model and analyze connection blocking probability of the coexistence system.

The problem setting is that a wireless service provider (WSP) owns the band license for accessing the 3G mobile networks and operates macrocell and femtocell systems. Connection demand and traffic from macrocell users are multiplexed into the core network, in which traffic was aggregated into the Iu-ps. As for femtocell users, traffic was aggregated into Iuh interface. The Admission Control for Coexistence Coordinator (ACCC) is the central coordinator for CAC of the co-existence networks. CAC is implemented in the Radio Network Controller (RNC) in macrocell and the Femtocell GateWay (F-GW) in femtocell, which put limit on data service connection traffic and affects the connection access probability.

From literature survey of the characteristics of data connection demands and traffic, user mobility and data connection demand for mobile services are similar to voice usage patterns. We thus follow the traffic modeling of by Ho, 2011. The traffic model consists of three parts, the original connection generation in macrocells and femtocells respectively and the handoff traffic from other cells. We further extend the modeling methods to capture data service characteristics.

Data service types considered are web browsing and video streaming. We assume that original data connection demand generation in each cell is a Poisson process. The total connection demand generation with handoff traffic stays Poisson under Ho, 2011 model. The connection holding times are exponentially distributed according to Wang et al., 2003. User data traffic is multiplexed by using the Wide Code Division Multiple Access (WCDMA) technique and transmitted to the core network. So the service is packet-switched and access resources are shared among multiple connections, for which a Processor Sharing (PS) model is proposed. In practice, the number of access connections,  $r$ , has a limitation in macrocells and femtocells according to CAC mechanism. CAC limitation on number of connections is due to ratio of the WCDMA wireless bands limitation of Uu interface and connection bandwidth demand.

As the connection data rate is dependent of the number of connections simultaneously accessing a Macro- or a Femto- cell. It is therefore modeled as State Dependent Service Rate (SDSR) of the cells. Furthermore, WCDMA data rate in UMTS has a maximum value, 2Mbps. We add an upper bound to the per-connection data access rate provided by a cell. In light of WCDMA protocol and the data traffic characteristics, we model the user aspects and the base station as an  $M/\overline{M}_b/1/r$ -PS queueing model.

We combine and extend the analysis methods for  $M/G/1/\infty$ -PS by Beckers, et al., 2001, and the finite population model of Cohen, 1979, to analyze the  $M/\overline{M}_b/1/r$ -PS queueing model with a bounded-State Dependent Service Rate (b-SDSR) and derive

macrocell and femtocell blocking probability. Comparing to analysis results of the M/ $E_r/1/r$ -PS model, the blocking probabilities may increase because of the bounds on maximum service rate per connection and maximum number of connections.

Scenarios are designed to study how user usage factors of connection holding times and indoor times impact on blocking probabilities. Numerical results were obtained by using the mathematical software MATLAB as follows:

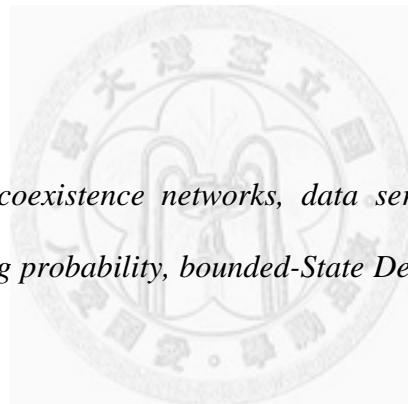
- i. Deployment of femtocells can effectively reduce connection blocking probability of a macrocell, because some of the users can access femtocells, and hence the traffic in macrocell can be relieved. When total system arrival rate equals to 1 connection/sec and the number of femtocells increases from 5 to 20, the blocking probability of the macrocell decreases by 23.5%.
- ii. When total arrival rate to the system increases, the macrocell blocking probability increases. It can be seen that when the system traffic increases from 0.4 to 1 connection per second, the blocking probability increases by 21%.
- iii. Under the condition of fixed mean connection times of a user, if users stay indoor environments for longer time, the macrocell blocking probability decreases. For example, when mean indoor times changes from 1700 to 2400 seconds, the blocking probability decreases by 1.5%.

In this thesis, we discuss and analyze the characteristics of data service, and the adoption of a queueing model for analytical results, the contributions are as follows:

- i. Discuss the limitation of WCDMA wireless band. We can grasp the relationship of the user demand traffic end, the data service holds for some times, which we denote it as a connection holding time;
- ii. Analyze the packet-switched characteristics, the data rate is inversely proportional to number of connections, which we adopt a PS model;
- iii. UMTS data rate limitation makes the SDSR different from our design. We add the bounded-SDSR for blocking probability calculation.

**Keywords:**

*Femtocell and macrocell coexistence networks, data service, connection admission control, connection blocking probability, bounded-State Dependent Service Rate model, processor sharing model*



# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	v
目錄 .....	ix
圖目錄 .....	xiii
表目錄 .....	xv
第一章 毫微微細胞基地台(Femtocell)緒論 .....	1
1.1    Femtocell 推出與發展 .....	1
1.2    文獻摘要 .....	3
1.3    研究範疇 .....	6
1.4    論文章節架構 .....	9
第二章 Macrocell 與 Femtocell 共存系統連結阻隔機率建模議題 .....	11
2.1    Macrocell 及 Femtocell 共存系統架構 .....	12
2.1.1  共存系統架構 .....	13
2.1.2  協定堆疊 .....	14
2.1.2.1  Macrocell 協定堆疊 .....	15
2.1.2.2  Femtocell 協定堆疊 .....	16
2.1.3  WCDMA 技術 .....	18
2.2    資源容量瓶頸 .....	19
2.2.1  Iu-ps 介面協定 .....	20
2.2.2  固網接口容量 .....	22
2.2.3  連結允入控制 .....	23
2.3    UMTS 服務類型 .....	25
2.3.1  無線接取乘載 .....	27

2.4	Macrocell 與 Femtocell 共存系統阻隔機率建模問題與挑戰 .....	28
2.4.1	共存固網容量的阻隔機率計算之問題描述 .....	29
2.4.2	阻隔機率分析的挑戰 .....	30
<b>第三章 Macrocell 與 Femtocell 共存系統阻隔機率模型 .....</b>	<b>33</b>	
3.1	數據流量模型建立需求 .....	33
3.1.1	模型情境設定 .....	34
3.1.2	共存系統 CAC 機制 .....	34
3.2	連結阻隔機率模型符號定義 .....	37
3.3	基站數據服務流量建模 .....	40
3.3.1	Macrocell 連結需求 .....	43
3.3.1.1	Macrocell 資源佔用時間 .....	45
3.3.2	單一 Femtocell 系統連結需求 .....	46
3.3.2.1	Femtocell 資源佔用時間 .....	47
3.4	切換流量之機率推導 .....	48
3.5	基站及後端固網數據服務子模型 .....	49
3.5.1	Processor Sharing 原理 .....	49
3.6	基站連結阻隔機率計算 .....	50
3.6.1	服務速率特性 .....	52
3.6.2	Macrocell 連結阻隔機率 .....	54
3.7	整體模型架構 .....	57
<b>第四章 共存系統阻隔機率數值實驗結果與討論 .....</b>	<b>59</b>	
4.1	數值實驗基本參數設定 .....	59
4.2	數值實驗驗證 .....	61
4.3	連結阻隔機率數值實驗與情境應用 .....	65
4.3.1	連結持續時間與阻隔機率之關係 .....	65
4.3.2	用戶室內停留時間對阻隔機率的影響 .....	66

4.3.3	頻寬需求與阻隔機率之關係 .....	68
4.4	Femtocell 分流效應 .....	69
4.5	數值實驗結果綜合討論 .....	69
<b>第五章 結論與未來研究方向 .....</b>		<b>71</b>
5.1	結論 .....	71
5.2	未來研究方向 .....	73
<b>參考文獻 .....</b>		<b>75</b>
<b>附錄 A：指數分佈機率求解 .....</b>		<b>81</b>
<b>附錄 B：<math>M/\bar{M}_b/1//r_1</math>-PS 阻隔機率公式推導 .....</b>		<b>83</b>





# 圖 目 錄

圖 1.1 Cisco 預測 2011-2016 年間數據服務成長幅度 [Cis10].....	2
圖 1.2 Femtocell 無線訊號強度示意圖([RVP10]).....	5
圖 2.1 Femtocell 及 macrocell 共存系統 (修改自[ZhR10]).....	13
圖 2.2 Macrocell 及 femtocell 共存系統架構 (修改自[ZhR10]) .....	14
圖 2.3 UMTS 使用者設備至 GGSN 之 UMTS 軟體協定 (修改自[Li11]).....	16
圖 2.4 3G femtocell 協定堆疊 (修改自[KYF09]) .....	18
圖 2.5 以碼為無線傳輸流量通道的單位 ([Zen07]).....	19
圖 2.6 無線資源與固網資源議題 .....	20
圖 2.7 Iu-ps 介面協定堆疊 (修改自[Cho00]).....	21
圖 2.8 允入控制所涉及的協議訊息 (修改自[ZCJ07]).....	24
圖 2.9 F-GW 的 CAC 演算法 ([CRR09]) .....	25
圖 3.1 加入 ACCC 之 3G UMTS 共存系統架構 .....	37
圖 3.2 ACCC 於共存系統中涉及的協議訊息 .....	37
圖 3.3 使用者設備在 macrocell 與 femtocell 間移動的情境 ([CRR09]) .....	42
圖 3.4 Macrocell 與 femtocell 數據需求產生與轉移示意圖 (修改自[MHH11]) .....	43
圖 3.5 Femtocell 用戶服務之連結持續時間與基站停留時間示意圖 .....	46
圖 3.6 Processor Sharing 示意圖 (修改自[Li11]) .....	50
圖 3.7 頻寬速率共享示意圖 .....	52
圖 3.8 UMTS 系統下頻寬速率共享示意圖 修改自[BHK01] .....	53
圖 3.9 M/M/1 模型的轉移速率 .....	56
圖 3.10 M/M/1-PS 模型的轉移速率 .....	57
圖 3.11 共存系統連結阻隔機率模型架構 .....	58
圖 4.1 Macrocell 阻隔機率與總系統新進需求流量之關係 .....	62

圖 4.2 Macrocell 系統連結數與總系統新進需求流量之關係 .....	65
圖 4.3 Macrocell 使用者連結持續時間與 macrocell 阻隔機率之關係 .....	66
圖 4.4 用戶在室內之停留時間係數與 macrocell 系統阻隔機率之關係 .....	67
圖 4.5 Macrocell 使用者連結頻寬需求與 macrocell 阻隔機率之關係 .....	68
圖 4.6 Femtocell 分流效益對 macrocell 阻隔機率的影響 .....	69



## 表目錄

表 2.1 ATM 調節層之分類與說明 (整理自[Jai94]) .....	22
表 2.2 UMTS 服務類型與目標 QoS (整理自[Sol10]) .....	27
表 2.3 3GPP TS 34.108 定義之 RAB 類型 ([3GP04]) .....	28
表 3.1 M/X/1//Y-PS 模型之比較(X, Y 分別表示不同模型採用的機率分佈) .....	54
表 4.1 數值實驗參數定義與設定 .....	60
表 4.2 數值實驗與模擬實驗阻隔機率的比較 .....	63





# 第一章

## 毫微微細胞基地台(Femtocell)緒論

### 1.1 Femtocell 推出與發展

隨著行動通訊網路技術的進步，第三代行動通訊網路(3<sup>rd</sup> Generation, 3G)的架構與發展已臻成熟。3G 的全球行動通訊系統(Universal Mobile Telecommunication System, UMTS)為 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Party(3GPP)所規範的標準之一，除可讓用戶進行語音通話外，另外提供了行動裝置數據上網的服務，並以分封服務技術讓固網頻寬資源的運用更有效率。UMTS 規範了多種服務型態，讓使用者使用數據服務時能根據所需服務特性獲得需要的品質，如使用網頁瀏覽服務時資訊傳輸對於封包錯誤率的要求、以視訊連線時對於傳輸延遲的要求或是基本傳輸頻寬要求。本研究透過所設計，在既有共存系統頻寬容量配置下分析連結需求阻隔機率，以滿足 UMTS 用戶的數據服務需求。

由於 UMTS 的普及以及智慧型手機等手持裝置的大幅成長，用戶利用行動裝置上網的頻率以及數據流量日益增加，常見數據服務如網路瀏覽、線上觀看視訊節目等行動數據上網服務。由圖 1.1，數據服務行動通訊市場趨勢年複合成長率(Compound Annual Growth Rate, CAGR)指出，行動視訊(Mobile Video)流量為相當具有潛力的服務類型，估計由 2011 年到 2016 年成長幅度可達到 70.5%。除了視訊流量外，由行動 Web(Mobile Web)、行動數據(Mobile Data)佔成長幅度 20%的比例，可看出整體數據封包流量在行動通訊系統中成長幅度相當急遽。[Cis10]指出，數

據封包成長的幅度將在 2016 年達到十倍數以上的成長，顯示未來行動數據具有相當大的成長潛力。

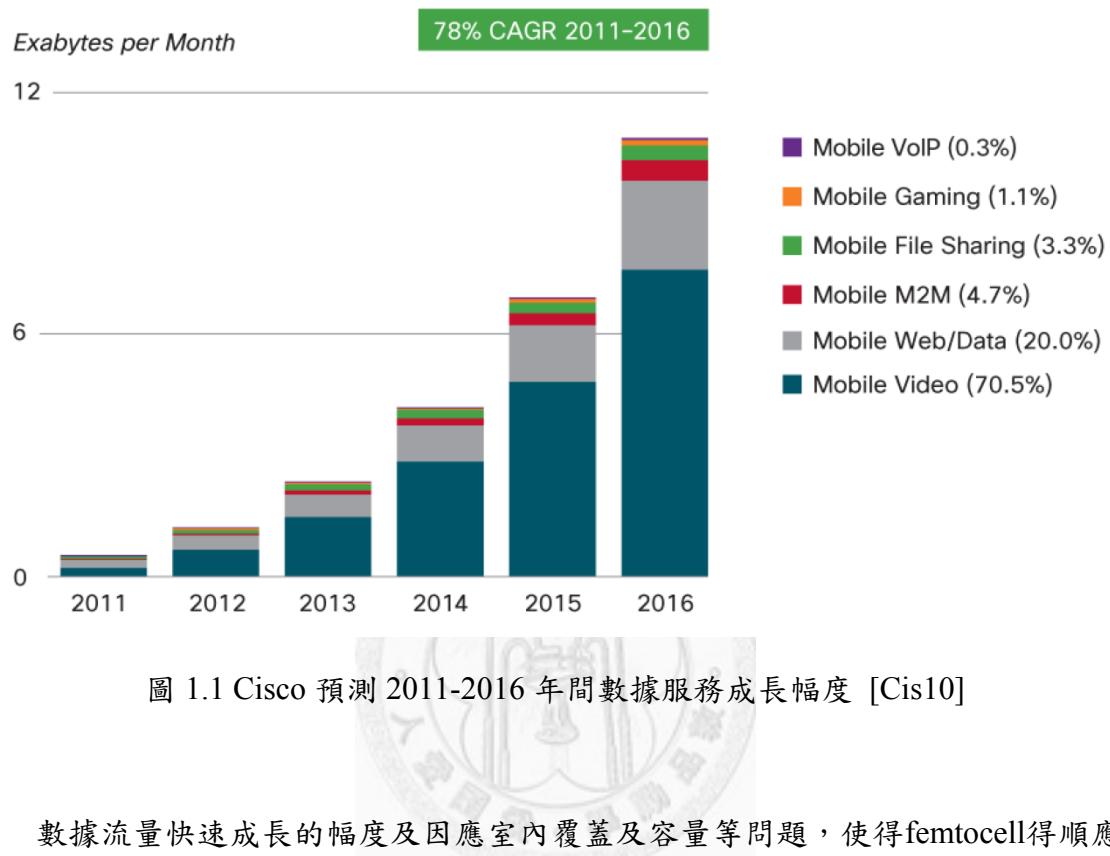


圖 1.1 Cisco 預測 2011-2016 年間數據服務成長幅度 [Cis10]

數據流量快速成長的幅度及因應室內覆蓋及容量等問題，使得femtocell得順應行動通訊網路的進展和移動寬頻化發展潮流而產生，其主要功能為改善目前行動網路的室內覆蓋，以及解決深度覆蓋問題。深度覆蓋問題為當使用的資料傳輸速率越高，室內信號相較於室外訊號的效果越差，如384kbps之傳輸速率，依據[HoT04]的估算，室外之信號覆蓋比例可達到98%，但室內則迅速下降至67%。由於UMTS使用WCDMA技術，行動通訊網路具有呼吸效應，一旦話務及訊務的流量較多，macrocell網路的訊號覆蓋範圍將會降低，導致室內服務品質的下降，因此更需要室內femtocell的裝置以增加室內使用者的訊號品質。

據[CTec11]全球 Femtocell 論壇 2010 年年會發佈的資料，全球已有 60 多個行動網路營運商，包括 Vodafone、AT&T、NTT DOCOMO、中國聯通等，已紛紛展

開 femtocell 的部署與測試。因此我們可預期在未來通訊系統的發展上，因數據服務之流量增長、行動通訊網路的高速傳輸速率以及在室內外的通訊環境中達到無縫接取(seamless access)的目的，在 macrocell 環境下建置 femtocell 是可見趨勢。如何管理異質性接取系統，協調配置資源來達到服務效益為將來行動網路接取的挑戰之一。

Femtocell 是增設於原先 macrocell 行動通訊架構下，另需考量由 femtocell 用戶需求在後端固網容量所增加之數據流量。在此共存行動通訊架構系統下，macrocell 與 femtocell 兩個子系統的數據流量需求，電信業者在給定一配置頻寬比例的情形下，如何因應用戶之需求、給定一基本服務品質(Quality of Service, QoS)，並分析阻隔機率以作為業者評估共存系統效能的指標，是一個值得研究的議題。

## 1.2 文獻摘要

Femtocell 是將來無線網路佈建的重要關鍵，除了對技術有初步概念外，相關研究議題也值得探討，尤其未來的行動通訊網路在數據流量的成長以及因應用戶需求等服務提供、服務品質維持等效能，皆牽涉到共存系統架構管理與設計。

[ChA08]概述了目前 femtocell 的發展現況及相關技術挑戰，其透過不同面向如：穿透率(throughput)、佈建方式、經濟收支等比較了 femtocell 與其它基地台的差異，是相當適合綜觀了解 femtocell 的導論；其中指出 femtocell 所面臨的眾多技術挑戰，分別是時間同步、基地台切換、後端接取(backhaul access)如何提供可接受的 QoS(acceptable QoS)。以後端接取面向而言，例如對延遲時間敏感的流量，以 IP 固網接取流量需保證其 QoS，此外建議固網端應該提供足夠的容量，以避免固網端

頻寬容量潛在瓶頸的問題存在。

[LBE10] 提出一個 femtocell 可分別接取有執照的頻段與無執照的頻段的基礎架構，此基礎架構在一定程度上提高了蜂窩網絡(cellular network)的容量，可以獲得顯著的吞吐量(throughput)增益。在本篇論文中，由於 femtocell 的覆蓋距離短，與 wifi 無線接取點彼此結合，形成一異質性網路，對使用者而言是一個相當好的接取平台。因此利用 femtocell 同時接取授權和免授權頻段，建立此共存架構下的性能分析模型，並通過模擬結果驗證，可分析出在此共存系統架構下的效能增益。然其對於流量的建模與說明並未多所著墨，主要針對此架構之無線接取特性建模與分析。

[RVP10]就可接取 femtocell 的方式做三方面實際 femtocell 訊號強弱的探討，圖 1.2 可顯示出三種情境，其中(a)情境表示僅 femtocell 使用者可接取 femtocell 服務，因此位於戶外的使用者裝置接取到 macrocell 的較弱訊號以及 femtocell 的訊號，反而會有干擾的產生而使得訊號強度很差；(b)情境則為所有使用者皆可接取 femtocell，因此即使使用者裝置位於 macrocell 訊號涵蓋範圍較差的區域，亦可經由接取 femtocell 而獲得可接受的訊號品質；(c)情境則為混合(hybrid)模式，使用者裝置可藉由區分 macrocell 及 femtocell 訊號的強弱程度，來決定接取哪一子系統的服務，因此獲得可接受的服務品質。

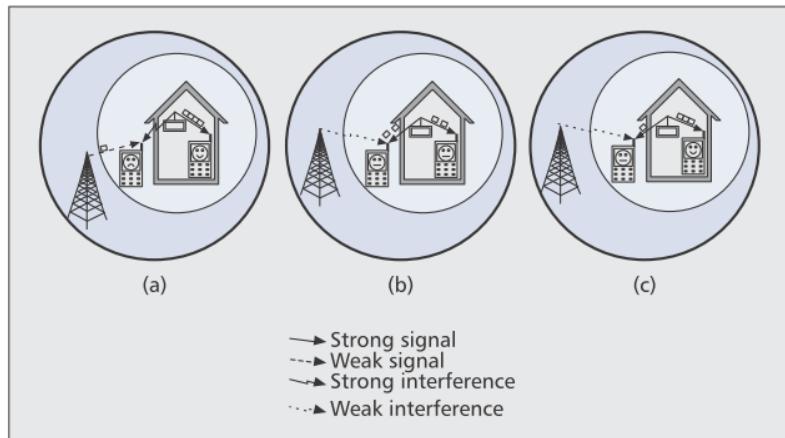


圖 1.2 Femtocell 無線訊號強度示意圖([RVP10])

[SWZ08]考慮 3G 固網端之容量規劃，並以處理器共享原理說明在 TCP 協議中之速率共享，固網容量規畫的目的主要因應數據流量之服務資源通常為頻寬，並不利用如語音服務的專用通道進行傳輸；在此篇中以延遲時間做為定位固網容量的參考指標，並使用 OPNET 網路模擬軟體驗證其分析結果，然而此篇論文考慮單一系統，對於共存系統容量分析可作為流量建模之參考，並未對容量配置與服務品質等進行分析與說明。

[AKY11]提出以時間頻率作為管理無線資源的方式，並已依中央控管機制負責協調多種不同技術間無線資源共享的情形，提出了 FERMI 的資源管理機制。針對不同技術如 WiMAX、WiFi 間無線資源的協調，並區分出不同的傳輸框(frame)機制以在異質網路架構中進行協調與資源分配的功能，並加進激戰間以及使用者裝置間彼此可能有干擾的情況，建立一干擾地圖(interference map)以有效處理多個方塊功能間干擾的情況，最後提出一分配演算法並進行實作，實驗結果顯示利用 FERMI 可有效增加整體網路的產出量(throughput)。

[Fem10]針對業者資源管理可能引發的瓶頸限制作一說明與定義，尤其是因智

慧型手機(smart phone)等行動手持裝置的產生而引發的”健談(chatty)”現象，智慧型手機的使用除了提高基本數據傳輸的量外，另由於使用者應用服務如即時更新、地圖定位等功能將不停蠶食 macrocell 後端連接至固網的專線，並造成相當大的負荷量，因此此篇提出 femtocell 將對數據流量對 macrocell 固網的紓解有實質幫助。

### 1.3 研究範疇

有鑑於 femtocell 與 macrocell 共存系統是於將來行動通訊的趨勢之一，如何管理異質性接取系統，協調配置資源來達到服務效益為將來行動網路接取的挑戰之一，本研究探討 femtocell 及 macrocell 共存系統之數據連結流量需求、固網端頻寬配置與數據服務效能間的關係，以作為頻寬配置決策的基礎。

具體的研究情境為一個有頻譜執照的電信業者，擁有 macrocell 及 femtocell 共存系統，用戶接取兩子系統進行數據服務，macrocell 訊務流量匯集至後端固網 Iu-ps 介面處，femtocell 訊務流量則匯集至 Iuh 介面以連結網際網路。Connection Admission Control(CAC)分別由 macrocell 子系統的 Radio Network Controller, RNC 與 femtocell 子系統的 FemtocellGateWay, F-GW 執行，中心管理系統 Admission Control for Coexistence Coordinator(ACCC)統計並管制 macrocell 和 femtocell 用戶的訊務流量。無線資源會限制來自 macrocell 以及 femtocell 用戶之流量，macrocell 新進之用戶連結需求會被 RNC 阻隔，在 femtocell 亦同樣會被 F-GW 阻隔，而影響用戶的連網成功率。

針對用戶需求特性，假設用戶使用數據服務與語音服務需求的產生雷同，以 Poisson 隨機變數描述。連結流量分析模型採用何孟翰，2011，所提出的以語音服

務為基礎的模型進行修改。該模型中服務流量成分包括用戶各自於 macrocell 與 femtocell 子系統原始產生的數據服務需求，以及因移動而由原子系統切換到另一子系統的數據需求流量，本論文研究再依據數據服務不同統計特性如不同的新進連結到達率、連結持續時間以及數據服務傳輸速率加以修改。在單一連結的特性方面，考慮用戶瀏覽網頁及觀看視訊服務，依據 T. C. Wang et al., 2003，我們使用指數分佈模型來描述連結的使用時間。

系統(基站)服務特性則考慮 WCDMA 技術以單一頻帶利用多個碼同時傳輸多個連結訊務流量，且在核心網路採用分封交換，多工分享連網頻寬。連網瓶頸在無線接口 Uu 介面 WCDMA 頻帶的限制，使得各數據連結傳輸速率會因同時連結的數目而改變。實務上在 macrocell CAC 會對接入網路的數據連結個數有一上限，例如無線頻寬可提供之最大傳輸速率 2Mbps 與 macrocell 單一連結基本頻寬需求之比值  $r_1$ 。同樣地，在 femtocell 使用與 macrocell 獨立的頻帶，因此無線頻寬可提供之最大傳輸速率 2Mbps 與 femtocell 單一連結基本頻寬需求之比值  $r_2$ 。

分封網路傳輸速率因共享特性而與系統連結數成反比，亦即為狀態相依服務速率(State Dependent Service Rate, SDSR)。UMTS 系統下，使用者數據服務峰值傳輸速率為 2Mbps，表示單一連結傳輸速率有上限，因此加入有界(bounded)的 SDSR(bounded-SDSR)模型以描述此特性。藉由分封交換，在 Iu-ps 介面共享固網頻寬資源，因而將分封交換特性建模為 PS 系統。依據上述用戶連結需求的產生與流量、WCDMA 規約和頻寬共享之特性，採用  $M/\bar{M}_b/1//r_i\text{-PS}$  模型， $i=1,2$  分別表示 macrocell 及 femtocell 兩子系統。

本論文結合 J. Beckers, et al., 2001 及 W. Cohen, 1979 所分別提出的  $M/G/1/\infty$ -PS 穩態機率分析以及有限連結數下(finite source population) $M/E_r/1//r\text{-PS}$  的穩態機

率分析方法，加上針對有界狀態相依服務速率(bounded-State Dependent Service Rate, b-SDSR)特性，分別求解 macrocell 與 femtocell 阻隔機率，得到解析解。相較於  $M/E_r/1/r$ -PS 的解，因有界傳輸速率限制，每一連結狀態下穩態機率將上升，因而阻隔機率較 SDSR 將上升。

為使用所建模型及所得阻隔機率，依據相關文獻研究使用者行為設計當使用者長時間利用無線資源進行數據服務或使用者長時間在室內環境下使用無線數據服務等情境對於連結阻隔機率的影響。利用 MATLAB 軟體針對這些例子進行數值實驗，結果如下：

(1) 增設 femtocell 可有效降低 macrocell 系統的阻隔機率，因為 femtocell 提供部分用戶流量需求的接取而能減少用戶對 macrocell 接取流量。當總流量為 1 連結/秒時，Femtocell 設置數目由 5 個遞增加至 20 個，macrocell 阻隔機率下降 23.5%。

(2) Macrocell 的阻隔機率會隨著總流量需求的上升而逐漸升高。當總流量的增加幅度由 0.4 至 1 連結/秒，阻隔機率上升幅度為 21%。

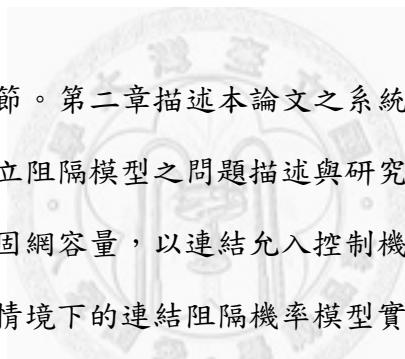
(3) 當一連結室內外總時間固定且總流量固定時，用戶在室內之停留時間越久，佔用 femtocell 資源機率越高，可降低 macrocell 阻隔機率，例如用戶在室內停留時間平均值由 1700s 增加至 2400 秒，下降幅度為 1.5%。

總結本論文的本研究之貢獻如下：

1. 探討共存系統數據需求特性以及服務端連結傳輸特性，用戶利用一段持續時間

- 使用數據服務，研究顯示可以依連結持續時間描述；
2. 因分封交換特性，傳輸速率與連結數目成反比，我們以 PS 模型描述此特性；
  3. 並經由本研究分析 UMTS 傳輸速率的限制，與一般 SDSR 模型不同，我們另加進有界(bounded)的 SDSR 模型進行分析，以實際針對 UMTS 系統下共存系統的阻隔機率進行解析解。

## 1.4 論文章節架構



本論文共分為五個章節。第二章描述本論文之系統架構以及說明共存系統之潛在固網容量瓶頸，以建立阻隔模型之間問題描述與研究挑戰；第三章探討依據數據流量需求，給定既有之固網容量，以連結允入控制機制設計以建立連結阻隔機率模型；第四章給定不同情境下的連結阻隔機率模型實驗結果，分析了包括使用者服務品質、連結頻寬需求對共存系統阻隔機率所造成之影響等。第五章則為本篇論文的結論以及未來研究方向。



## 第二章

# Macrocell 與 Femtocell 共存系統連結阻隔機率建模議題

Macrocell 之系統架構已定義在 3GPP(3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project)規範中，而目前業界所使用的 femtocell 協定堆疊(protocol stack)等技術細節也已制定 [KYF09]，然而對於 femtocell 與 macrocell 共存系統資源配置與管理等則無規範，由各業者自行決定。本章將介紹在第三代行動通訊系統(3<sup>rd</sup> generation, 3G)中 femtocell 及 macrocell 共存之系統架構，進而對延伸之資源限制對於用戶服務品質影響等議題進行定義與討論。

何孟翰([MHH11])在 2G femtocell 與 macrocell 共存系統架構下提出 macrocell 與 femtocell 系統語音頻道的最佳化配置，並以話務阻隔機率作為頻道最佳化之指標，設計 RANSAM 作為共存系統頻道分配之配置。論文中所建的語音頻道配置對於話務阻隔機率影響的模型，除依據用戶需求及移動行為模式建立流量需求模型，並依語音服務為一通電話接取一個頻道的服務特性，採用 M/M/c/c 模型作為求解阻隔機率的模型。

本論文延伸考量用戶使用數據服務，首先說明在 3G 共存系統下數據封包的運作與傳遞方式，並考慮後端網路(backhaul)固網容量的限制對用戶在建立數據服務連結時的影響，最後定義主要的研究問題：

1. 無線接取所造成的資源接取限制，以 CAC 機制設計將如何影響兩種系統的連結阻隔機率？
2. 使用者的行為模式會對共存系統造成什麼樣的影響？

本章於 2.1 節將介紹 femtocell 系統和 macrocell 系統共存之架構以及兩者之協定堆疊圖；2.2 節說明行動通訊系統之資源限制以及基站之連結允入控制及與服務需求間的關聯；2.3 節針對 3G 行動通訊系統說明，並列出數據服務類別與需求；2.4 節則具體描述資源配置與本論文所研究之共存系統資源限制與連結阻隔機率間關係建模與分析的情境、定義及所將面對之困難。



## 2.1 Macrocell 及 Femtocell 共存系統架構

Femtocell 及 macrocell 共存之行動網路接取系統如圖 2.1，戶外的使用者透過 macrocell 經由後端專線接取核心網路，並可再連接網際網路等公用網路提供使用者行動數據上網等服務；室內的使用者則透過 Femtocell Access Point(FAP)連接 ADSL/Cable 接取至網際網路。

Macrocell 建置目的為提供大範圍且多使用者的無線訊號覆蓋，而 FAP 則作為室內少數使用者使用的接取點。有關 femtocell 及 macrocell 共存系統之架構將於此節中介紹。

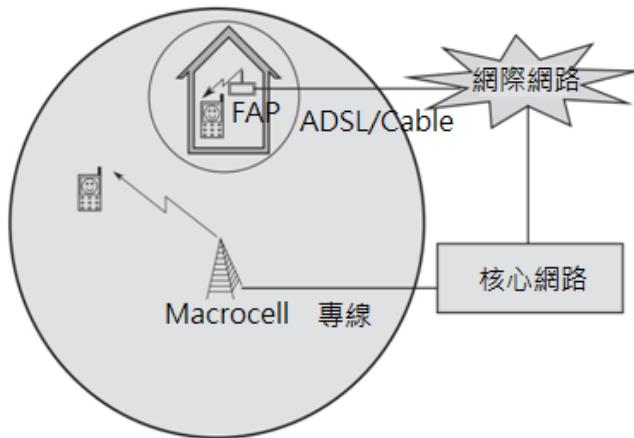


圖 2.1 Femtocell 及 macrocell 共存系統 (修改自[ZhR10])

### 2.1.1 共存系統架構

從系統架構上來看，femtocell 相較於 macrocell 較為獨立；電信業者架設涵蓋範圍大的 macrocell 系統以替使用者提供服務，後端網路須由電信業者額外架設。Femtocell 系統則不同於傳統的蜂巢式 macrocell 系統，由使用者端自行架設一個 FAP 設備，FAP 和 Femtocell GateWay(F-GW)之間的傳輸方式則採用了 ADSL 或 Cable 等有線方式。Femtocell 系統部署方式靈活，透過額外建置 femtocell 而不需將現有的核心網路做任何改變，因此可以利用現存的 macrocell 系統來延伸擴充，包括電信業者採用之技術如第二代行動通訊系統(2<sup>nd</sup> generation, 2G)的全球移動通訊系統(Global System for Mobile, GSM)、3G 的通用行動通訊系統(Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) 以及 3.5G 的高速封包下行存取(High Speed Downlink Packet Access, HSDPA)等。

圖 2.2 為 femtocell 系統與 macrocell 系統之共存架構，包含無線電接取網路以及核心網路兩大部分。其中 macrocell 語音訊號經由電路交換(Iu-cs)被轉送到媒介閘道器(Media GateWay, MGW)處理，並轉送至 Public Switching Telephone

Network(PSTN)進行通話。Femtocell 語音訊號則藉由 Mobile Switching Center(MSC)與 Gateway Mobile Center(GMC)將語音需求轉接到指定的目的地。

Macrocell 負責處理數據封包資料有兩部分，一為 GPRS 服務支援節點(Serving GPRS Support Node, SGSN)節點，另一則為 GPRS 閘道器 (Gateway GPRS Support Node, GGSN)。封包先經由分封交換(Iu-ps)轉送給 SGSN 處理，SGSN 可視為封包轉送的行動數據交換中心，負責將封包轉送至其他 SGSN 或 GGSN，並可記錄使用者設備的當前位置訊息等，而 GGSN 則是行動網路之對外窗口，所有網內的封包皆經由 GGSN 傳送到外部網路，如網際網路等。

Femtocell 數據封包則先由 FAP 接收無線訊號後經 ADSL/Cable 傳送至 F-GW，並經由分封交換轉送給 SGSN 處理，再將訊號經由 Gn 介面轉送至 GGSN 再傳送至網際網路。

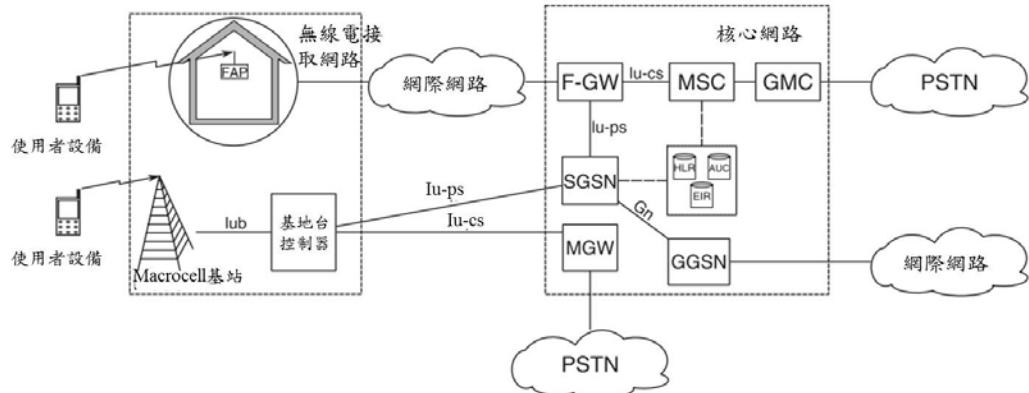


圖 2.2 Macrocell 及 femtocell 共存系統架構 (修改自[ZhR10])

## 2.1.2 協定堆疊

依據 2.1.1 小節所描述的系統架構，本小節分別就 UMTS macrocell 以及

femtocell 兩系統之協定堆疊(protocol stack)進行說明，並列出 femtocell 因應共存系統所新增之協定，來了解數據封包的傳遞過程中 femtocell 與 macrocell 基站與後端網路不同網路元件間的溝通協調流程。

### 2.1.2.1 Macrocell 協定堆疊

圖 2.3 顯示 macrocell 系統從使用者設備至 GGSN 的協定堆疊，無線訊號傳送經由實體層(Physical Layer, 或稱為 Layer 1)與基站溝通，實體層技術為 Wideband Code Division Multiple Access(WCDMA)；實體層之上為無線電連結控制(Radio Link Control, RLC)層與媒介存取控制(Medium Access Control, MAC)層，此兩層亦可合稱為無線電介面協定，是用來建立、設定與釋放無線接入乘載(Radio Access Bearer, RAB)，以供上層其他協定使用。RLC 層提供使用者設備及基站之間連線的管理與無線電連結(radio link)的控制，並且負責使用者控制訊號、資料訊號分割(segmentation)與重傳(retransmission)的功能。當資料訊號傳送到 MAC 層時，MAC 會將 WCDMA 中定義的邏輯通道對應到 MAC 中相對應的傳輸通道，使得資料可以經由傳輸通道傳輸至封包數據匯集協定層(Packet Data Convergence Protocol, PDCP)，PDCP 功能為進行 IP 的壓縮及解壓縮，再經由基站之 GTP-U 協定傳送至 SGSN，GTP-U 之功能為 SGSN 與 GGSN 之溝通介面，或由 GGSN 向外接取網際網路之溝通介面。

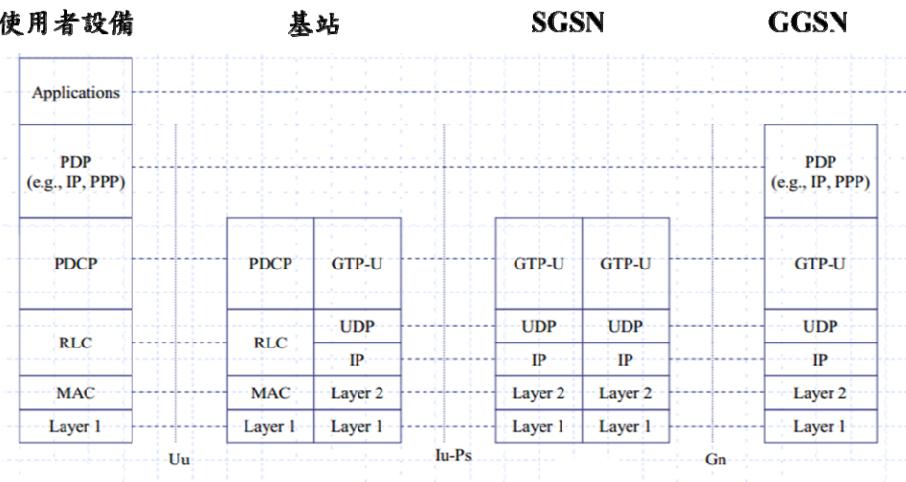


圖 2.3 UMTS 使用者設備至 GGSN 之 UMTS 軟體協定 (修改自 [Li11])

### 2.1.2.2 Femtocell 協定堆疊

Femtocell 軟體協定共包含兩個實體傳輸介面，一個是與使用者設備連通的無線介面，沿用原先 UMTS 基地台控制器(Radio Network Controller, RNC)的無線電資源控制(Radio Resource Control, RRC)、RLC、MAC 等通訊協定標準。由於無線介面在 3GPP 標準組織中發展較為成熟，因此 FAP 與一般使用者設備進行行動傳輸時，並沒有互通相容性的問題存在；另一介面則是接取後端固網之網際網路通訊協定(IP)網路介面，由於涵蓋的協定技術以及標準規範尚在制定中，因此 femtocell 電信業者需面臨網路端各元件相容互通性的挑戰。

如圖 2.4 所示，femtocell 介面所涉及到的協定技術主要包括以下幾個部分：Iuh 協定技術應用在 femtocell 與 Security GateWay(SeGW)之間的溝通；TR069 協定技術應用在 femtocell 與 HMS(Home nodeB Management System)，由電信業者透過 TR069 負責監控 FAP 之運作狀況；本地 IP 流量(Local IP Traffic)技術則應用在分封交換資料傳輸方面；以及由 FAP 至 F-GW 的傳輸協定。

由 FAP 至 F-GW 的通訊協定堆疊如圖 2.4 下方所示，沿用原本 UMTS 中 RNC 的 Iu-ps 介面協定(如 RANAP、Iu-UP 等)，並有全新制訂的 HNBAP(Home NodeB Application Part)及 RANAP 用戶適應性(RANAP User Adaptation, RUA)協定兩個技術規範，此處我們說明 HNBAP 與 RUA 兩個部分：

- HNBAP：訊息傳遞透過底層建立的 SCTP 連線與 F-GW 溝通，此協定主要提供三種功能，分別為 femtocell 註冊功能、UE 註冊功能以及錯誤回報等機制。
- RUA：訊息傳遞透過底層的 SCTP 連線和 F-GW 溝通，此協定取代原本 3G RNC 的傳輸協定，提供連線導向與非連線導向的傳輸服務給上層的 RANAP 協定。



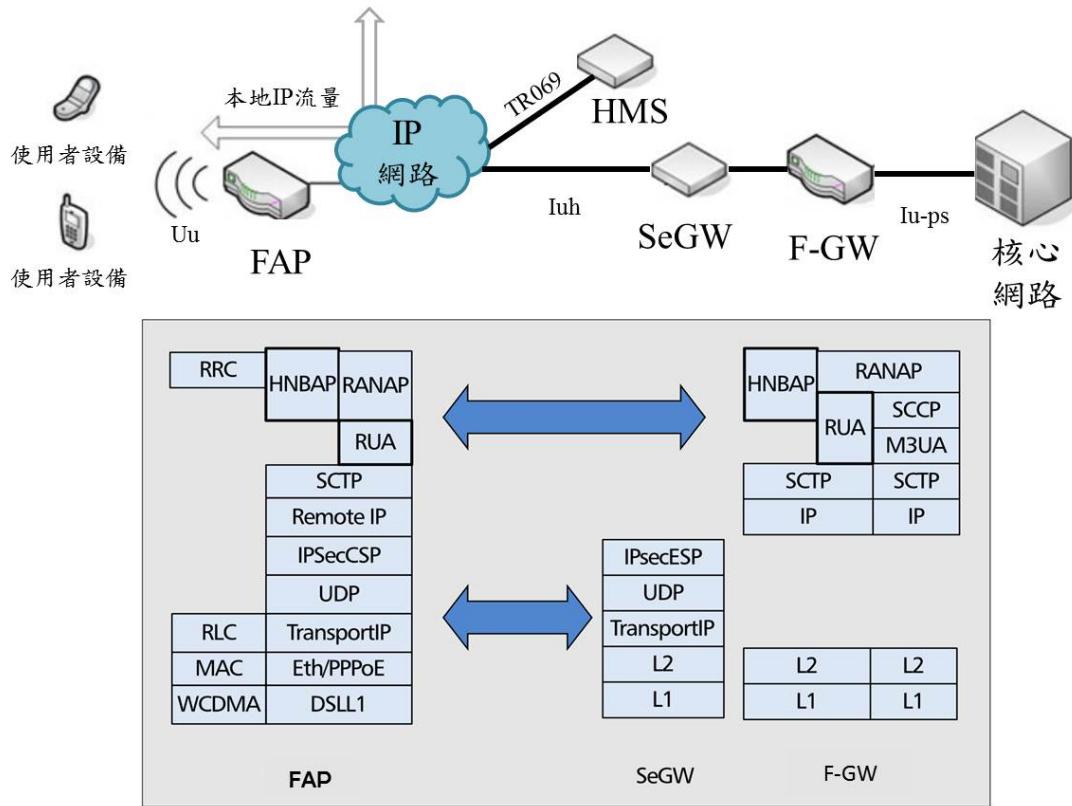


圖 2.4 3G femtocell 協定堆疊 (修改自 [KYF09])

### 2.1.3 WCDMA 技術

UMTS 中 macrocell 與 femtocell 實體層採用之技術為 WCDMA，來實現多重存取。WCDMA 源自於訊號展頻(spreading spectrum)的觀念，利用一個展頻碼將原始訊號進行調變，使原始訊號展開成較寬的頻寬，讓訊號可以以較低功率傳輸資料訊號，到達接收端再由相同展頻碼解展頻出原始訊號，使得訊號較不易受到雜訊及干擾的影響。至於流量通道分配如圖 2.5 所示，WCDMA 是以碼作為無線傳輸流量通道的單位，同一時間同一頻寬可利用多個不同的碼將多個使用者的傳輸訊號展頻，因此讓使用者可同時同頻進行傳輸。

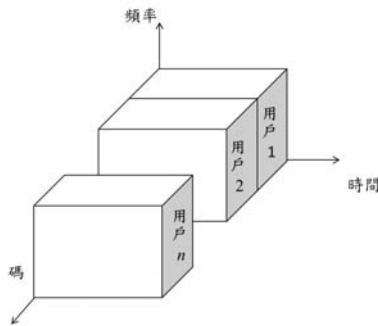


圖 2.5 以碼為無線傳輸流量通道的單位 ([Zen07])

WCDMA 採用正交可變展頻因子(Orthogonal Variable Spreading Factor, OVSF)碼作為碼的產生依據。原始資料訊號的單位是位元(bit)，而經過 OVSF 碼展頻後的單位稱之為碼片(chip)，因此原始訊號經過 WCDMA 技術展頻後的訊號之傳輸速率以碼片速率(chip rate)為單位。OVSF 碼在上下行資料傳輸有著不同的功能，由於不同使用者設備(UE)有連結請求以取得所需服務，因此在上行中藉由 OVSF 碼可用以區分同一使用者設備之資料通道以及控制通道；而下行傳輸資料則可達到使用 OVSF 碼以做為區分不同使用者設備的作用。因此，不同使用者設備之連結請求皆可藉由使用不同的 OVSF 碼加以區分。

## 2.2 資源容量瓶頸

行動通訊系統通常考慮之資源瓶頸包含兩個層面，其一為使用者設備接取至 FAP 或 Macrocell 基站之無線頻譜，另一則為由基站端經由後端接取至有線固網之容量。無線頻譜資源層面包含如頻道資源分配與接取[MHH11]、[Zha10]以及使用者設備與基站間訊號干擾[YMN09]等議題。本研究專注在 macrocell 系統後端接取至有線固網端 Iu-ps 的資源限制對連結流量之分析。

由圖 2.6 我們區分出本研究著重之部分，其中無線電接取網路主要分析在無線

訊號之相關議題，而核心網路中 Iu-ps 介面的限制(圖中紅色方框所示)則為本研究設計連結允入控制的機制所在。

如 2.1.2.2 小節所述，femtocell 的數據訊號由使用者設備接取後送經由 FAP、F-GW、Iu-ps 順序傳送給 SGSN，再透過它的 Gn 介面藉由 GGSN 連接至網際網路；用戶向電信業者申請 FAP 設備時，會由業者裝設後端固網以提供足夠容量給予 femtocell 使用者使用行動數據服務。

Macrocell 接取使用者連結至基站，經由基地台控制器 RNC 透過 Iu-ps 接取至 SGSN，再經過 GGSN 連接至網際網路。藉由[Fem10]說明，因行動用戶使用特性需求，數據封包傳輸訊號相當依賴由 RNC 傳送至 SGSN 的固網接口，因此若由 macrocell 系統的使用者流量或者因 femtocell 切換至 macrocell 系統的用戶流量過高，將導致固網容量頻寬的不足。

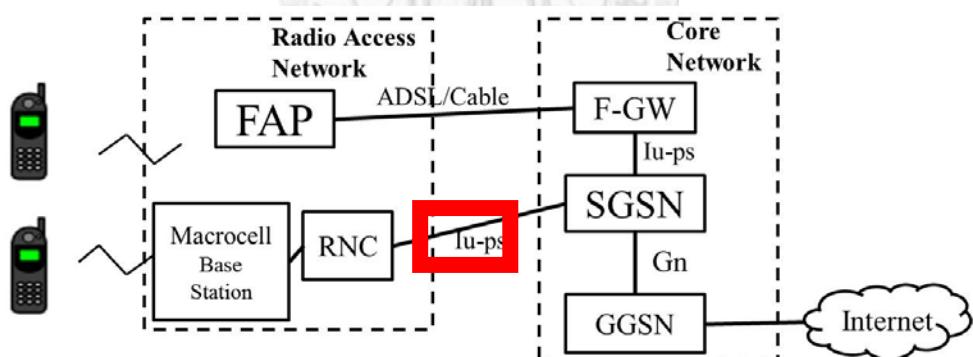


圖 2.6 無線資源與固網資源議題

## 2.2.1 Iu-ps 介面協定

基本了解共存系統中有線端之潛在資源瓶頸為 Iu-ps 介面之頻寬容量後，首先就 Iu-ps 介面技術層面做一探討。如圖 2.6 所示表示 UMTS 之 Iu-ps 固網介面使用 ATM 網路的 ATM Adaptation Layer type 5(AAL5)技術。AAL5 主要的特色為無須建立連線、非即時傳輸以及非固定速率的傳輸，適合用來傳送經過壓縮的封包資料。

依據表 2.1 之說明，ATM Adaptation Layer type 2(AAL2)在 Iu-cs 介面主要是用來傳送使用者的語音資料，而 AAL5 在 Iu-ps 介面則是用來傳送使用者的封包資料，Iu-ps 與 Iu-cs 介面的控制訊號都是透過 AAL5 來傳送的。雖然 AAL5 不像 ATM Adaptation Layer type 3/4(AAL3/4)在切割資料包時，會在每一個資料片段保留一個順序編號，以便於接收端可以在處理資料時從前後的資料順序編號知道是否有資料在傳輸過程中遺失，不過當核心網路採用 AAL5 來傳輸控制訊號或是使用者封包資料時，會在上面負載其它具備偵錯與重傳的通訊協定(例如:SSCOP 與 SCTP)，以協助整個傳輸流程可以更為可靠。

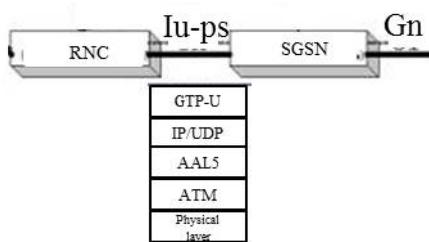


圖 2.7 Iu-ps 介面協定堆疊 (修改自[Cho00])

表 2.1 ATM 調節層之分類與說明 (整理自[Jai94])

ATM 調 節層	屬性	應用	即時性	速率	連線模式
AAL1	A	模擬電路交換	Yes	固定	連線導向
AAL2	B	封包即時影音 資料	Yes	變動	連線導向
AAL3/4	C	檔案傳送(ftp)與 遠端登入(telnet)	No	變動	連線導向
AAL5	D	UDP/IP	No	變動	非連線導 向

## 2.2.2 固網接口容量

影響使用者設備與基站間之傳輸速率為 Iu-ps 固網接口的容量，此處我們稱介面為一接口，以描述數據資料傳輸由一網路元件匯流至另一網路元件。其他固網接口諸如圖 2.3 中 macrocell 系統基站與基地台控制器連接的專線 Iub，或是 FAP 所接取之固網端 ADSL/Cable 等。若固網端之容量過小，即使無線接口容量能達到如 UMTS 之最大理論傳輸速率 2Mbps，在接取後端固網後亦會因固網容量不足而僅能提供較小的數據傳輸速率。

行動通訊用戶在基站有線固網端的需求資源為何？此處我們先由 UMTS 系統之接口做一說明，接著說明 HSDPA 系統。UMTS 系統中，使用者設備至基站的無線接口最高數據傳輸速率理論上為 2Mbps，再連接到分封網路至核心網路 GGSN 的各個不同接口上，包括 Iu-ps 接口及 Iub 接口等，其數據傳輸速率都等於無線接口上的傳輸速率，此為 UMTS 乘載管理的功能，由 RNC 協定堆疊中 RLC 層中的功能方塊，無線資源管理所實現。當引入了 HSDPA 後會有不同的情況[ZCJ07]。3GPP 所定義的 HSDPA 無線接口的數據速率理論上最高可達 14.4Mbps，然而從單一用戶的角度來看，基站中的無線資源是由該用戶與其他使用者在經由基站以不

同編碼來多工共享的，相當於在系統中之使用者平分此 14.4Mbps。

無論是 UMTS 或 HSDPA，若使用者之服務需求流量在無線端接取時無法獲得所需資源，此時位於 RNC 的連結允入控制將阻隔掉部分來自 macrocell 或由 femtocell 使用者轉接至 macrocell 系統的服務，以滿足使用者使用服務之基本傳輸速率需求。

### 2.2.3 連結允入控制

[Li11] 中提出，為保證基本連結傳輸速率可採用連結允入控制(Connection Admission Control, CAC)，因此用戶連結能在通信訊務量過載(overflow)的情況下，避免不穩定性和低吞吐量的情形產生。CAC 目的為根據目前資源是否足夠提供給服務之 QoS 以決定接受或拒絕新的連結，基站系統可採用 CAC 以作為品質保證的依據。通常作為決定 CAC 之評斷標準可有以下幾種：阻隔機率、產出量(throughput)、封包遺失機率等[RSA05]，若是共存系統中使用者過多，CAC 會依據是否系統之效能指標未達到標準而接受或拒絕使用者的連結請求。本論文研究採用連結具有一基本傳輸速率之 CAC 以描述連結需求被阻隔的現象，並以連結阻隔機率做為評估共存系統固網配置之標準。

茲以 macrocell 連結建立請求消息之傳遞過程為例，如系統運作順序圖(sequence diagram)圖 2.8，來說明 CAC 的運作。一開始由使用者設備提出連結建立請求消息，並透過 RNC 中之 RRC 協議和 RANAP 協議，將連結請求傳達到達核心網路，因此再發送連結資源分配消息以觸發連結的建立。連結建立訊息到達後，位於 RNC 之 CAC 演算法負責執行接受或拒絕連結請求建立的步驟，若接受此連結請求，RNC 會透過無線電承載在無線、Iub 接口與 Iu-ps 上建立資源，同樣地，後端所需連結資源在 Iu-ps 接口上建立資源，若建立過程成功，由使用者設備端所

發送的連結需求會給定一回應訊息，以確認無線接入乘載的建立。

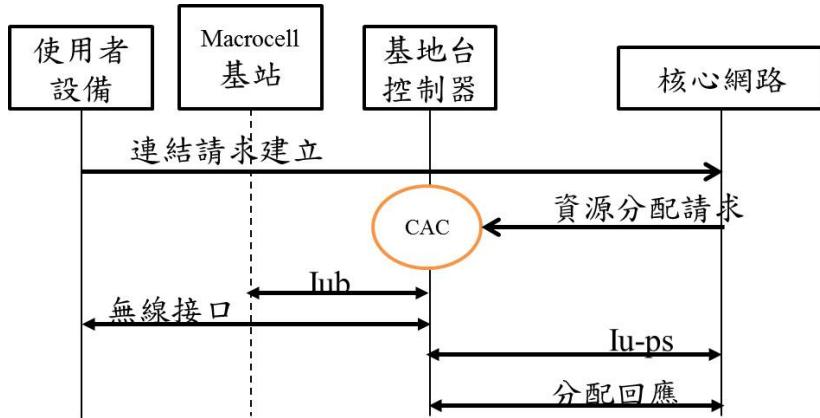


圖 2.8 允入控制所涉及的協議訊息 (修改自 [ZCJ07])

針對有限之無線資源，圖 2.9 舉[CRR09]進行 femtocell CAC 演算法為例，由 femtocell 行動裝置與基站間進行訊號好壞的評估與測量，判定是否傳輸訊號超過一定門檻值(threshold level)，若是(yes)，則依演算法判斷需經過一固定時間的估測判斷是否在時間區間  $T$  內，傳輸訊號品質皆維持在門檻值以上，接著依序判斷在 macrocell 與 femtcoell 系統訊號對干擾的比值( $E_c/I_o$ )的大小，接著進行固網端資源(圖中所示 BW)是否足夠以提供新進流量服務，而決定接取 macrocell 或 femtocell AP 的服務。

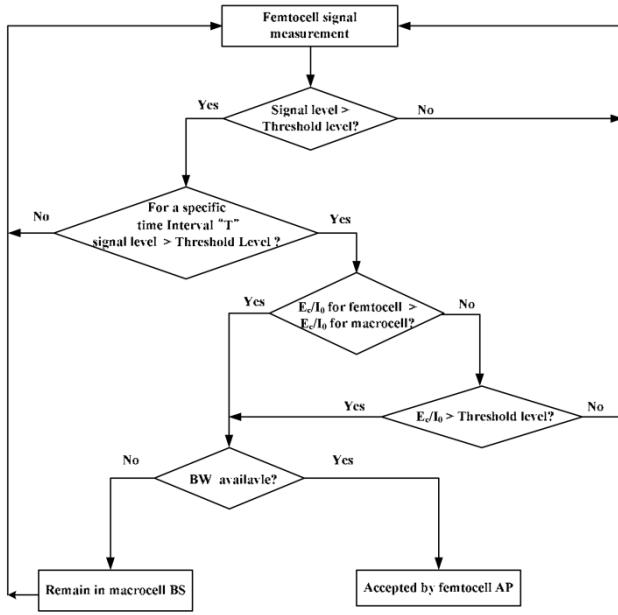


圖 2.9 F-GW 的 CAC 演算法 ([CRR09])

## 2.3 UMTS 服務類型

UMTS 提供不同數據傳輸服務，如利用手機進行傳輸文件、數位影像、聲音及多媒體等服務類型，而不限定於使用語音通話服務。諸如以下為 UMTS 標準所訂定的四種服務類型及其基本特性：

- 會話類型：需保持串流中傳輸資訊之間的時間關係或變化。這類訊務為即時且近乎同步的服務類型，常見應用如語音通話服務，網路電話(Voice over IP, VoIP)等。這類型服務對時間的延遲十分敏感，服務需在一定的延遲時間範圍內完成傳送。
- 串流類型：需保持串流中傳輸資訊之間的時間關係或變化。此類訊務常見為單向傳輸，如由伺服器下載視訊到使用者設備，常見應用如視訊串

流(video streaming)，串流訊務對於延遲時間的要求較會話訊務不嚴苛，但也有一最大延遲時間限制，且常需要較大的頻寬以傳送文字、圖片、影音等資訊。

- 互動類型：通常包含客戶端(client)及服務端(server)，兩端會有請求-回應的動作，另外資料的傳送需具完整性，為一非同步且非即時性的訊務，常見應用如網頁瀏覽(web browsing)。
- 背景類型：接收端並不期待在某一時間內傳輸資訊能到達，亦即對於延遲時間較不要求，但須保持資訊的完整度，常見應用如多媒體訊息服務(multimedia message system, MMS)、e-mail 等。

以上服務類型都有特定的服務特點和服務需求 (Quality of Service, QoS)，諸如延遲時間、傳輸資訊之完整性等。其中，服務類別又可以是否保證其傳輸速率為區分標準，如表 2.2 所示，常見保證傳輸速率的服務類別以會話類型為主，如語音與影像串流服務(video streaming)等，對於封包延遲時間有較高的要求；而不保證傳輸速率的服務類別如網頁瀏覽(WWW)與 e-mail 等服務，其封包延遲時間相對要求較低，所需之傳輸速率為低於 128kbps。

表 2.2 UMTS 服務類型與目標 QoS (整理自 [Sol10])

服務類別	封包延遲上限 (ms)	傳輸速率(kbps)	範例服務
保證傳輸速率	100	4-25	語音服務
	150	32-384	影像串流服務
	300	60	及時遊戲
不保證傳輸速率	300	<128	WWW, e-mail, etc.
	100	4-13	語音服務
		<384	影像串流服務
	300	<384 <64	影像串流服務 (with buffering) p2p 檔案分享

### 2.3.1 無線接取乘載

由於本研究基於連結阻隔機率作為固網配置之效能指標，RAB 為當一個用戶請求一個連結時，此連結需要為了傳送封包訊息而需求的 UMTS 網路中資源，因此由系統所配置給此連結的資源以連結 UE 與 RNC 並傳送至固網端即為 RAB，因此於本節討論 UMTS 中 RAB 特性與類型。

為用戶連結選擇適當的 RAB 主要是由 RNC 中的資源管理功能所實現，且在 RAB 建立請求期間須由 SGSN 提供固網資源資訊及相關參數予 RNC。RAB 通常由以下幾項參數或特性決定：

1. 最大傳輸速率：UMTS 中單位時間內在服務接取點(Service Access Point, SAP)所傳送出或接收到的最大位元(bit)數量。
2. 保證傳輸速率：連結持續時間內在 UMTS 的 SAP 所保證傳送的位元數。

表 2.3 列出由 3GPP 所定義的 RAB，可分別對應於本節起始所介紹之四種服務類型，並可看出就不同之服務類型與需求，用戶連結建立之頻寬有不同之需求。CS 12.2、PS 64 等表示不同的 RAB 類型。

表 2.3 3GPP TS 34.108 定義之 RAB 類型 ([3GP04])

RAB 類型	服務類型(3GPP 34.108)	保證傳輸速率(kbps)
<b>CS 12.2</b>	會話類型 12.2kbps	12.2
<b>PS 64</b>	互動類型/背景類型 64kbps	64
<b>PS 128</b>	互動類型/背景類型 128kbps	128
<b>PS 384</b>	互動類型/背景類型/串流類型 384kbps	384

註:CS 表示電路交換，PS 表示分封交換

保證傳輸速率可被用來應用於連結允入控制作為可提供的資源之基礎，因此可作為共存系統中資源分配的準則。依據[Li11]之實驗，保證傳輸速率可以下列方式達成：macrocell 與 femtocell 系統的 RNC 及 F-GW 會依據 Iu-ps 介面頻寬以及不同 RAB 類型而分配頻寬資源，亦即每個連結會因應不同連結 RAB 的需要而在 Iu-ps 接口上保留一定頻寬資源，因此若 RNC 或 F-GW 無法提供一既有頻寬予任一新進連結的 RAB 需求，此連結無法維持其基本傳輸速率而被阻隔掉。

## 2.4 Macrocell 與 Femtocell 共存系統阻隔機率建模問題與挑戰

在以上 2.1-2.3 節介紹了 macrocell 與 femtocell 共存系統之架構與協定堆疊，描述了用戶之連結需求、數據封包特性、以及系統如何傳送，特別是 UMTS 的部分。Macrocell 與 femtocell 用戶靜止及移動時產生的連結需求，其需求流量由

macrocell 基站與 FAP 分別由不同之使用者元件接取，經基站接取網路匯集到 macrocell 系統核心網路後端 Iu-ps 介面，來提供 macrocell 與 femtocell 使用者數據服務。UMTS 採用分封交換作為傳送數據封包的技術，macrocell 與 femtocell 兩種系統之數據服務使用 macrocell 系統固網端網路 Iu-ps 接口頻寬容量。

在此共存系統架構下，無線接取所造成的限制，以 CAC 機制設計將如何影響兩種系統的連結阻隔機率？以及因無線資源限制，Iu-ps 的資源容量運用及容量可做什麼樣的調整？使用者需求及移動頻率會對接口頻寬的限制產生什麼影響？

#### 2.4.1 共存固網容量的阻隔機率計算之問題描述

在人口密度高或行動通訊訊號在室內品質較差的情況下，使用者為了加強連線使用品質，會在室內裝設 femtocell 來改善。因此使用者可在兩種基站系統間切換接取。[CRR09]指出若使用者經常切換，會對後端固網造成控制訊號傳送顯著的附加負擔(overhead)。

然目前 femtocell 尚未大量佈建，對於原先之 macrocell 系統所造成之影響或分流效果尚未明朗。

共存系統中 macrocell 與 femtocell 需求流量、單一連結頻寬需求以及固網的容量限制三個部分，都會影響連結阻隔機率。本論文擬探討共存系統後端固網無線接口的限制之及連結允入控制如何影響兩種系統的連結阻隔機率，且使用者需求及移動頻率會對共存系統之 CAC 設計產生什麼影響如下：

1. 共存系統後端固網頻寬之配置及連結允入控制如何影響兩種系統的連結阻隔機率：行動網路之無線資源有限，限制了兩系統的流量，需探討分別由 macrocell 與由 femtocell 轉接至 macrocell 系統的兩種流量需求，經由 CAC 機制的設計，業者如何決定 Iu-ps 的固網頻寬，並將對兩種基站之連結阻隔機率造成什麼影響？
2. 使用者的行為模式會對共存系統造成什麼樣的影響：當建置 femtocell 系統之後，探究 femtocell 使用者的行為對 macrocell 系統的影響，諸如在室內的停留時間、使用者在室內的比例、數據服務使用時間、連結頻率的多寡以及服務本身特性等，藉由討論這些因素對於 femtocell 及 macrocell 流量的影響。

本論文藉由建構數學模型來作為 macrocell 與 femtocell 共存系統效能分析的基礎。

## 2.4.2 阻隔機率分析的挑戰

要探討 2.4.1 小節中兩個議題，挑戰如下：

C1. Macrocell 與 femtocell 具有不同的連結需求特性，由[KCF10]，macrocell 用戶可能僅使用諸如網頁瀏覽等能快速瀏覽資訊的數據服務，因此使用頻率較高、使用時間較短且需求頻寬較低；femtocell 用戶則趨向於使用影像串流服務等使用時間較長且需求頻寬較高的數據服務。然而 CAC 設計限制了兩系統連結數量，當 femtocell 滿載而造成阻隔時，其接取失敗的使用者只能轉往使用 macrocell 的頻寬資源，因此阻隔機率的計算與系統需求模型息息相關，不易求解。

C2. 源自 macrocell 與 femtocell 的數據服務連結，在連結期間可能因原先之使用者移動使得需求流量間在 macrocell 與 femtocell 系統轉移，因而影響使用者在室內外的機率、接取 macrocell 子系統後端頻寬連結的數量以及在 macrocell 使用頻寬資源的時間及容量，進而影響連結阻隔機率分析與計算，為另一項挑戰。

故效能指標與系統模型息息相關該如何求解，為本論文所將面對的主要挑戰；其求解目的是為了得知各基站的平均流量需求以分析固網容量能提供多少流量而求解其阻隔機率。





## 第三章

# Macrocell 與 Femtocell 共存系統阻隔機率模型

本章根據第二章所敘述定義的共存系統資源瓶頸所在，以排隊理論為基礎建立連結阻隔機率模型。首先考慮 macrocell 與 femtocell 用戶的數據連結需求到達、移動方式及封包網路的特性來建立無線資源容量限制下的流量模型，並在流量模型上加入連結允入控制(CAC)機制，macrocell 系統可接納之連結數有一上限，其次運用所建模型進行分析，推導出 macrocell 系統之連結阻隔機率。

本章組織如下：在 3.1 節首先敘述系統效能建模分析的問題假設、需求以及可能遭遇到之困難；3.2 節定義模型符號；3.3 節參考[MHH11]分別針對 femtocell 基站及 macrocell 基站以廣義馬可夫鏈分析進行連結數據流量建模；3.5 節分析流量轉移機率；3.6 節分析系統可接納連結數並總結 3.3 節之推導，以求出 macrocell 系統之阻隔機率；3.7 節則總結整體模型架構。

### 3.1 數據流量模型建立需求

共存系統需考慮來自 macrocell 與 femtocell 之連結流量。從建立連結需求的層面來看，在 UMTS 系統中有許多不同的數據服務類型，系統需提供不同的服務頻寬予不同之服務需求，例如第二章所探討的網頁瀏覽頻寬需求為 128kbps 等。本論文首先從單純的情形來探討共存系統效能分析，考慮 macrocell 與 femtocell 系統皆提供單一服務，分別為網頁瀏覽服務及影音串流服務。

由第二章共存系統之架構與說明可得知，行動通訊系統實際存在無線資源的限制，而 macrocell 系統擁有後端固網資源-Iu-ps 介面的頻寬容量，由 RNC 提供頻寬資源予 macrocell 使用者與由 femtocell 轉接至 macrocell 的用戶之數據服務連結。我們利用排隊(queueing)流量模型描述此共存系統。藉由模型建立，我們可探討用戶的服務需求、服務品質、對頻寬的需求以及既有鏈結容量(link capacity)等因素之間的關係，以達到分析服務品質的目的。

### 3.1.1 模型情境設定

系統情境設定為在都市環境中的一個 macrocell 基站及多個 femtocell 基站的共存系統，我們參考[KOC11]，假設業者採用頻帶為不相交(disjoint)的方式以避免 femtocell 間訊號傳輸的干擾。另外根據 AT&T 推出之 femtocell 服務的使用者手冊 [ATT09]，其中建議使用者避免將兩個 femtocell 基站安裝在同一建築物內，且 femtocell 涵蓋範圍小，互相干擾機率低，因此我們假設 femtocell 基站之間涵蓋範圍不相重疊。由於 femtocell 多建置在室內環境，訊號經過如建築物的牆壁等物體阻擋，對於 macrocell 基站所產生之干擾很小，因此假設 femtocell 與 macrocell 之間亦沒有干擾。為簡化而不失重點，本研究暫不考慮 femtocell 用戶會離開此共存系統。

### 3.1.2 共存系統 CAC 機制

圖 2.3 所示之共存系統架構中，因應來自 macrocell 與 femtocell 之連結需求，由 macrocell 架構之 RNC 須對 macrocell 以及 femtocell 連結需求進行個別的 CAC。兩者之上，另有一 ACCC(Admission Control for Coexistence Coordinator)管理系統負

責協調 RNC 所採用之 CAC 機制是否接受新進連結，並提供資訊給 RNC 計算 macrocell 基站的阻隔機率。ACCC 管理系統由資料庫讀入使用者行為統計數值，如用戶需求到達率、使用多久時間等，藉 ACCC 中的連結阻隔機率模型計算出 macrocell 系統的連結阻隔機率。由於 ACCC 能隨著使用者移動行為模式的不同或依不同之連結頻寬需求而計算出 macrocell 基站之阻隔機率，因此可提供電信業者作為管理共存系統之服務品質以及建置固網成本之參考。

本小節旨在討論數據傳輸之頻寬需求特性、連結允入控制及頻寬分配的決策指標，以作為共存系統後端固網連結訊息的傳遞與中央管理協調。我們新設計一個 ACCC 系統方塊如圖 3.1 所示，其中粗黑方塊即為 ACCC，負責協調 RNC 與 F-GW 之 CAC 管理設計。其主要功能設計如下：

我們藉由 HLR 與 SGSN 儲存使用者設備與基站連結時的資訊之功能，可以記錄 macrocell 與 femtocell 使用者連結到達資訊與持續時間，以得知用戶數據連結需求到達以及移動方式特性，作為阻隔機率建模資訊的輸入與建檔。

其他共存系統固網容量之頻寬分享所牽涉到的系統元件與協議分別敘述如下。

在給定之 macrocell 頻寬容量限制下，連結允入控制有一連結數量上限，藉由加入 ACCC 之連結建立程序，我們可依據用戶需求及特性、封包網路特性以及連結數上限值計算共存系統連結阻隔機率。圖 3.2 為參考第二章說明的 macrocell 系統 RNC 允入控制流程加進 ACCC 之設計而成，以表示由使用者設備至 Iu-ps 介面的流程，縱軸往下為時間進行的方向。

(1) 由 macrocell 或 femtocell 使用者設備提出連結建立請求消息，並透過 RRC 和 RANAP 協議到達核心網路。核心網路發送承載(bearer)分配消息以觸發無線電承載的建立(可參照第二章 RAB 的說明)；

(2) 連結建立訊息到達後，如圖 3.2 中紅色雙向箭頭所示，先由 ACCC 與後端固網端 Iu-ps 確認資源是否足夠供應 macrocell 或切換至 macrocell 之 femtocell 連結服務之所需；

(3) ACCC 通知位於 RNC 或 F-GW 之 CAC 演算法負責執行接受或拒絕連結請求建立的步驟，CAC 執行步驟位於圖 3.2 中之橘色橢圓；假設 Iu-ps 具有容量  $BW_{Iu-ps}$  (bps)；

(4) 若接受此連結請求，RNC 會透過無線電承載在無線接口與 Iub 接口上建立資源，使得 macrocell 或切換至 macrocell 系統之 femtocell 用戶連結需求能分別成功接取；

(5) 後端所需連結資源在分封網路接口上建立資源，若建立過程成功，無線電承載訊息會給定一分配回應(response)以確認無線電乘載的建立。

- 進入系統之連結依據 Iu-ps 特性分享頻寬，因此每一接取服務之連結在系統中因應不同之連結數共享頻寬資源，亦即因應系統之連結數目的狀態，單一連結傳輸頻寬容量依不同狀態而變化。
- 以 macrocell 系統阻隔機率之計算作為評估系統效能之準則，由於 CAC 保證進入系統之連結能有一定 QoS，然新進連結被阻隔之機率應較一沒有 CAC 之

共存系統高。

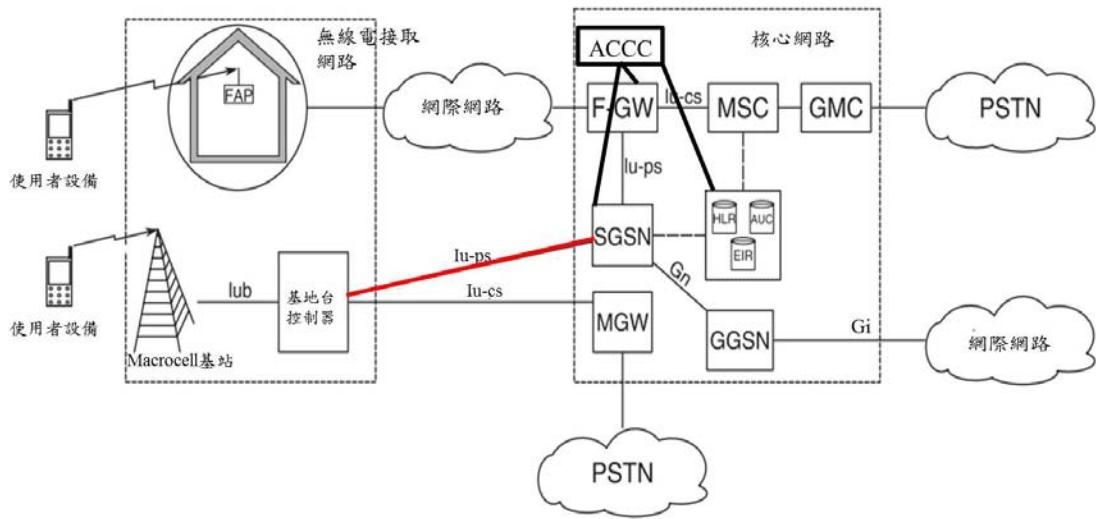


圖 3.1 加入 ACCC 之 3G UMTS 共存系統架構

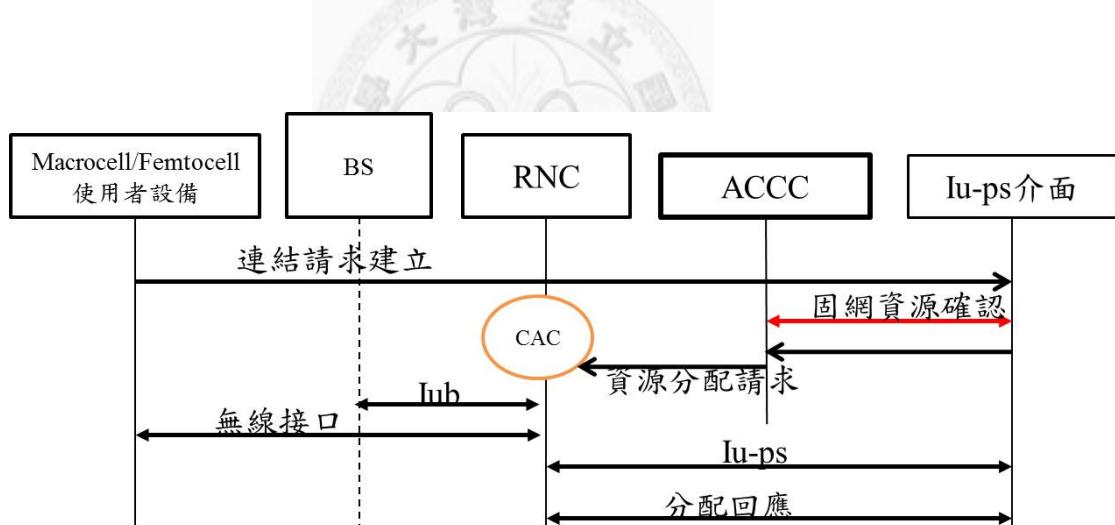


圖 3.2 ACCC 於共存系統中涉及的協議訊息

### 3.2 連結阻隔機率模型符號定義

阻隔機率計算模型由(1)數據連結及流量需求子模型(2)連結的資源佔用時間分析(3)連結及流量移轉子模型(4)macrocell 與 femtocell 連結阻隔機率計算子模型(5)

基站及後端固網數據服務子模型等五個部分所構成。以下茲先定義以下各小節符號表如下：

### 頻寬資源

$BW_{Iu-ps}$ ：macrocell 系統之 Iu-ps 頻寬資源 (bps)；

$bw_1$ ：單一 macrocell 連結需求之頻寬資源 (bps)；

$bw_2$ ：單一 femtocell 連結需求之頻寬資源 (bps)；

### 數據需求到達率

$\lambda_T$ ：Macrocell 及 femtocell 系統之總新進數據需求到達率 (連結/秒)；

$K$ ： $\lambda_T$  與單一用戶數據需求到達率的比值；

$\alpha = \lambda_T / K$ ：單一使用者的數據需求到達率 (連結/秒)；

$\lambda_m$ ：Macrocell 基站的總數據流量到達率 (連結/秒)；

$\lambda_{m,o}$ ：在 macrocell 中開始使用服務造成的數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_{m,fo}$ ：Femtocell 用戶在室外開始造成的數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_{h,fin}$ ：切換到 macrocell 的數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_{h,fmm}$ ：切換到其他 macrocell 的數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_f$ ：單一 femtocell 基站的總數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_{f,o}$ ：在 femtocell 中開始接取所造成的數據需求 (連結/秒)；

$\lambda_{h,mf}$ ：由 macrocell 轉接進 femtocell 的數據需求（連結/秒）；

### 環境參數

$R_f$ ：Femtocell 基站涵蓋半徑（公尺）；

$R_m$ ：Macrocell 基站涵蓋半徑（公尺）；

$L$ ：共存系統總用戶人數（個）；

$J$ ：在單一 femtocell 註冊的用戶人數（個）；

$N$ ：系統中 femtocell 的數目（個）；

$M$ ：系統中 macrocell 的數目（個）；

### 連結持續時間

$T_m \sim \exp(\mu_m)$ ：macrocell 基站用戶使用數據服務的連結時間之隨機變數，機率密度為指數分佈，平均值為  $1/\mu_m$ （秒）；

$T_f \sim \exp(\mu_f)$ ：femtocell 基站用戶使用數據服務的連結時間之隨機變數，機率密度為指數分佈，平均值為  $1/\mu_f$ （秒）；

### 停留時間

$F \sim \exp(\eta_f)$ ：單一 femtocell 用戶在 femtocell 基站範圍內停留時間，機率密度

為指數分佈，平均值為  $1/\eta_f$ （秒）；

$M \sim \exp(\eta_m)$ ：macrocell 用戶在 macrocell 基站範圍內停留時間，機率密度為

指數分佈，平均值為  $1/\eta_m$ （秒）；

機率

$P_m$  : Macrocell 使用者的連結阻隔機率；

$P_{h,fm}$  : Femtocell 使用者因移動由 femtocell 轉接到 macrocell 的機率；

$P_{h,mf}$  : Femtocell 使用者因移動由 macrocell 轉接到 femtocell 的機率；

$q$  : Femtocell 用戶在室內的機率；

### 3.3 基站數據服務流量建模

首先討論連結層面中單一 femtocell 基站及 macrocell 基站的數據流量，假設 femtocell 基站間具有相同之統計性質，因此考慮單一 femtocell 系統用戶之流量特性並延伸到  $N$  個 femtocell 基站。基站數據需求以該基站的連結需求到達率 (arrival rate) 或單位時間內使用者要求接取該基站的服務連結數目來表示，由 macrocell 以及 femtocell 切換至 macrocell 無線接取之連結需求到達接取固網，形成訊務流量匯集到 Iu-ps 介面，後再由 SGSN、GGSN 等網路元件轉送出至網際網路。

由於用戶在基站會有連結需求以及切換連結需求的產生，然連結需求所傳送的訊號經由無線介面、Iub 介面以及如 Iu-ps、SGSN 等設備時，必定會產生訊號傳輸上的延遲(delay)，稱之為傳輸時延。在固網端上傳輸時延因固網線材之傳輸效率高(如光纖、ADSL 等)，因此由[ABI04]中提出固網時延約為 76ms；而我們另外亦假設無線傳輸通道之訊號良好，因此無線傳輸訊號之時延則約為 20ms，與使用者的連結持續時間(以秒為單位)相比非常小，因此忽略固網時延及無線傳輸時延。

[Li11]提出因每個數據服務連結需求為獨立且隨機，則到達過程可以 Poisson 描述，由於用戶拿起行動裝置進行數據服務為一隨機行為，因此我們假設數據連結需求到達為一 Poisson 過程。依據[WMC03]，因用戶使用數據服務時需利用固網頻寬資源以傳輸資訊，而數據連結服務在固網容量中將持續使用頻寬資源一段時間，因此假設連結需求流量有一持續時間，且此連結持續時間因用戶行為具有隨機性，因此我們以指數分佈來描述。

[MHH11]研究共存系統語音流量之建模，將流量區分為幾個部分，包含原本在 macrocell 系統產生的需求流量、原先在 femtocell 產生之需求流量，以及因使用者移動進行切換(handoff)產生之流量以及在 femtocell 被阻隔而轉接至 macrocell 的流量。本小節延伸為數據服務連結的需求模型建立，我們假設用戶拿起行動裝置(如手機等)進行數據服務的行為與用戶使用行動裝置進行語音服務的行為雷同，因此採用[MHH11]將三項流量成因作為連結流量分析的基礎，並依據數據之特性做修改。

資源佔用時間為使用者因使用數據服務而需向 macrocell(femtocell)基站接取固網資源，使用數據服務時用戶因需要瀏覽的資訊而持續處在與基站和固網溝通的狀態，我們假設此一段時間為用戶使用數據服務。數據服務連結持續的時間，依據[WMC03]建議，假設為指數分佈。

各連結的系統切換來自使用者的移動。Femtocell 用戶移動跨越 macrocell 與 femtocell 兩種系統使用數據服務連結，因此 macrocell 基站之連結到達過程具有來自兩獨立系統之需求到達特性。當使用者行動裝置進入另一個基站系統時，ACCC 除了需分析原本之基站系統中產生流量對阻隔機率產生的影響外，另需對切換而來的連線需求流量進行共存資源管理分配與阻隔機率分析。

[CRR09]中提出了三種用戶可能進行切換的情境，如圖 3.3 中 A、B、C 所標示的三種使用者移動情境，詳述如下：A 情境為用戶原先在 macrocell 範圍內接取，然因移動性進入 femtocell 接取範圍復又進入 macrocell 接取範圍；B 情境為用戶由 macrocell 接取範圍進入室內環境而接取 femtocell 資源；C 情境則為用戶由 macrocell 接取範圍進入室內接取邊緣而接取 femtocell 資源。由於本研究考慮使用者在室內及戶外的各種切換可能性，因此三種情境皆為切換流量的考量。另外假設固網端之傳輸的控制信令皆為理想的。另外本研究以考慮 CAC 對於共存系統阻隔機率的影響，因此假設控制信令傳輸成功，切換的流量信號便能成功傳輸。

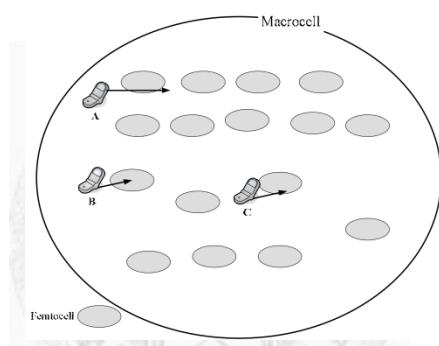


圖 3.3 使用者設備在 macrocell 與 femtocell 間移動的情境 ([CRR09])

圖 3.4 綜觀整個 macrocell 與 femtocell 系統分別的連結需求成因。右方灰色橢圓表示 macrocell 基站流量，包含在 macrocell 中開始使用服務造成的連結需求  $\lambda_{m,o}$ ，femtocell 使用者接取 macrocell 基站所產生之連結需求  $\lambda_{m,fo}$  以及因 femtocell 使用者轉接而至 macrocell 之連結需求  $\lambda_{h,fn}$ 。自 macrocell 基站離去之連結需求包含被服務完之 macrocell 連結(如圖中顯示 End 處)、因資源不足而被阻隔的連結以及因 femtocell 使用者由 macrocell 基站轉接至 femtocell 之切換連結需求。

左方灰色橢圓表示單一 femtocell 基站，包含在 femtocell 中使用者開始使用服

務造成的數據連結需求  $\lambda_{f,o}$ ，以及 femtocell 使用者原先在 macrocell 使用之數據連結需求因轉接而至 femtocell 之流量  $\lambda_{h,mf}$ 。自 femtocell 基站離去之流量包含已結束的 femtocell 連結(如圖中顯示 End 處)、因資源不足之被阻隔的連結和因 femtocell 使用者切換至 macrocell 之轉移流量。

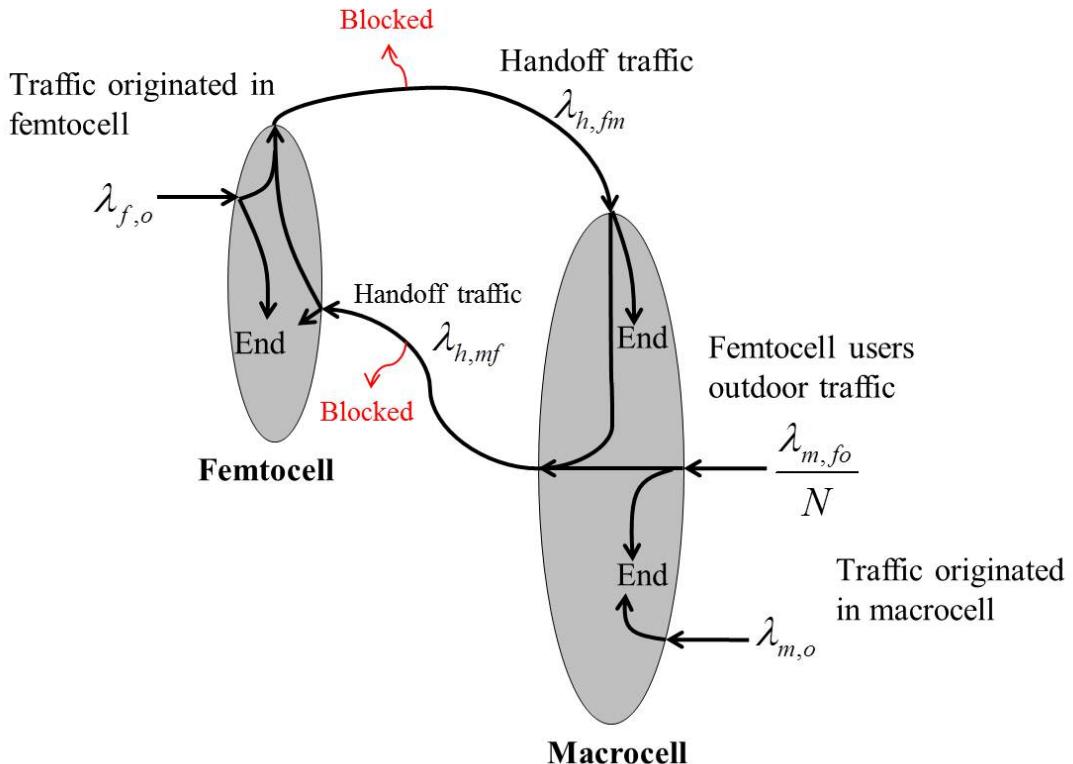


圖 3.4 Macrocell 與 femtocell 數據需求產生與轉移示意圖 (修改自 [MHH11])

其中，假設使用者在系統中為均勻分佈，因此  $q$  為室內停留時間大於戶外停留時間的機率：

$$q = \Pr\{M \leq F\} = \int_0^t f_M(s) \int_t^\infty f_F(s) ds dt = \frac{\eta_m}{\eta_m + \eta_f} \quad (3.1)$$

### 3.3.1 Macrocell 連結需求

由 3.3.1 至 3.4 節數據需求連結流量的推導除了(2)連結的資源佔用分析外以及轉移流量的分析外，其餘流量成因皆依據[MHH11]的分析。我們假設在 macrocell 子系統用戶每次僅有一連結需求。由於每個使用者在其基站範圍內停留時間越久，利用 macrocell 頻寬資源使用數據服務的可能性越高，因此我們推斷在基站範圍內停留的時間將會影響 macrocell 基站的數據需求到達率；在連結持續時間內將會佔用 macrocell 基站的無線資源。

Macrocell 數據需求到達率為  $\lambda_{m,o} + \lambda_{m,fo} + \lambda_{h,fm}$ ，說明列舉如下：

(1) 其中，使用者在 macrocell 中開始服務連結的數據需求到達率  $\lambda_{m,o}$  與 femtocell 中開始服務連結的需求總和為  $\lambda_T$ ：

$$\lambda_{m,o} + N\lambda_{f,o} = \lambda_T \quad (3.2)$$

(2) Femtocell 使用者因在戶外環境而產生的數據服務需求  $\lambda_{m,fo}$  為  $N$  個 femtocell 系統用戶在戶外之機率與單一 femtocell 使用者所產生流量之乘積：

$$\lambda_{m,fo} = N \cdot J \cdot (1 - q) \cdot \alpha \quad (3.3)$$

(3) 假設在 macrocell 系統中進入系統的數據流量與流出系統的數據流量是平衡的，因此 macrocell 之切換連結到達率為 femtocell 使用者因轉接至 macrocell 的連結需求：

$$\lambda_{h,fm} = N\lambda_f \cdot (1 - P_f) \cdot P_{h,fm} \quad (3.4)$$

### 3.3.1.1 Macrocell 資源佔用時間

由於 macrocell 與 femtocell 用戶對數據服務的需求不同，因此 macrocell 資源佔用時間推導結果與[MHH11]分析的結果不同。我們假設使用者的資源佔用時間會因環境因素而改變，亦即當原先在 femtocell 系統內使用服務的用戶，切換到戶外環境後，因戶外環境較吵雜，因此用戶對數據連結的需求會下降(如因為假設戶外 macrocell 使用者的連結需求頻寬較低，使用時間較短，因此 femtocell 用戶切換至 macrocell 基站後需求變更)。

由圖 3.5 可知，舉例連結持續時間為 10 分鐘，而使用者一開始在 femtocell 基站中停留 3 分鐘，則流量接取 femtocell 基站使用資源的貢獻為 3 分鐘，接著因移動轉接至戶外 macrocell 之連結服務 5 分鐘，接取 macrocell 系統使用資源的貢獻為 5 分鐘的流量，依此類推。因此單一連結於 femtocell 基站佔用資源之時間為連結持續時間與在基站停留的時間取其小

(1) 新到達連結流量  $\lambda_{m,o}$  在 macrocell 基站之資源佔用時間，由於連結持續時間會在 macrocell 中使用服務完畢，因此在 macrocell 的連結佔用時間為：

$$\frac{1}{\mu_m} \quad (3.5)$$

(2) 由 femtocell 使用者在 macrocell 產生之流量  $\lambda_{m,fo}$  在 macrocell 基站之資源佔用時間，由於連結時間與停留時間分佈皆為指數分佈，具有無記憶特性，因此(推導詳見附錄 A)：

$$E[\min(M, T_m)] = \frac{1}{\eta_m + \mu_m} \quad (3.6)$$

(3) 切換至 macrocell 之連結流量  $\lambda_{h,fn}$  在 macrocell 之佔用時間，由使用者離開 femtocell 的剩餘服務持續時間與在 macrocell 基站之停留時間取其小  $\min(F, Z)$ ， $Z$  為連結之剩餘時間分佈，由於指數分佈具有無記憶特性，因此可知  $Z \sim \exp(\mu_m)$ ，因此：

$$E[\min(M, Z)] = \frac{1}{\eta_m + \mu_m} \quad (3.7)$$

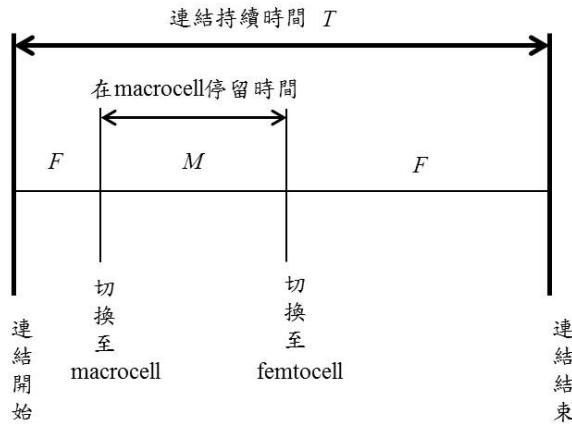


圖 3.5 Femtocell 用戶服務之連結持續時間與基站停留時間示意圖

### 3.3.2 單一 Femtocell 系統連結需求

假設在 femtocell 子系統用戶每次僅有一連結需求。由於每個使用者在其基站範圍內停留時間越久，利用 femtocell 資源使用數據服務的可能性越高，因此我們推斷在基站範圍內停留的時間將會影響 femtocell 基站的數據需求到達率；在連結持續時間內將會使用 femtocell 的無線資源。

考慮 femtocell 中使用者可接取數據連結服務，由流量成因之討論可得知

Femtocell 數據流量為  $\lambda_f = \lambda_{f,o} + \lambda_{h,mf}$ 。

(1) 其中，使用者在 femtocell 中開始服務連結的數據流量  $\lambda_{f,o}$  為一個 femtocell 中使用人數與單一使用者在室內接取的需求到達率之乘積：

$$\lambda_{f,o} = J \cdot q \cdot \alpha \quad (3.10)$$

(2) 假設在一個 femtocell 系統中進入系統的數據流量與流出系統的數據流量是平衡的。因此 femtocell 之切換連結到達率  $\lambda_{h,mf}$  為(i)來自 macrocell 中 femtocell 使用者的連結  $\lambda_{m,fo}$  經切換轉接進入 femtocell 、(ii)由 femtocell 轉接出去的流量  $\lambda_{h,fm}$  復轉接進 femtocell 的流量以及(iii)由 femtocell 切換到其餘 macrocell 復轉接進原本 femtocell 的流量：

$$\lambda_{h,mf} = \frac{(\lambda_{m,fo} + \lambda_{h,fm} + \lambda_{h,fmm})}{N} \cdot (1 - P_m) \cdot P_{h,mf} \quad (3.11)$$

因此，單一 femtocell 之總數據流量為

$$\begin{aligned} \lambda_f &= \lambda_{f,o} + \lambda_{h,mf} \\ &= Jq\alpha + \frac{\lambda_{m,fo} + \lambda_{h,fm} + \lambda_{h,fmm}}{N} \cdot (1 - P_m) \cdot P_{h,mf} \end{aligned} \quad (3.12)$$

### 3.3.2.1 Femtocell 資源佔用時間

同樣地，由於 macrocell 與 femtocell 用戶對數據服務的需求不同，因此 femtocell 資源佔用時間推導結果與[MHH11]分析的結果不同。單一連結在 femtocell 基站資源使用時間為在 macrocell 使用者使用服務的時間與在基站停留時間取其小，因此

(1) 新到達連結流量  $\lambda_{f,o}$  在 femtocell 基站之資源佔用時間，由於連結時間與停留時間分佈皆為指數分佈，具有無記憶特性，因此：

$$E[\min(F, T_f)] = \frac{1}{\eta_f + \mu_f} \quad (3.13)$$

(2) 切換至 femtocell 之連結流量  $\lambda_{h,mf}$  在 femtocell 之資源佔用時間，由使用者離開 macrocell 的剩餘服務持續時間與在 femtocell 基站之停留時間取其小  $\min(F, Y)$ ，令  $Y$  為連結之剩餘時間分佈，由於指數分佈具有無記憶特性，因此可知  $Y \sim \exp(\mu_f)$ ，因此

$$E[\min(F, Y)] = \frac{1}{\eta_f + \mu_f} \quad (3.14)$$

### 3.4 切換流量之機率推導

本節討論連結與流量需求之移轉的模型，使用者在兩種基站中做轉移，造成流量有轉接之現象，因此本小節旨在推導由 macrocell 切換至 femtocell 之流量或反之亦然的切換機率。

#### Femtocell 使用者轉接至 macrocell 之機率

$P_{h,fm}$  為連結持續時間大於在 femtocell 中之停留時間的機率，亦即室內停留時間  $F$  小於 femtocell 使用連結持續時間之隨機變數  $T_F$  的機率：

$$P_{h,fm} = P(F \leq T_f) = \frac{\eta_f}{\eta_f + \mu_f} \quad (3.15)$$

## 3.5 基站及後端固網數據服務子模型

由第二章的討論我們得知，數據服務經由分封網路的傳輸是一相當複雜的行為，需經由如 Iu-ps 及 SGSN 等功能方塊及規約的傳送。為專注於共存系統潛在的瓶頸對阻隔機率的影響，我們假設由使用者設備至 Iu-ps 介面途中所經由轉送的功能方塊皆為理想的，如數據流量不會在 Iub 或其他專線上被阻隔，沒有封包壅塞及傳輸時延等問題。因此服務子模型是建立在基站接取與後端固網頻寬共享的特性上。

[LSG05]提出服務面向以 1-Processor Sharing 模型以求解 UMTS 系統延遲時間，其中”1”表示由 WCDMA 規約，同時同頻下可有多個連結進行傳輸，因此為單一服務端(single server)；而”Processor Sharing(PS)”模型則是數據服務連結的傳輸因著分封網路的特性，而共享所有的固網頻寬資源。

### 3.5.1 Processor Sharing 原理

PS 原本設計作為電腦上單一處理器處理多個任務時能讓多個處理工作藉由不同時槽(time slot)處理任務[Kle76]。最近之研究常用以描述通訊網路中如封包處理、在連結層面 TCP 速率分享特性以及在各個連結中多個連結需共享同一頻寬等特性 [MaR99][Bou82][Li11]。PS 模型提供了一個簡單而有效的方式以描述適應性的傳輸速率(adaptive transmission rate)的傳輸協議，對在網絡中數據服務流量進行建模

[KAK06]。

PS 示意圖如圖 3.6 所示，不同來源之連結可經由 PS 系統將單一連結切割為一單位的處理程序，並在系統中以 Round-Robin 的順序依序進行每個連結的單位處理程序。基於這種理論，可以假設所有活躍中的(active)連結流量的封包傳輸在 Iu-ps 介面固網以同樣準則共享資源，從而仍然可以作為將 Iu-ps 介面建模為 PS 系統。舉例而言，當有一連結需求到達並開始傳送資料，其他正在傳輸之連結立即降低其傳輸速率以提供此連結服務速率共享之特性；當有連結結束服務時，其餘連結亦同時增加其傳輸速率。

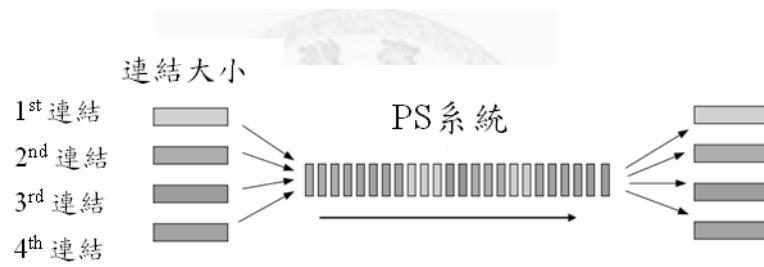


圖 3.6 Processor Sharing 示意圖 (修改自 [Li11])

### 3.6 基站連結阻隔機率計算

此節定義共存系統之狀態空間  $S$ 。 $S$  需滿足(macrocell 或 femtocell 連結個數)與(單一連結需求所需資源)的乘積總和須小於  $BW_{Iu-ps}$ 。

假設  $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$  表示 macrocell 與 femtocell 系統之連結個數； $\mathbf{bw} = \{bw_1, bw_2\}$  表示 macrocell 使用者與 femtocell 使用者連結請求在共存系統中之頻寬需求，定義：

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{bw} \equiv \sum_{i=1}^2 n_i bw_i$$

由於在 macrocell 系統中用戶皆使用網頁瀏覽服務，而 femtocell 用戶則為影音串流服務，因此使用 macrocell 基站資源之使用者所需之頻寬資源  $bw_1$  與使用 femtocell 基站接取之使用者所需之頻寬資源  $bw_2$ 。共存系統中連結個數為來自 macrocell 與 femtocell 兩種不同來源的連結需求，其可行之狀態空間：

$$S \equiv \left\{ \mathbf{n} : \mathbf{n} \cdot \mathbf{bw} \leq BW_{Iu-ps}, 0 \leq n_1 \leq L, 0 \leq n_2 \leq J \right\}$$

其中，在狀態  $\mathbf{n} = \{n_1, n_2\}$  時，其可供應之連結數需符合 macrocell 或 femtocell 中的連結數  $n_1$ (or  $n_2$ ) 及其連結數所需之頻寬資源  $bw_1$ (or  $bw_2$ ) 之乘積需不大於共存系統中所能提供之頻寬資源  $BW_{Iu-ps}$ 。

由於 ACCC 藉由傳遞資訊給 RNC，告知可用資源為  $BW_{Iu-ps}$ ，依不同服務不同系統之服務需求。在狀態空間  $S$  之限制下， $S$  可分為 macrocell 系統與 femtocell 系統獨立的連結狀態  $S_m$  與  $S_f$ ：

$$S_m \equiv \left\{ n_1 \cdot bw_1 \leq BW_{Iu-ps} \right\} \quad (3.18)$$

由[CMT70]證實，PS 模型分析的平衡機率(steady-state probability)與 FCFS 結果無異，此為工作守恆(work conserving)之結果，亦即在此系統中之輸入流量與輸出流量為一平衡的狀態，中間過程則不影響狀態之結果。我們藉由此結果，分析在狀態空間  $S$  之限制下，M/M/1// $r_i$ -PS,  $i = 1, 2$  之平衡機率，分別做為 macrocell 與 femtocell 系統之模型，並以此計算出 macrocell 的阻隔機率。

### 3.6.1 服務速率特性

PS 模型表示當 macrocell 系統中僅存在一個連結時，此單一連結可使用所有的 macrocell 固網資源  $BW_{Iu-ps}$ 。考慮 UMTS 系統，使用者設備端與基站的峰值傳輸速率為 2Mbps，行動裝置因硬體限制[HoT04]無法達到使用所有 macrocell 的資源的傳輸速率。

我們假設數據服務連結持續的時間為指數分佈，然而分封網路傳輸速率因共享特性而與系統連結數成反比，此為狀態相依服務速率(State Dependent Service Rate, SDSR)。一頻寬共享系統可以圖 3.7 表示，縱軸表示單一連結能獲得的傳輸頻寬，而橫軸為系統中具備的連結數。

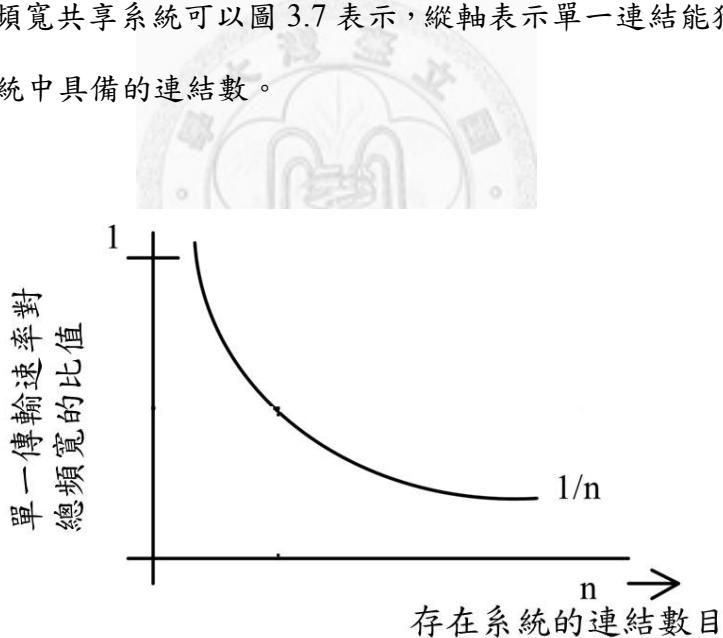


圖 3.7 頻寬速率共享示意圖

UMTS 行動裝置的限制，若狀態相依服務速率在連結數尚未達到  $BW_{Iu-ps}/2Mbps$  時，macrocell 系統中所有連結皆可享有基本 2Mbps 的服務速率。例如當 macrocell 系統中只存在單一連結時，此連結的傳輸頻寬為 2Mbps。圖 3.8 縱

軸表示單一連結能獲得的傳輸頻寬，而橫軸為系統中具備的連結數，顯示在 UMTS 系統下，因傳輸速率上限為 2Mbps，因此在 macrocell 系統中  $\delta = \left( 2\text{Mbps} / BW_{Iu-ps} \right)$ ，表示單一連結有傳輸速率 2Mbps，在 macrocell 頻寬資源(bps) 中所佔比例。

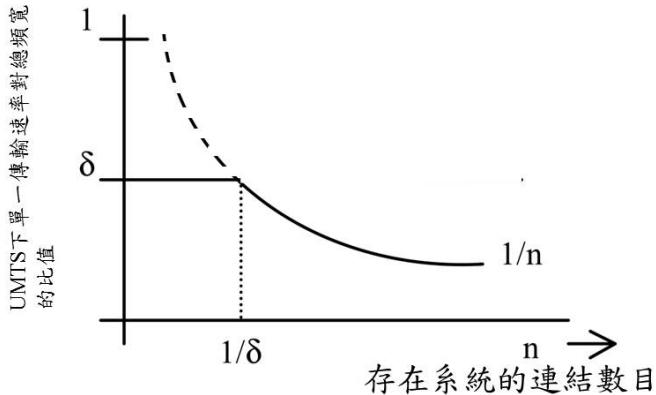


圖 3.8 UMTS 系統下頻寬速率共享示意圖 修改自[BHK01]

上述特性說明本論文並非單純以服務速率為指數分佈特性建模，而是具有界限的(bounded)狀態相依服務速率，因此我們以  $\bar{M}_b$  來表示此服務速率分布。表 4.1 列出本研究模型以及其他採用 M/G/1//r-PS 模型的論文之比較。由 [Coh79] 對於 M/E<sub>r</sub>/1//r-PS 的穩態機率分析，結合[BHK01] 以有界限的狀態相依服務速率(一般性分佈)的分析與求解結果，我們可計算出本研究採用 M/ $\bar{M}_b$ /1//r-PS 的阻隔機率。

表 3.1 M/X/1//Y-PS 模型之比較(X, Y 分別表示不同模型採用的機率分佈)

	到達過程	服務率分佈	服務端 數量	緩衝區 大小	服務紀律
[Coh79]	Poisson(M)	Erlang (E <sub>r</sub> )	1	$\infty$	r-PS
[BHK01]	Poisson(M)	Bounded General(G)	1	$\infty$	$\infty$ -PS
本研究 模型	Poisson(M)	Bounded Exponential( $\bar{M}_b$ )	1	r	r-PS

### 3.6.2 Macrocell 連結阻隔機率

藉由[Coh79]對有限人數(Finite Source Population)的 M/M/1/ $\infty$ /r-PS 的穩態機率求解結果，以及[BHK01]考量有界的服務速率，我們可求解本研究提出之 M/ $\bar{M}_b$ /1// $r_1$ -PS 之平衡機率  $P(r_1)$ ,  $r_1=1,2,\dots,r_1$ ，並以此計算出 macrocell 系統之阻隔機率。

當使用者連結需求進入系統中，看到系統之連結數已達 macrocell 連結數上限  $r_1$ ，則此連結需求會被阻隔掉，因此

$$P_m = P(r_1) = \frac{\binom{L-NJ-1}{r_1} \rho_1^{r_1} \cdot \phi(r_1)}{\sum_{i=0}^{r_1} \binom{L-NJ-1}{n_1} \rho_1^i \cdot \phi(i)} \quad (3.19)$$

其中， $r_1 = \left\lfloor \frac{BW_{Iu-ps}}{bw_1} \right\rfloor$  表示  $\frac{BW_{Iu-ps}}{bw_1}$  的整數部分，為 macrocell 資源可容納之最

大連結數；而由(3.2)至(3.5)、(3.6)至(3.9)，可得知 macrocell 之資源其平均連結到達率與平均連結服務率之比值，或稱之為 PS 系統之服務負荷

$\rho_1 \equiv \frac{bw_1}{BW_{lu-ps}} \cdot \frac{\lambda_{m,o}}{\mu_m} + \frac{bw_2}{BW_{lu-ps}} \cdot \frac{\lambda_{m,fo} + \lambda_{h,fm}}{\eta_m + \mu_m}$  為統一化(normalized)的服務負荷(原本在

macrocell 系統產生的服務負荷，因切換而來的服務負荷以及因滿溢至 macrocell 的

服務負荷總和)， $\frac{bw_1}{BW_{lu-ps}}$  或  $\frac{bw_2}{BW_{lu-ps}}$  分別為單一 macrocell 連結需求頻寬以及切換

至 macrocell 基站的 femtocell 連結需求頻寬在 macrocell 固網頻寬中佔用的比例；

其中我們假設用戶之連結持續時間為系統中 macrocell 用戶使用  $bw_1$  的頻寬對服務

時間的需求(service requirement)；由 3.6.1 節的討論， $n_0 \equiv \left\lfloor \frac{BW_{lu-ps}}{2\text{Mbps}} \right\rfloor$ ，

$$f_m(j) = \begin{cases} \frac{2\text{Mbps}}{BW_{lu-ps}} \equiv \delta, & \text{if } 0 < n_1 < n_0 \\ \frac{1}{j}, & \text{if } n_1 \geq n_0 \end{cases}$$

$$\phi(n_1) \equiv \begin{cases} \left[ \prod_{j=1}^{n_1} f_m(j) \right]^{-1}, & \text{for } 0 < n_1 < n_0 \\ \left[ \prod_{j=1}^{n_0-1} \delta_m \prod_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j} \right]^{-1}, & \text{for } n_1 \geq n_0 \end{cases} \quad (3.20)$$

$f_m(j)$  描述 macrocell PS 模型中連結頻寬共享的特性，表示連結的傳輸頻寬與

總 macrocell 系統頻寬  $BW_m$  的比值。當系統連結數  $j < n_0$  時， $f_m(j) = \frac{2\text{Mbps}}{BW_{lu-ps}}$  表示連

結可保有 2Mbps 的峰值速率；而當連結數超過  $n_0$  時，頻寬平均由  $j > n_0$  個連結數

共享  $\frac{1}{J}$  的頻寬比例直至 macrocell 中系統連結數到達  $r_1$  為止。

上述分析可由排隊理論中馬可夫鏈的角度來看，圖 3.9 舉一 M/M/1 模型的馬可夫狀態轉移圖，每個圓圈中數字表示系統中的連結數目，以  $\lambda$  和  $\mu$  表示此 M/M/1 模型的到達(arrival)轉移速率以及服務率(service rate)：



圖 3.9 M/M/1 模型的轉移速率

由[GST08]的分析結果，上述 M/M/1 模型的穩態機率與  $\lambda$  及  $\mu$  有關，其求解過程簡述如下：

$$0 = -(\lambda + \mu)p_n + \lambda p_{n-1} + \mu p_{n+1}$$

$$0 = -\lambda p_0 + \mu p_1$$

$p_i$  表示 M/M/1 模型中  $i$  個連結數的機率。依上述式子以及  $\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1$ ，我們可

$$\text{求出 } p_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)p_{n-1} = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)p_{n-2} = \dots = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n p_0.$$

依據 M/M/1 模型我們欲藉由上述求解過程求解 M/M/1-PS 模型穩態機率。首先觀察圖 3.10 舉一 M/M/1-PS 模型的馬可夫狀態轉移圖，每個圓圈中數字表示系統中的連結數目，以  $\lambda$  和  $\mu(i)$  表示此 M/M/1 模型的到達轉移速率以及狀態相依服務速率，與 M/M/1 模型不同之處為  $\mu(n)$  會依據系統中連結數而變化， $\mu(n) = n \cdot \mu$ ：

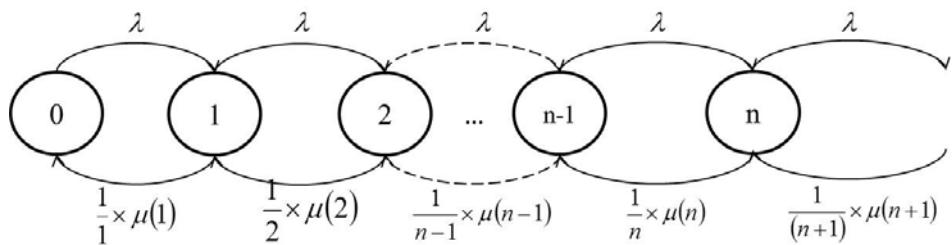


圖 3.10 M/M/1-PS 模型的轉移速率

依據上述分析結果，我們可以看出，M/M/1-PS 的求解結果與 M/M/1 穩態機率相同。而其中  $f_m(j)$  即用以描述在 macrocell 系統中存在  $j$  個連結數目在馬可夫鏈中的係數(如圖 3.9 中  $\mu(j)$ ,  $j=1,2,\dots r_1$  前的係數)。

### 3.7 整體模型架構



前述我們將連結阻隔機率模型分為五個子模型進行分析，包括(1)數據連結及流量需求子模型(2)連結的資源佔用時間分析(3)連結及流量移轉子模型(4)macrocell 與 femtocell 連結阻隔機率計算子模型(5)基站及後端固網數據服務子模型。

圖 3.7 描述整體系統之架構與各個子模型所在處。其中圖中藍色方向線表示(1)數據連結及流量需求子模型，包含 macrocell 與 femtocell 之新進流量分析與成因；(2)連結的佔用時間分析則標示於圖中橘色圓形，描述數據連結對資源的佔用時間；圖中綠色方向線則為移轉流量子模型的分析，包含原先在 macrocell 系統切換至 femtocell 系統或原先在 femtocell 系統的流量而切換至 macrocell 系統；圖中灰色橢圓則說明(5)基站與後端固網服務子模型，包含 macrocell 與 femtocell 提供的服務頻寬需求以及 PS 模型；而紅色方向線則為共存系統阻隔機率求解的模型。

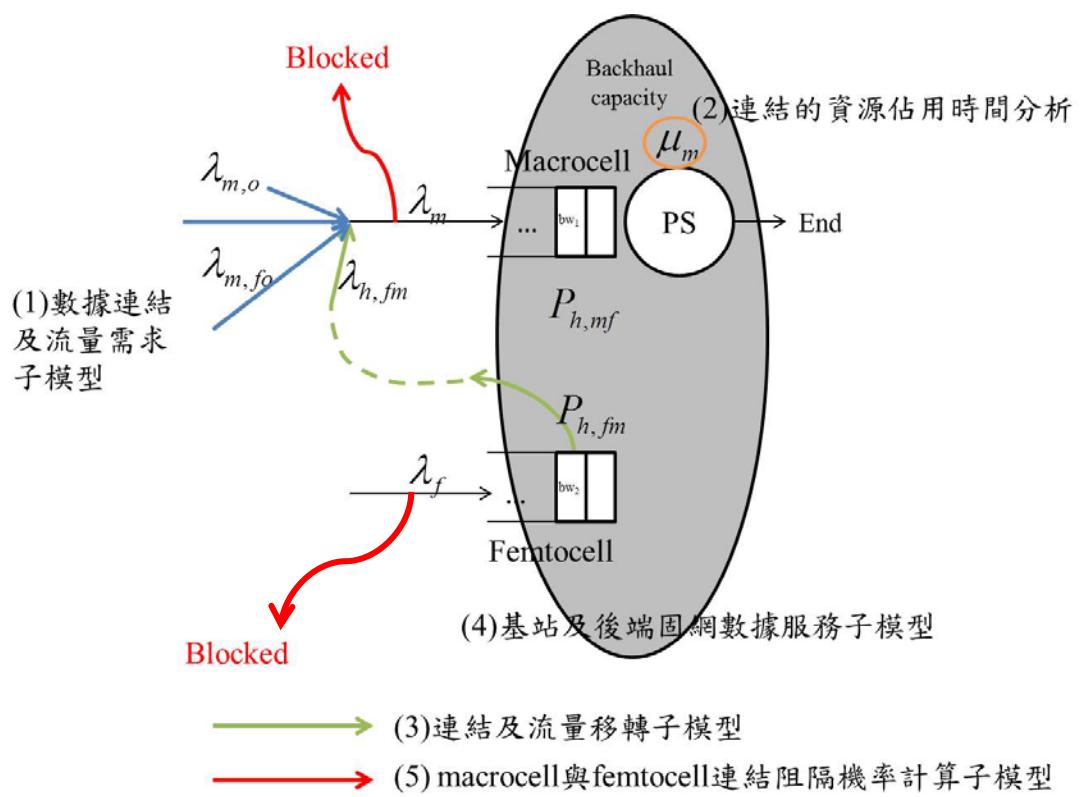


圖 3.11 共存系統連結阻隔機率模型架構

## 第四章

### 共存系統阻隔機率數值實驗結果與討論

本章我們依照第三章所提出的 femtocell 及 macrocell 連結阻隔機率模型，並設計情境來進行數值實驗並分析其結果。討論各種情境下流量分佈、不同服務需求特性等情況下與連結阻隔機率之間的關係。

4.1 節將介紹數值實驗環境中的參數及其數值設定以供後續數值分析討論之用；4.2 節依據系統之特性驗證模型之正確性；4.3 節將討論不同情境以及不同變因下的阻隔機率，以了解用戶需求與系統環境對效能的影響；4.4 節專注探討服務面相如 CAC 對 macrocell 與 femtocell 連結阻隔機率的影響；4.5 節則綜合討論各個數值分析的結果並總結討論。

#### 4.1 數值實驗基本參數設定

本節我們參照第三章提出之共存系統 macrocell 的阻隔機率模型中的參數，個別設定模型於實驗環境中的基本參數之數值，以供後續實驗應用。表 4.1 列舉出進行數值驗證與實驗時會用到的所有參數及其設定值，以下說明設定值選取的考量。由[Yan12]，假設在 macrocell 用戶使用網頁瀏覽服務，頻寬需求為 384kbps，而 femtocell 之使用者則使用影音服務，因此頻寬需求為 2Mbps，依據第二章 RAB 特性，固網頻寬將提供 macrocell 連結 384kbps 及 femtocell 連結 2Mbps 的固網頻寬；由[LSC98, LZC06, WMC03]，假設數據服務的持續時間為指數分佈，且[CHA08]

考慮應用類型如 WWW 等數據服務建議其連結持續時間平均值為  $\frac{1}{\mu_{WWW}} = 500 s$ ，

而[Chi02]考慮影音串流(video streaming)服務，建議其平均值為  $\frac{1}{\mu_{video}} = 1800 s$ 。

Femtocell 用戶人數則依據 AT&T femtocell 服務[ATT09]所建議的人數(8-12 人)進行設定，取值為 10 人。Macrocell 與 femtocell 系統涵蓋半徑依[ZhR10]，分別設定為 500 公尺與 12 公尺。[EBR10]則設定固網頻寬為 21Mbps。

表 4.1 數值實驗參數定義與設定

參數符號	定義	設定值
$BW_{Iu-ps}$	共存系統 Iu-ps 介面的容量	21Mbps
$bw_1$	單一 macrocell 連結所需之頻寬資源	384kbps
$bw_2$	單一 femtocell 連結所需之頻寬資源	2Mbps
$R_m$	Macrocell 基站涵蓋半徑	500 公尺
$R_f$	Femtocell 基站涵蓋半徑	12 公尺
$J$	在單一 femtocell 註冊的用戶人數	10 人
$L$	共存系統中總用戶人數	500 人
$N$	系統中 femtocell 的數目	100 個
$K$	$\lambda_T$ 與單一用戶需求到達率之比值。其中 $\lambda_T$ 為一控制變因，將在各情境實驗中做說明	1000
$\frac{1}{\mu_m}$	Macrocell 行動用戶的平均連結持續時間	500 秒
$\frac{1}{\mu_f}$	Femtocell 行動用戶的平均連結持續時間	1800 秒
$\frac{1}{\eta_m}$	Femtocell 用戶離開 femtocell 基站範圍而在 macrocell 基站範圍內停留的平均時間	600 秒

## 4.2 數值實驗驗證

數值實驗與驗證：用戶需求到達率與阻隔機率之關係

Macrocell 之連結阻隔機率  $P_m$  對應於遞增之系統新進連結需求到達率而增加；依據模型的(3.19)估計阻隔機率的變化趨勢應與系統負荷  
 $\left( \frac{\text{數據需求到達率}}{\text{系統最大連結數} \cdot \text{系統服務率}} \right)$  有關，可觀察到在系統負荷  $< 1$  時，macrocell 系統的阻隔機率相當小；在系統負荷  $\geq 1$ ，由[GST08]，macrocell 系統的平均到達連結數大於最大平均服務速率，預期隨著時間的推移，系統對於連結的阻隔機會越高；因此在系統負荷  $\geq 1$  的情形下，隨著新進連結需求越高， $P_m$  上升的情況越明顯。

實驗結果與說明：

橫軸為系統總新進需求  $\lambda_T$ ，縱軸為 macrocell 阻隔機率。整體系統之需求到達率越高，macrocell 阻隔機率越大 macrocell 中最大可接取連結數為 54 個連結 ( $BW_m/bw_l$  之整數部分)，且在 macrocell 使用之連結持續時間為 500s，亦即平均每秒可服務完 0.002 個連結，然本研究考慮用戶需求之切換，因此在 macrocell 之資源佔用時間為  $\frac{1}{(\mu_m + \eta_m)}$ ，對應服務速率  $\mu_m + \eta_m = \frac{1}{500} \left( \frac{1}{s} \right) + \frac{1}{600} \left( \frac{1}{s} \right) \approx 0.004 \left( \frac{1}{s} \right)$  或平均每秒可服務 0.004 個連結，因此若總新進連結到達率  $\lambda_T$  高於  $54 * 0.004$  連結/秒(或 0.216 連結/秒)時，macrocell 系統之連結數會開始堆積，而產生明顯的阻隔現象，使得阻隔機率以較快的幅度逐漸升高直至趨近於 1。

本實驗結果可見用戶需求(用戶需求到達率、連結持續時間以及最大接取連結

數)會影響到系統阻隔機率之關係，當系統負荷  $< 1$  時，連結需求被阻隔的機率幾乎為 0，表示此時系統的平均到達連結數小於最大平均服務速率，因此被阻隔的機率較小；而在系統負荷  $\geq 1$  時，macrocell 系統服務速率不及需求到達率，因此阻隔現象明顯；符合本研究對共存系統特性之觀察。

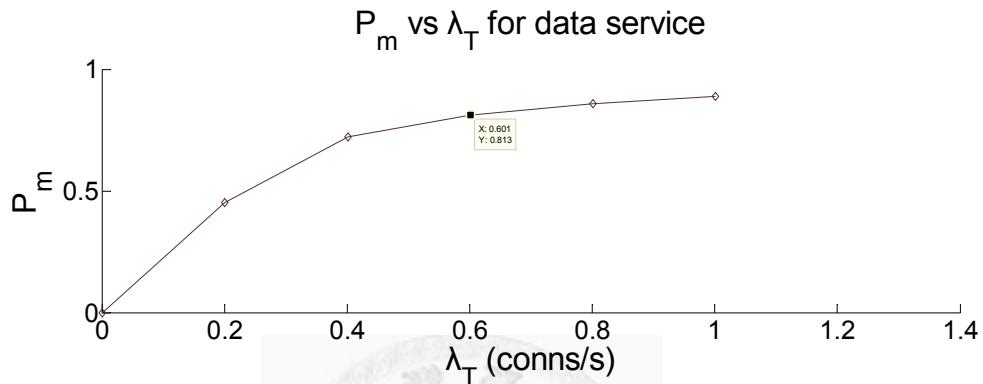


圖 4.1 Macrocell 阻隔機率與總系統新進需求流量之關係

#### 數值驗證結果：

為了證實上述系統特性，我們以兩方面進行以數值驗證，分別為利用 c++ 軟體進行一模擬實驗環境以及觀察系統中連結數與系統總新進流量的關係。

表 4.2 顯示利用 c++ 進行模擬實驗結果，其中模擬時間為  $10^6$  秒，以排隊模型中生死過程描述數據服務連結到達及結束服務過程，每一取樣單位時間點以 1 秒為單位，取連結需求到達率值  $\lambda_T$  作為一控制變因，以 rand(seed) 用以描述模擬環境具有隨機性，seed 表示隨機撒落的時間種子；若任一時間點有一連結需求，則時間變數 time 則為當下時間加上連結到達時間點，直至 time 達到  $10^6$  為止。

另外推導出之數值結果與模擬實驗中結果有所差異，推測應與數值實驗中以 (3.19)macrocell 阻隔機率數值帶入以及 MATLAB 的計算誤差有關，模擬實驗則因

到達過程設計上具有隨機特性，因此阻隔機率平均值較數值實驗結果小。由 d.項目 95%信心區間(或為標準變異量)，我們可觀察出由數值實驗所求出之阻隔機率在連結需求到達率  $\lambda_T$  由 0.2 連結/秒以 0.2 連結/秒遞增的程度至 1 連結/秒，皆落於信心區間內，因此可以驗證本研究針對共存系統數據阻隔機率計算的正確性。

另外由 e 項目可觀察出，數值實驗之變異量距離平均值為與標準變異量之比值，其中最為接近者為當連結需求到達率  $\lambda_T = 0.2$ (連結/秒)時，此時數值實驗所求的的阻隔機率結果與模擬實驗結果在變異量與平均值之差異約為  $(100\% - 95\%)*0.09 = 0.45\%$  左右的差異；另外在當連結需求到達率  $\lambda_T = 0.4, 0.6, 0.8, 1$ (連結/秒)時差異比值約接近 0.5，因此與平均值之差異約  $(100\% - 95\%)*0.5 = 2.5\%$  的差異。

表 4.2 數值實驗與模擬實驗阻隔機率的比較

項目	連結需求 到達率 $\lambda_T$ (連結/秒) $= 0.2$	連結需求 到達率 $\lambda_T$ (連結/秒) = 0.4	連結需求 到達率 $\lambda_T$ (連結/秒) = 0.6	連結需求 到達率 $\lambda_T$ (連結/秒) = 0.8	連結需求 到達率 $\lambda_T$ (連結/秒) = 1
a. 數值實驗	0.4515	0.7206	0.813	0.8595	0.8875
a1. Macrocell 原 產生流量	0.1005 (連結/秒)	0.2005 (連結/秒)	0.3005 (連結/秒)	0.4005 (連結/秒)	0.5005 (連結/秒)
a2. 切換至 macrocell 流量	0.0392 (連結/秒)	0.0781 (連結/秒)	0.1171 (連結/秒)	0.1560 (連結/秒)	0.1950 (連結/秒)
b. 模擬實驗	0.454130	0.728040	0.817580	0.862655	0.890112
c. 誤差百分比 $ (a-b)/b *100\%$	0.58%	1.02%	0.56%	2.88%	0.29%
d. 95%信心區 間	0.426411 $\sim 0.481038$	0.712766 $\sim 0.740121$	0.808412 $\sim 0.826659$	0.855654 $\sim 0.869401$	0.884914 $\sim 0.895874$
e. a 為 b 標準差 之倍數	0.09	0.48	0.499	0.45	0.502

圖 4.2 中我們觀察系統中連結數與系統總新進流量的關係，橫軸為系統之總新

進需求  $\lambda_T$ ，縱軸為 macrocell 預期看到的系統連結數量。

PS 系統預期可觀察到的 macrocell 系統連結數  $n_1$  依據[BHK01]中 PS 模型分析以及本研究考慮因頻寬容量限制而有一連結上限為：

$$E[n_1] = \frac{\sum_{i=0}^{r_1-1} \frac{i \left( \rho_1 / \delta_m \right)}{i!} + \frac{[(1-r_1)\rho_1 + r_1]\rho_1 \left( \rho_1 / \delta_m \right)^{r_1-1}}{(r_1-1)!(1-\rho_1)^2}}{\sum_{i=0}^{r_1-1} \frac{\left( \rho_1 / \delta_m \right)^i}{i!} + \frac{\delta_m^{1-r_1} \rho_1^{r_1}}{(r_1-1)!(1-\rho_1)}}$$

其中， $r_1 = \left\lfloor \frac{BW_m}{bw_1} \right\rfloor$  為 macrocell 系統連結數上限，

$\rho_1 \equiv \frac{bw_1}{BW_m} \left( \frac{\lambda_{m,n}}{\mu_m} + \frac{\lambda_{m,fo} + \lambda_{h,fm}}{\eta_m + \mu_m} + \frac{\lambda_{m,overflow}}{\mu_f} \right)$  為統一化(normalized)的服務負荷(原本在 macrocell 系統產生的服務負荷，因切換而來的服務負荷以及因滿溢至 macrocell 的服務負荷總和)，而  $\delta_m \equiv \frac{BW_m}{2Mbps}$ 。

實驗結果可看出約在  $\lambda_T = 2$  需求連結/秒時，macrocell 系統預期平均可觀察到約 50 個服務中的連結；且隨著  $\lambda_T$  的上升，macrocell 的系統連結數始終維持在系統可接納的上限 54 個連結(21Mbps/384kbps 的整數值)。

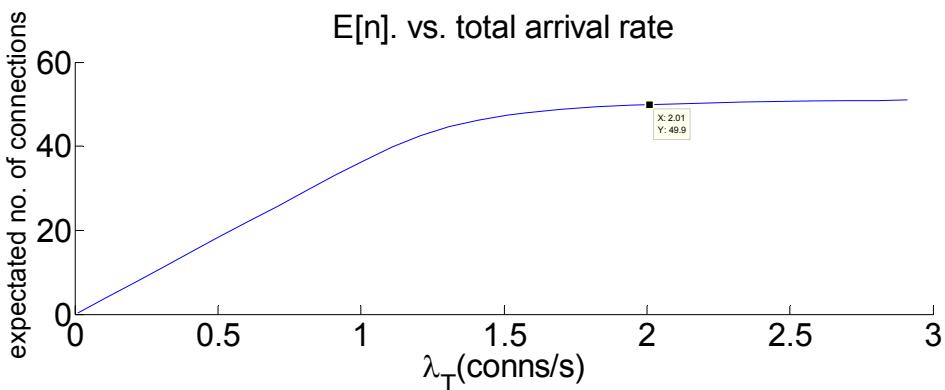


圖 4.2 Macrocell 系統連結數與總系統新進需求流量之關係

### 4.3 連結阻隔機率數值實驗與情境應用

本節我們將探討在不同使用者需求對應於系統的阻隔機率之關係，並藉此找出影響系統阻隔機率之重要因素，以做為業者評估系統服務品質之指標。

#### 4.3.1 連結持續時間與阻隔機率之關係

應用情境：用戶對數據服務之持續時間需求長短對於阻隔機率有何影響？我們欲觀察使用者行為對於共存系統阻隔機率的影響以了解用戶需求對應系統效能的關係。

目的：現行電信業者針對行動數據服務定價策略多採用”吃到飽”方案作為吸引使用者申請數據服務的誘因，因此用戶有可能長時間使用連結資源以符合使用者認為之效益。

預期結果：預期若單一連結平均持續時間越長，相當於需提供服務頻寬給用

戶需求連結的時間越久，因此對於 macrocell 系統新進連結的阻隔機會越大。

數值實驗結果：如圖 4.3 所示，縱軸為 macrocell 系統之連結阻隔機率  $P_m$ ，橫軸  $1/\mu_m$  為 macrocell 用戶對 macrocell 連結持續時間，其中  $\lambda_T = 1$  連結/秒。服務持續時間為  $T_m \sim (\mu_m)$ ，因此若  $1/\mu_m$  上升，表示平均連結持續時間增加，根據此圖我們可以看出當用戶在 macrocell 基站範圍內使用數據服務時間越久，由原本假設之平均值 500(s)增加至 1200(s)，阻隔機率呈一直線上升。

此現象推估與第三章 macrocell 系統阻隔機率求解有關，如(3.19)，macrocell 連結阻隔機率為新進連結見到系統中已存在  $r_1$  個連結的機率，大致與  $1/\mu_m$  呈正相關，因此阻隔機率隨  $1/\mu_m$  增加呈直線上升。

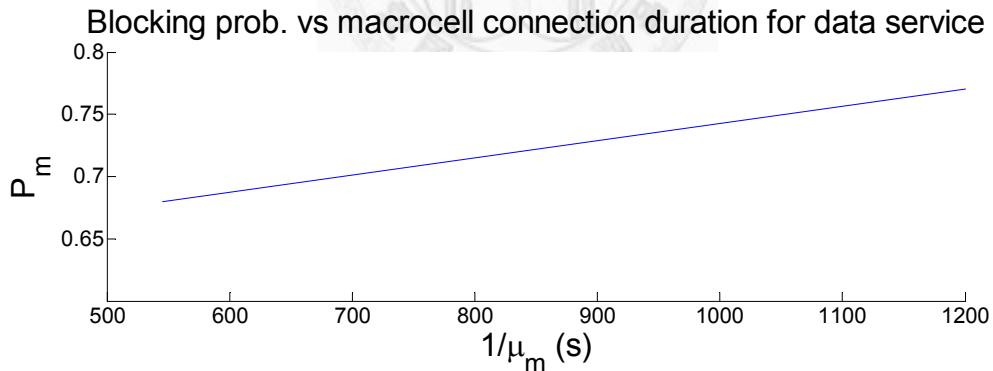


圖 4.3 Macrocell 使用者連結持續時間與 macrocell 阻隔機率之關係

### 4.3.2 用 戶 室 內 停 留 時 間 對 阻 隔 機 率 的 影 響

應用情境：觀察 femtocell 使用者若在室內之機率較大的話，對連結阻隔機率有什麼影響？

目的：[Zha10]研究結果顯示，約 2/3 的無線語音傳輸及高於 90%的無線數據傳輸是由室內產生。而由第三章的分析，我們可得知用戶在室內的機率  $q$  與室內停留係數  $\eta_f$  有關係，本情境觀察用戶在室內停留的機率對於阻隔機率的影響。

預期結果：若一用戶在室內之平均時間越長，在 femtocell 系統佔用資源的時間越久，因此 femtocell 系統阻隔機率應越大，然而 macrocell 系統阻隔機率應越小。

數值實驗結果：如圖 4.4 所示，縱軸為 femtocell 系統之連結阻隔機率  $P_f$ ，橫軸  $\eta_f$  為室內停留時間隨機變數的係數，由於假設為指數分佈，因此具有平均值  $1/\eta_f$ 。其中  $\lambda_f = 1$  連結/秒。當  $\eta_f$  愈小，表示平均室內停留時間越長，因此 femtocell 阻隔機率越大。而 femtocell 在室內停留時間增加，因為減少在 macrocell 接取的流量，可有效降低 macrocell 阻隔機率。

實驗結果顯示，當用戶在室內停留的時間越久，femtocell 系統之阻隔機率較高，macrocell 阻隔機率會降低，符合預期結果。

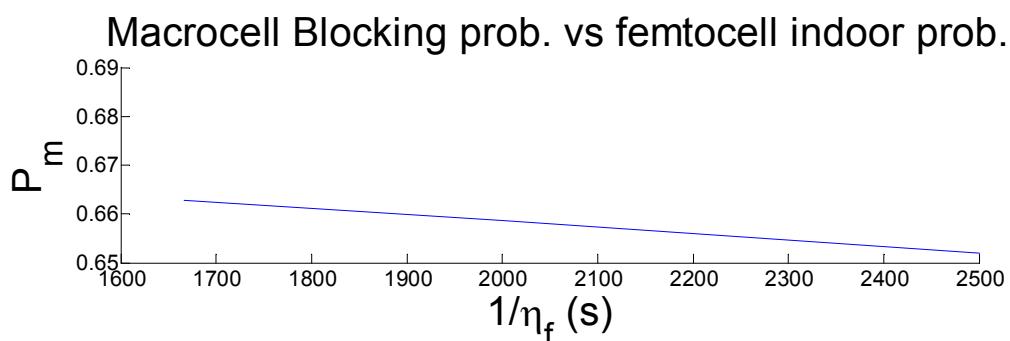


圖 4.4 用戶在室內之停留時間係數與 macrocell 系統阻隔機率之關係

### 4.3.3 頻寬需求與阻隔機率之關係

應用情境：討論單一連結之頻寬需求與整體系統阻隔機率的關係，若 macrocell 或 femtocell 有不同數據服務需求，依第二章之說明，會有不同基本頻寬需求，如 p2p 資訊傳輸至少需 64kbps 的頻寬。

預期結果：若 macrocell 用戶或 femtocell 用戶之連結需求增大，對於固網資源的頻寬使用容量越高，應有較大的機會造成阻隔。我們猜想當用戶之連結頻寬需求增加時，可能會造成較高的阻隔機率。

數值實驗結果與討論：圖 4.5 為本情境假設下的實驗結果，縱軸為 macrocell 連結阻隔機率  $P_m$ ，橫軸為 macrocell 用戶之連結頻寬需求  $bw_1$ ，範圍由 64kbps 之頻寬需求增至 384kbps，其中  $\lambda_T = 1$  連結/秒。由圖中可知頻寬需求對於 macrocell 阻隔機率之影響相當大，在連結之頻寬需求為 64kbps 時，macrocell 阻隔機率在頻寬需求小於約 284kbps 時趨近於 0。我們可看到隨著 macrocell 用戶連結頻寬需求愈大，因 macrocell 系統能接納之連結數量越少，因此阻隔機率隨之上升；但若 macrocell 系統固網頻寬越多，對於紓解 macrocell 阻隔機率幫助愈大。

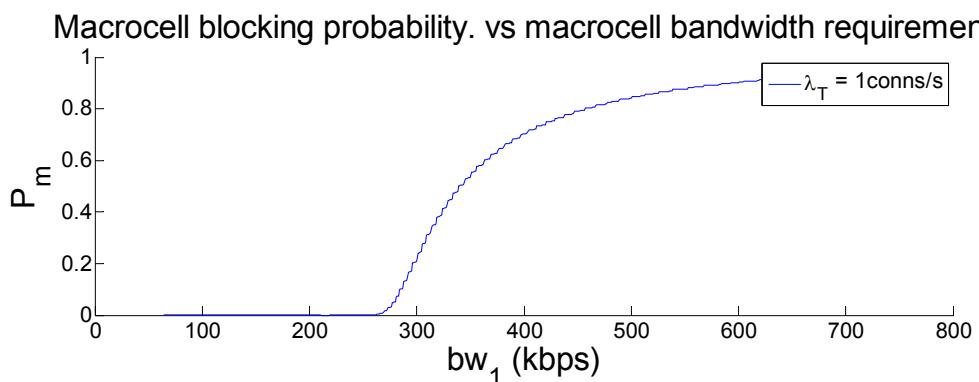


圖 4.5 Macrocell 使用者連結頻寬需求與 macrocell 阻隔機率之關係

## 4.4 Femtocell 分流效應

本實驗情境設定在有 femtocell 系統存在以及沒有 femtocell 存在的情況下，藉以分析 femtocell 對於共存系統是否有分流效應。

實驗結果如圖 4.6 結果顯示，縱軸為 macrocell 系統之連結阻隔機率  $P_m$ ，橫軸為系統總需求流量  $\lambda_T$ 。由此數值實驗結果顯示，由於 femtocell 可供共存系統中  $NJ$  室內用戶接取，因此對於 macrocell 系統而言，需求流量可藉由 femtocell 接取而有效降低，因此共存系統中增置 femtocell 可有效降低 macrocell 的阻隔機率。

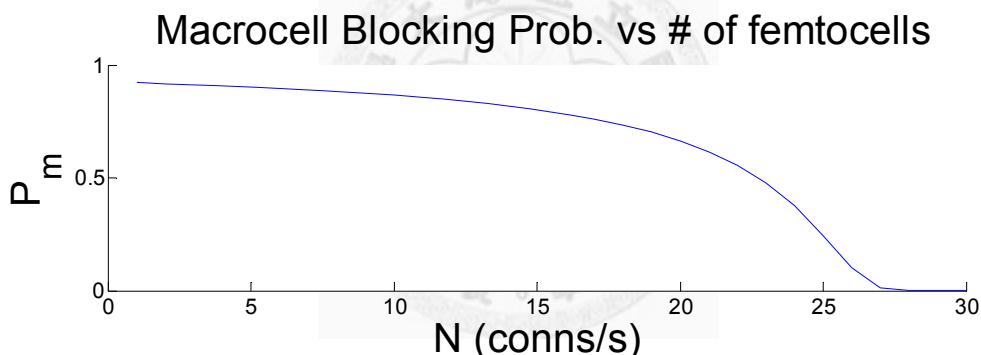


圖 4.6 Femtocell 分流效益對 macrocell 阻隔機率的影響

## 4.5 數值實驗結果綜合討論

利用本論文第三章所建構之共存系統連結阻隔機率模型，並佐以本章所設計不同情境的數值分析結果，我們可以歸納出幾個結論，其分別如下：

- Femtocell 的建置使得室內使用者可使用較好的服務，然流量到達固網端時另

須由電信業者評估兩種連結流量需求對頻寬的需求，以達到預期之 QoS。電信業者可藉由連結阻隔機率評估後端固網的建置與配置。

- 由數值實驗結果，可發現有幾項影響阻隔機率的關鍵因素，包含連結之需求流量、macrocell 連結持續時間以及用戶在室內之停留時間，而不同頻寬容量之配置比例亦會造成較明顯的阻隔現象。
- 增設 femtocell 可有效降低 macrocell 系統的阻隔機率，因為 femtocell 提供部分用戶流量需求的接取而能減少用戶對 macrocell 接取流量。Femtocell 設置數目由 5 個增加至 20 個，macrocell 阻隔機率下降 23.5%。
- Macrocell 的阻隔機率會隨著總流量需求的上升而逐漸升高。當總流量的增加幅度由 0.4 至 1 連結/秒，阻隔機率上升幅度為 21%。
- 用戶在室內之停留時間越久，佔用 femtocell 資源機率越高，可降低 macrocell 阻隔機率，例如用戶在室內停留時間平均值由 1700s 增加至 2400 秒，下降幅度為 1.5%。

藉由以上的數值實驗分析我們可以驗證在 macrocell 以及 femtocell 共存系統用戶需求、連結頻寬需求容量以及不同固網容量配置比例對於阻隔機率的影響。阻隔機率除了與固網端容量的提供有關，另會被使用者的各種行為，如新進需求到達率、連結持續時間以及用戶在室內外機率所影響。

## 第五章

### 結論及未來研究方向

#### 5.1 結論

無線通訊技術的快速發展使得傳輸流量的需求也隨之提升，為了紓解日益壅塞的無線傳輸流量而推出了 femtocell, femtocell 架設在室內且藉由寬頻網路(ADSL, cable 等)來提供良好的室內收訊品質以及紓解室外基地台(macrocell)之流量。本論文研究在 macrocell 以及 femtocell 之使用者在此共存系統下，經由電信業者之後端 Iu-ps 固網接取，以連結允入控制(CAC)配置決定 macrocell 與 femtocell 系統之頻寬容量以分析整體使用者的阻隔機率。

我們欲探討在此 macrocell 以及 femtocell 共存系統下固網容量對於阻隔機率之影響，由電信業者配置給 macrocell 及 femtocell 兩種系統，並根據來自 macrocell 系統與 femtocell 系統之數據流量，以 Processor Sharing 原理建立服務端模型並分析在 CAC 所限制之人數下，不同頻寬容量配置比例對於阻隔機率的影響。

為了求解此共存系統，我們分析模型的連結阻隔機率，將系統中的使用者的流量以及通話時間建模做為計算阻隔機率之用。依據固網頻寬共享特性以 Processor Sharing 原理建模並分析，印證了不同容量配置下對 macrocell 與 femtocell 系統阻隔機率的影響，以及得知影響阻隔機率的關鍵因素，模擬結果列舉如下：

- Femtocell 的建置使得室內使用者可使用較好的服務，然流量到達固網端時另須由電信業者評估兩種連結流量需求對頻寬的需求，以達到預期之 QoS。電信業者可藉由連結阻隔機率評估後端固網的建置與配置。
- 由數值實驗結果，可發現有幾項影響阻隔機率的關鍵因素，包含連結之需求流量、macrocell 連結持續時間以及用戶在室內之停留時間，而不同頻寬容量之配置比例亦會造成較明顯的阻隔現象。
- 增設 femtocell 可有效降低 macrocell 系統的阻隔機率，因為 femtocell 提供部分用戶流量需求的接取而能減少用戶對 macrocell 接取流量。Femtocell 設置數目由 5 個增加至 20 個，macrocell 阻隔機率下降 23.5%。
- Macrocell 的阻隔機率會隨著總流量需求的上升而逐漸升高。當總流量的增加幅度由 0.4 至 1 連結/秒，阻隔機率上升幅度為 21%。
- 用戶在室內之停留時間越久，佔用 femtocell 資源機率越高，可降低 macrocell 阻隔機率，例如用戶在室內停留時間平均值由 1700s 增加至 2400 秒，下降幅度為 1.5%。

本研究透過對數據服務的特性進行研究與分析，提出的建模方法貢獻如下：  
總結本論文的本研究之貢獻如下：

1. 探討共存系統數據需求特性以及服務端連結傳輸特性，用戶利用一段持續時間使用數據服務，研究顯示可以依連結持續時間描述；

2. 因分封交換特性，傳輸速率與連結數目成反比，我們以 PS 模型描述此特性；
3. 並經由本研究分析 UMTS 傳輸速率的限制，與一般 SDSR 模型不同，我們另加進有界(bounded)的 SDSR 模型進行分析，以實際針對 UMTS 系統下共存系統的阻隔機率進行解析解。

## 5.2 未來研究方向

### I. 多種服務類型之考量與建模

為了簡化推導及模型複雜度，本研究假設 macrocell 及 femtocell 基站使用者皆接取同一類型服務，因此僅需考慮單一頻寬的連結流量需求，然在 UMTS 系統與 HSDPA 系統中，能提供之服務基本上有四種類型，每種類型亦有不同的頻寬與服務品質需求，而對於固網容量的規劃亦會呈現出更複雜的行為，諸如 macrocell 語音數據容量配置，數據又可分會話、互動等等類型，我們希望將來能考慮此種多種數據服務流量分析，以設計多種服務(multi-service)頻寬配置的機制，考慮兩種系統用戶的數據優先權，並分析其效益以及所提升的使用者服務品質。

### II. 加入訊號干擾之因素

本研究考量有線端之容量限制對於此共存系統之影響，然本研究並未考慮無線頻帶資源因素以及加進多個 femtocell 基站對原本 macrocell 系統的干擾，是否彼此干擾有可能影響原先 macrocell 之無線訊號品質？且 femtocell 本身亦提供使用者接取的能力，使得系統雖會提升整體干擾量，然而是否也可藉由 femtocell 的接取能力而增加系統可同時接取之人數？未來能考慮此整體系統之架構，包含無線與

有線端之流量與資源分析，以及所能提升的使用者服務品質。

### III. 4G 技術的考量

本研究考量在 UMTS 系統所提供之行動通訊數據服務，每種服務類型有不同的頻寬與服務品質需求，然而因 UMTS 實體層採用 WCDMA 技術，而 4G 實體層則使用 OFDMA 技術，基本上傳輸信號的方式不同，用戶需求建模方法與資源分配的方式與本研究方法有所差異，因此希望未來能加進考慮 4G，以做為未來共存系統中行動通訊數據服務參考建模的依據。



## 參考文獻

- [3GP04] 3GPP TSG Terminals, “Common test environments for user equipment conformance testing,” *3GPP TS 34.108 version 3.16.0*, Jun. 2004.
- [ABI04] A. Alexiou, C. Bouras, and V. Igglesis, “Performance evaluation of TCP over UMTS transport channels,” *International Symposium on Communications Interworking*, 2004.
- [AKY11] M. Y. Arslan, S. V. Krishnamurthy, J. Yoon, S. Banerjee, and K. Sundaresan, “FERMI: A femtocell resource management system for interference mitigation in OFDMA networks,” in *Proc. Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2011.
- [ATT09] AT&T femtocell 網址如下：  
<http://www.wireless.att.com/learn/why/3gmicrocell/>.
- [BHK01] J. Beckers, I. Hendrawan, R. E. Kooij, and R. van der Mei, “Generalized processor sharing performance models for internet access lines,” in *9<sup>th</sup> IFIP Conference on Performance Modeling and Evaluation of ATM and IP Networks*, 2001.
- [CCM10] 新通訊元件雜誌，增加電信業者營收/提升用戶品質 Femtocell 基地台風靡全球網址如下：  
[http://www.2cm.com.tw/marketrend\\_content.asp?sn=1005040009](http://www.2cm.com.tw/marketrend_content.asp?sn=1005040009).
- [ChA08] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, “Femtocell networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, 2008.
- [CHA08] J. D. Chimeh, P. Azmi, and M. Hakkak, “Internet traffic modeling and capacity evaluation in UMTS,” *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 109-120, 2008.

- [Chi02] J. B. Chia, “Video services over 4G wireless networks: not necessarily streaming,” *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC2002*, vol. 1, pp. 18-22, Mar. 2002.
- [ChL05] S. P. Chung and J. C. Lee, “Performance Analysis and overflowed traffic characterization in multiservice hierarchical wireless networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 4, no. 3, pp. 904-918, May 2005.
- [ChZ00] J. Q. -J. Chak and W. Zhuang, “Capacity analysis for connection admission control in indoor multimedia CDMA wireless communications,” *Wireless Personal Communications*, vol. 12, pp. 269-282, 2000.
- [CMK08] D. Choi, P. Monajemi, S. Kang, and J. Villasenor, “Dealing with loud neighbors: the benefits and tradeoffs of adaptive femtocell access,” in *Proc. IEEE Global Telecomm. Conference*, pp. 1-5, Dec. 2008.
- [CMT70] E. G. Coffman, R. R. Muntz, and H. Trotter, “Waiting time distribution for processor-sharing systems,” *Journal of ACM*, vol. 17, no. 1, pp. 123-130, Mar. 1970.
- [Coh79] J. W. Cohen, “The multiple phase service network with generalized processor sharing,” *Acta Informatica* 12, pp. 245-284, 1979.
- [DBL10] D. C. Dimitrova, H. Berg van den, R. Litjens, and G. Heijen, “Scheduling strategies for LTE uplink with flow behaviour analysis,” *Fourth ERCIM Workshop on eMobility*, 2010.
- [Den96] S. Deng, “Empirical model of WWW document arrivals at access link,” in *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 3, pp. 1797-1802, Jun. 1996.

- [Fan05] Y. Fang, “Performance evaluation of wireless cellular networks under more realistic assumptions,” *Wireless Communications Mobile Computing*, vol. 5, no. 8, pp. 867-885, Dec. 2005.
- [Fem10] FemtoForum, “Femtocells-natural solution for offload,” FemtoFroum white paper, Jun. 2010.
- [FOS06] R. Ferrus, J. Olmos, O. Sallent, J. Perez-Romero, and F. Casadevall, “An admission control framework integrating radio and IP-transport in 3GPP-based networks,” *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pp. 1-6, 2007.
- [GST08] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of queueing theory*, 4th ed. Hoboken N.J.: Wiley, cop., 2008.
- [HKI08] Q. Huang, K. T. Ko, and V. B. Iversen, “Approximation of loss calculation for hierarchical networks with multiservice overflows,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 56, no. 3, pp. 466-473, Mar. 2008.
- [HoT04] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, 3rd ed. New York: J. Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [Hua04] J. S. Huang, “Adaptive modulation schemes for 3G WCDMA in multipath channels,” *Master Thesis, Dept. Electron. Eng., Nat. Yunlin Univ. of Science & Technology*, Jun. 2004.
- [JaG03] S. A. Jafar and A. Goldsmith, “Adaptive multirate CDMA for uplink throughput maximization,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 2, pp. 218-228, Mar. 2003.
- [Jai94] R. Jain, “ATM adaptation layer,” *Master Thesis, Dept. Computer and Information Science, The Ohio State Univ.*, 1994.

- [KAK06] I. Koukoutsidis, E. Altman, and J. M. Kelif, “Fair rate sharing models in a CDMA link with multiple classes of elastic traffic,” *Rapport de Recherche 5596*, INRIA, Jun. 2005.
- [KOC11] T. Kolding, P. Ochał, P. Czerepiński, and K. Pedersen, “Impact of carrier configuration and allocation scheme on 3G femtocell offload effect,” *Vehicular Technology Conference, 2011 IEEE 73<sup>rd</sup>*, pp. 1-5, 2011.
- [Kuc73] A. Kuczura, “The interrupted poisson process as an overflow process,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 52, pp. 437-448, Mar. 1973.
- [LHB01] A. Lom, G. Heijenk, and C. Bruma, “Performance of TCP over UMTS common and dedicated channels,” *IST Mobile & Wireless Communications Summit 2003*, pp. 128-142, Jun. 2003.
- [Li11] X. Li, *Radio access network dimensioning for UMTS*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [Mad08] A. Mader, “Performance Models for UMTS 3.5G Mobile Wireless Systems,” *Doctor Thesis, Institut für Informatik Lehrstuhl für Verteilte Systeme*, 2008.
- [MaR99] L. Massoulie and J. Roberts, “Arguments in favour of admission control for TCP flows,” in *Proc. of the ITC 16*, pp. 1-12, 1999.
- [MHH11] M. H. Ho, “Optimal Frequency Allocation Scheme Design in Macrocell and Femtocell Coexistence Networks,” *Master Thesis, Dept.Electron. Eng., Nat. Taiwan Univ.* Jun. 2011.
- [RSA05] J. Pérez-Romero, O. Sallent, R. Agusti, and M. A. Diaz-Guerra, *Radio resource management strategies in UMTS*, Chichester, West Sussex, England: Hoboken, N.J.: J. Wiley & Sons, 2005.
- [RVP10] G. de la Roche, A. Valcarce, D. Lopez-Perez, and J. Zhang, “Access

- control mechanisms for femtocells,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 33-39, 2010.
- [Saf05] S. R. Safavian, “How to dimension wireless networks for packet data services with guaranteed QoS (Part 1-Theoretical Issues),” *Bechtel Telecommunications Technical Journal*, vol. 3, no. 1, Aug. 2005.
- [Sol10] D. Soldani, “Bridging QoE and QoS for mobile broadband networks,” *ETSI workshop on QoS, QoE and user experience focusing on speech, multimedia conference tools., 13<sup>th</sup> Capacity Sharing Workshop*, Sep. 2010.
- [TzT11] D. C. Tsilimantos, D. A. Zarbouti, G. V. Tsoulos, G. E. Athanasiadou, and D. I. Kaklamani, “Fairness and throughput trade-off analysis for UMTS WCDMA network planning,” *Wireless personal communications*, vol. 56, no. 4, pp. 693-714, 2011.
- [WMC03] T. C. Wong, J. W. Mark, and K. C. Chua, “Joint connection level, packet level and link layer resource allocation for variable bit rate multiclass services in cellular DS-CDMA networks with QoS constraints,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 10, pp. 1536-1545, Dec. 2003.
- [YMN09] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhriyal, N. Johnson, B. Raghothaman, *et al.*, “Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 102-109, 2009.
- [ZCJ07] S. G. Zhao, H. G. Chou, S. L. Jen, and Y. Y. Chen, *HSDPA 技術及其演進-HSUPA 與 HSPA+*, Bei jing: 人民郵電出版社, 2007.
- [Zha10] Y. Zhang, “Resource Sharing of Completely Closed Access in Femtocell Networks,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*,

pp. 1-5, 2010.

- [ZhR10] Z. Zhang, and G. de la Roche, *Femtocell: Technologies and deployment*, Chichester, West Sussex, U.K., Hoboken, N.J.: Wiley, 2010.



## 附錄 A：指數分佈機率求解

於 3.3 節討論之連結持續時間與用戶在室內之比例等隨機變數皆假設為具有指數分佈的性質，在此根據指數分佈之特性推導求解：

考慮兩隨機變數  $A$  與  $B$  為指數分佈，分別具有平均值  $E[A]=a$  及  $E[B]=b$ ，則  $t$  及  $\delta$  為任意正整數， $f_A(x)=1-e^{-ax}$  及  $f_B(t)=1-e^{-bx}$  為  $A$  與  $B$  之機率密度函數

(i) 令  $Y=\min(A, B)$ ，則

$$F_Y(y)=\Pr(A \geq y) \cdot \Pr(B \geq y)=e^{-ay} \cdot e^{-by}$$

因此， $Y$  為之阻隔機率密度為  $f_Y(y)=\frac{df_Y(y)}{dy}=-(a+b)e^{-(a+b)y}$ ，而

$$E[Y]=\frac{1}{a+b} \circ \quad (\text{A.1})$$



## 附錄 B： $M/\bar{M}_b/1/r_1$ -PS 阻隔機率公式推導

推導參考[Coh79]對於有限人口(finite source population)下，對於  $M/\bar{M}_b/1/r_1$ -PS 阻隔機率求解。Macrocell 連結有一最低頻寬之需求，假設為  $bw_1$ ，固網接口之容量為  $BW_{Iu-ps}$ ，連結數上限  $r_1 = BW_{Iu-ps} / bw_1$ 。計算  $M/\bar{M}_b/1/r_1$ -PS 穩態機率可直接藉由[Coh79]的 M/E<sub>r</sub>/R/ $\infty$ -PS 模型之結果求得，只是其狀態空間(state space)被限縮為僅有最多  $r_2$  個連結可被服務，當系統中已存在  $r_1$  個連結佔用 macrocell 固網端之容量時，新進連結將會被阻隔掉。



先藉由[Coh79]對於一 Erlang 分佈(Erlang service distribution)的分析推導結果如下，再修改為本論文討論之  $M/\bar{M}_b/1/r_1$ -PS 隊列，首先定義參數如下：

$P$  為單一連結所需之服務層級(service phase)

$M$  為所有連結總數

$K$  為具有相同特性之連結類別數

$M_k$  為第  $k$  個類別之連結數

$x_k(j)$  為第  $k$  個類別之連結數，且目前處於第  $k$  層服務層級

$D_k^{(j)}(\cdot)$  為第  $k$  個類別之連結數，且目前處於第  $k$  層服務層級之連結持續時間之分布

$d_k^{(j)}(\cdot)$  為  $D_k^{(j)}(\cdot)$  之第一階 moment

$\Pi_k^{(h,j)}$  為第  $k$  個類別之連結數，且目前處於第  $j$  層服務層級之連結的馬可夫鏈

之轉移速率

$\tau_k(j,1), \tau_k(j,2), \dots, \tau_k(j, x_k(j))$  為第  $k$  個類別之連結數，且目前處於第  $j$  層服務層級之連結在時間  $t$  時所獲得之服務資源

因此我們可得知，

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_K$$

$$M_k = x_k(1) + x_k(2) + \dots + x_k(P), k = 1, 2, \dots, K \quad (\text{B.1})$$

馬可夫鏈之轉移矩陣如下：

$$\begin{aligned} \mu_k^{(j)} &= \sum_{h=1}^P \pi_k^{(h)} \Pi_k^{(h,j)} \\ \sum_{j=1}^P \mu_k^{(j)} &= 1 \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

穩態下之聯合密度  $p(x_k^{(j)}, \tau_k(j,1), \tau_k(j,2), \dots, \tau_k(j, x_k^{(j)}); j = 1, 2, \dots, P; k = 1, \dots, K)$ ，藉

由第  $k$  個類別之連結數，且目前處於第  $j$  層服務層級之連結在時間  $t$  時所獲得之服務資源  $\tau_k(j, h) < \tau_k(j, h) + d\tau_k(j, h)$ ,  $h = 1, \dots, x_k(j)$  滿足

$$\begin{aligned} &p(x_k(j), \tau_k(j, h), h = 1, \dots, x_k(j); j = 1, \dots, P; k = 1, \dots, K) \\ &= p_1 \prod_{j=1}^P \phi^{(j)}(x_1(j) + \dots + x_K(j)) \cdot \prod_{k=1}^K \frac{(\mu_k^{(j)} d_k^{(j)})^{x_k(j)}}{x_k(j)!} \left\{ \prod_{n=1}^{x_k(j)} \frac{1 - D_k^{(j)}(\tau(j, n))}{d_k^{(j)}} \right\} \\ &p_1^{-1} = \sum_{m=0}^K \sum_{z_m=0}^{M_m} \prod_{j=1}^P \Psi^{(j)}(z_1(j) + \dots + z_K(j)) \prod_{k=1}^K \left( \frac{(\mu_k^{(j)} d_k^{(j)})^{z_k(j)}}{z_k(j)!} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

其中， $\sum_{z_m=0}^{M_m} \dots \equiv \sum_{\substack{\{z_m(1)=0, \dots, z_m(P)=0 \\ z_m(1)+\dots+z_m(P)=M_m}}$

$$\begin{aligned}
& p(x_k(j), \tau_k(j, h), h=1, \dots, x_k(j); j=1, \dots, P+K; k=1, \dots, K) \\
& = p_2 \prod_{j=1}^P \phi^{(j)}(x_1(j) + \dots + x_K(j)) \cdot \prod_{k=1}^K \frac{(\mu_k^{(j)} d_k^{(j)})^{x_k(j)}}{x_k(j)!} \left\{ \prod_{n=1}^{x_k(j)} \frac{1 - D_k^{(j)}(\tau(j, n))}{d_n^{(j)}} \right\} \\
& \quad \cdot \prod_{h=1}^K \frac{(\mu_h^{(P+h)} d_h^{(P+h)})^{x_h(P+h)}}{x_h(P+h)!} \left\{ \prod_{n=1}^{x_h(P+h)} \frac{1 - D_h^{(j)}(\tau(j, n))}{d_n^{(j)}} \right\} \\
p_2^{-1} & = \sum_{m=1}^K \sum_{z_m=0}^{M_m} \prod_{j=1}^P \phi^{(j)}(z_1(j) + \dots + z_K(j)) \prod_{k=1}^K \left( \frac{(\mu_k^{(j)} d_k^{(j)})^{z_k(j)}}{z_k(j)!} \right) \cdot \prod_{h=1}^K \left( \frac{(\mu_h^{(P+h)} d_h^{(P+h)})^{z_h(P+h)}}{z_h(P+h)!} \right)
\end{aligned} \tag{B.4}$$

其中， $\sum_{z_m=0}^{M_m} \dots \equiv \sum_{\substack{z_m(1)=0 \dots z_m(P)=0 \dots z_m(P+m)=0 \\ z_m(1)+\dots+z_m(P)+\dots+z_m(P+m)=M_m}}^{M_m} \dots$

由(A.3)及(A.4)延伸出一全面性之求解如下：

$$\begin{aligned}
& p \left( \begin{array}{l} x_k(j), \tau_k(j, h), h=1, \dots, x_k(j); j=1, \dots, P; \\ x_k(P+k), \tau_k(P+k, n), n=k=1, 2, \dots, x_k(P+k) \dots K \end{array} \right) \\
& = p_3 \prod_{j=1}^P \phi^{(j)}(x_1(j) + \dots + x_K(j)) \cdot \prod_{k=1}^K \frac{(\nu_k^{(j)} \gamma_k^{(j)})^{x_k(j)}}{x_k(j)!} \left\{ \prod_{n=1}^{x_k(j)} \frac{1 - D_k^{(j)}(\tau(j, n))}{d_k^{(j)}} \right\} \\
& \quad \cdot \prod_{h=1}^K \frac{1}{x_h(P+h)!} \left\{ \prod_{n=1}^{x_h(P+h)} \frac{1 - D_h^{(P+h)}(\tau_h(P+h, n))}{d_h^{(P+h)}} \right\} \\
p_3^{-1} & = \sum_{m=1}^K \sum_{z_m=0}^{M_m} \prod_{j=1}^P \phi^{(j)}(z_1(j) + \dots + z_K(j)) \prod_{k=1}^K \left( \frac{(\nu_k^{(j)} \gamma_k^{(j)})^{z_k(j)}}{z_k(j)!} \right) \cdot \prod_{h=1}^K \left( \frac{1}{z_h(P+h)!} \right)
\end{aligned} \tag{B.5}$$

其中， $\nu_k^{(j)} \equiv \frac{\mu_k^{(j)}}{\mu_k^{(P+k)}}, j=1, 2, \dots, P$ ， $\gamma_k^{(j)} \equiv \frac{d_k^{(j)}}{d_k^{(P+k)}}, j=1, 2, \dots, P$

藉由(B.5)之求解結果，我們可將本研究  $M/\bar{M}_b/1//r_1$ -PS 建模所需之結果

代入，包括： $K=1, P=1$ ，因此在系統中存在  $x$  個連結時，其穩態機率為

$$p(x) = \frac{\binom{M}{x} \rho^x \phi(x)}{\sum_{h=0}^M \binom{M}{h} \rho^h \phi(h)}, x = 0, 1, \dots, M \quad (\text{B.6})$$

其中， $\rho$  為  $\nu$  與  $\gamma$  之乘積，而阻隔機率則為當一新進連結看見 femtocell 系統中已存在有  $r_1$  個連結時，因此：

$$p(r_1) = \frac{\binom{M}{r_1} \rho^{r_1} \phi(r_1)}{\sum_{h=0}^M \binom{M}{h} \rho^h \phi(h)}, x = 0, 1, \dots, M \quad (\text{B.7})$$

