

國立臺灣大學電機資訊學院電信工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Communication Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science


National Taiwan University

Master Thesis

針對省電設計之混合寬頻接取網路架構

A Hybrid Broadband Access Network Architecture

Designed for Power Saving

The watermark is the official seal of National Taiwan University. It is a circular emblem with a double-line border. Inside the border, the university's name is written in Chinese characters: '國立臺灣大學' at the top and '愛·學·勵·品' at the bottom. The center of the seal features a stylized design with a bell and other symbols.

徐佳弘

Jia-Hong Syu

指導教授：蔡志宏 博士

Advisor: Zsehong Tsai, Ph.D.

中華民國 101 年 6 月

June, 2012

國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

針對省電設計之混合寬頻接取網路架構
A Hybrid Broadband Access Network Architecture
Designed for Power Saving

本論文係徐佳弘君（學號 R99942047）在國立臺灣大學電信工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 101 年 6 月 13 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：

蔡志豪

（簽名）

（指導教授）

曹垣偉

林泉男

馮韋廷

所長

陳光祿

（簽名）

誌謝

人在忙碌時，總感覺時間流逝得異常迅速，而碩二這一年來的感覺更是如此。從一開始的定題目到演算法到寫模擬到最後的論文撰寫，每個步驟都輕忽不得，過程中難免遇到挫折或困境，好在總是有人能及時提供援助，讓論文能準時順利完成。如今回首，感覺還像昨天的事一般歷歷在目。

其中特別感謝博學又睿智的蔡志宏老師，雖然每次會面的時間都不常，但是您提供的建議卻總是十分受用，不論是研究上或是人生上都是如此，令人十分佩服且折服。也感謝二年來不離不棄的碩班同學：藍哥（三單肌肉男兼 IPTV 夥伴）、痞肥（實驗室的氣氛專家）與阿董（甚麼事都一起經歷的少年維特），預祝未來大家出社會後都能活出屬於自己生命的色彩。至於各位碩一學弟們（小美、志咩 and 明韋），相信經歷了如此精實的訓練後，把實驗室交給你們一定沒問題，將來我若回實驗室吹免錢的冷氣可別趕人啊！

最後要感謝天韻伙食團以及崇德志工社的大家，讓我在離家求學的六年期間多了一個安全的避風港，也提供我許多學習的機會，更留下許多美好的回憶。期許自己未來在脫離學生身分之後，能在社會上多多少少貢獻所長，以不負這幾年自己的成長。

摘要

隨著近年來全球環保意識的高漲，以及國內節能減碳的呼聲漸高，電資通訊領域的耗電量逐漸受到重視。而不單是因為環保議題，電信業者為了減少電費支出，藉此確保盈餘，亦無不致力於降低其整體網路耗電。

目前在研究中常見的省電策略有兩種，其一是改善個別元件抑或裝置的耗電，其二則是將不使用的設備關閉。通常認為，占耗電大宗的接取網路因為其布建架構為樹枝狀，只能靠前者而非後者來省電。然而本論文認為，藉由在架構中加入可導引流量之新裝置，使的有線接取網路的流量能在離峰時段改送往 24 小時開啟之無線接取網路基地台，有線接取網路的設備即可被關閉，同時亦不影響使用者連網。

為了驗證上述方法之可行性，本論文採用數篇學術文獻以及台大 ADSL 記錄檔來產生合理的使用者流量模型，並提出數個與本架構相應之直觀演算法，最後使用電腦程式模擬驗證。模擬的結果顯示，在通常情況底下有高達四成的時間可將有線接取網路關閉，即使在較為極端的環境之中亦有二成的時間如此，且整體節能可達 13%。足以證明本架構在未來有十足的潛力可以實行。

Abstract

In recent years, environmental concerns have caught general public's attentions globally. The Carbon emission of the ICT industry also becomes a well-known issue gradually, not only because of its environmental impact but also due to the growth of operation cost coming from electricity consumptions.

There are two kinds of common strategies for power saving in telecommunication networks, one is reducing energy consumption of individual devices; the other is switching off idle network elements. It is well known that broadband access networks fall into the former category rather than the latter because of its tree topology.

However, by introducing a new device, such as personal switch router, into the architecture in user-end, one can re-direct the traffic flows from the wired access network to the wireless access network, when the latter is a more power effective solution. In our study, we discover that we can even switch off wired access network during low-traffic periods, if the wireless access network is required to be always active.

In order to prove the feasibility of the initiative, in this thesis we adopt models from various academic papers and the log files of NTU ADSL to create a reasonable user profile, and then we propose several heuristic algorithms to support its power saving operations. Finally, we examine the effectiveness of this power-saving approach from the new hybrid architecture via computer simulation. Based on user's activity of

NTU ADSL access networks, the simulation results reveal that the wired access network can be turned off up to 40% of time in normal circumstances and 20% in some extreme conditions, and the total power-saving can be up to 13%. In sum, the brand new architecture we proposed in this thesis should be a promising solution for future hybrid access networks.



目錄

論文口試委員審定書	i
誌謝	ii
摘要	iii
Abstract.....	iv
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	x
第一章 緒論	1
1.1 問題的發展背景及環境	1
1.2 問題簡介與研究目標	2
1.3 論文章節架構	4
第二章 接取網路現況與使用者行為相關研究	5
2.1 常見接取網路技術與發展現況	5
2.1.1 非對稱數位用戶線路(ADSL)	5
2.1.2 第三代行動通訊系統(3G).....	9
2.1.3 全球互通微波存取網路(WiMAX)	10
2.2 使用者行為模型	12
2.2.1 使用者行為之相關研究	14
2.2.2 使用者行為統計分析	19
2.2.3 使用者效用函數定義	24
第三章 混合式寬頻接取網路模型與演算法	27
3.1 現行接取網路架構之修改與假設	27
3.1.1 省電之混合接取網路架構	27

3.1.2 省電決策路由器(Power Saving Router)	29
3.1.3 網管中心	30
3.1.4 網路架構之簡化與假設	31
3.2 PSR 開關 NIC 決策演算法	32
3.3 PSR 封包路由演算法	39
3.4 NMS 開關 DSLAM 決策演算法	41
3.5 實作可行性探討	50
第四章 模擬結果與比較	52
4.1 模擬程式的撰寫與模擬環境	52
4.2 情境一：使用平均流量與常見情境之模擬結果	53
4.2.1 參數與環境設定	53
4.2.2 模擬結果	56
4.3 情境二：使用特定日流量之模擬結果	65
4.4 情境三 - 使用平均流量與極端情境之模擬結果	71
4.4.1 參數與環境設定	71
4.2.2 模擬結果	74
第五章 結論與展望	81
5.1 結論	81
5.2 未來研究方向	82
附錄一 參數定義與設定值	83
附錄二 情境二模擬結果之詳細數值	87
參考文獻	90

圖目錄

圖 1-1 網狀拓譜示意圖	3
圖 1-2 樹狀拓譜示意圖	3
圖 2-1 ADSL 電話銅線頻寬配置圖	6
圖 2-2 BRAS、DSLAM 與 DSL Modem 之關係示意圖	8
圖 2-3 BRAS、DSLAM 與 DSL Modem 之通訊協定架構圖	8
圖 2-4 3GPP 通訊協定演進示意圖	9
圖 2-5 台大 ADSL 簡易架構圖	13
圖 2-6 802.16m 模擬參數設定建議 [23] (FTP 類別之 PDF 圖形)	16
圖 2-7 模擬參數設定建議 (YouTube 類別之 PDF 圖形)	17
圖 2-8 802.16m 模擬參數設定建議 [23] (HTTP 類別之 PDF 圖形)	19
圖 2-9 台大 ADSL 之 log 檔範例	19
圖 2-10 台大 ADSL YouTube Sessions 下行傳輸速度機率分布	20
圖 2-11 台大 ADSL YouTube Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)	21
圖 2-12 台大 ADSL FTP Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)	22
圖 2-13 台大 ADSL HTTP Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)	23
圖 2-14 台大 ADSL 一日各時段流量平均值	24
圖 2-15 不同服務類型之效用函數圖	25
圖 3-1 過渡型省電架構示意圖	28
圖 3-2 全無線省電架構示意圖	29
圖 3-3 PSR 開關 NIC 決策演算法簡易流程圖	33
圖 3-4 PSR 開關 NIC 決策演算法—開啟 NIC 演算法 流程圖	35
圖 3-5 PSR 開關 NIC 決策演算法—關閉 NIC 演算法 流程圖	36
圖 3-6 PSR 開關 NIC 決策演算法—設定 NIC 路由順位演算法 流程圖	38

圖 3-7 PSR 封包路由演算法 流程圖.....	40
圖 3-8 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—開關 DSLAM 時機 流程圖	45
圖 3-9 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—Turn-on-DSLAM 演算法 流程圖.....	46
圖 3-10 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—Turn-off-DSLAM 演算法 流程圖	47
圖 3-11 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—歷史流量資訊的應用 流程圖	49
圖 4-1 情境一實驗組，DSLAM、WiMAX 基地台與 3G 基地台分布關係圖.....	54
圖 4-2 情境一對照組，DSLAM 分布圖.....	56
圖 4-3 編號 PSR86 號使用現行架構(對照組)於情境一之模擬結果.....	57
圖 4-4 編號 PSR86 號使用省電架構(實驗組)於情境一之模擬結果.....	58
圖 4-5 現行架構(對照組)於情境一之整體模擬結果.....	60
圖 4-6 省電架構(實驗組)於情境一之整體模擬結果.....	61
圖 4-7 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – Blocking Prob.比較圖	66
圖 4-8 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – 用戶整體滿意度比較圖	67
圖 4-9 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – DSLAM 平均開啟時間比例比較圖	68
圖 4-10 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – WiMAX NIC 平均開啟時間比例比較圖	68
圖 4-11 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – 3G NIC 平均開啟時間比例比較圖.....	69
圖 4-12 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – 系統整體省電比例	70
圖 4-13 情境三實驗組，DSLAM 與 WiMAX 基地台分布關係圖.....	72
圖 4-14 情境三對照組，DSLAM 分布圖.....	72
圖 4-15 編號 PSR52 號使用現行架構(對照組)於情境三之模擬結果.....	75
圖 4-16 編號 PSR52 號使用省電架構(實驗組)於情境三之模擬結果.....	76
圖 4-17 現行架構(對照組)於情境三之整體模擬結果.....	77
圖 4-18 省電架構(實驗組)於情境三之整體模擬結果.....	78

表目錄

表 2-1 常見 ADSL 標準一覽表	7
表 2-2 UMTS、HSDPA 與 HSPA+ 傳輸速率理論最大值	10
表 2-3 常見 WiMAX 版本比較表	11
表 2-4 思科公司全球網路流量類型預測	14
表 2-5 802.16m 模擬參數設定建議 (FTP)	15
表 2-6 模擬參數設定建議 (YouTube)	17
表 2-7 802.16m 模擬參數設定建議 (HTTP)	18
表 2-8 效用函數之參數設定值	26
表 3-1 混合式接取網路各裝置耗電功率	32
表 3-2 PSR 開關 NIC 決策演算法參數表	33
表 3-3 PSR 封包路由演算法參數表	39
表 3-4 NMS 開關 DSLAM 決策演算法參數表	42
表 4-1 模擬時使用之程式	52
表 4-2 模擬時使用之硬體	53
表 4-3 情境一實驗組參數設定值	55
表 4-4 情境一省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表	62
表 4-5 情境一模擬結果省電比率一覽表	65
表 4-6 情境二省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)平均模擬結果比較表	70
表 4-7 情境二模擬結果平均省電比率一覽表	71
表 4-8 情境三實驗組參數設定值	73
表 4-9 情境三省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表	79
表 4-10 情境三模擬結果省電比率一覽表	80

表附錄 1-1 完整參數表 83

表附錄 1-2 模擬參數設定值 85

表附錄 2-1 情境二省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表 87



第一章 緒論

1.1 問題的發展背景及環境

近幾年來，隨著溫室效應在全球各地對氣候的影響逐漸增強，人類活動造成的排碳量也因此逐漸受到各界的重視。然而排碳量的降低並不容易，必須要從多個面向下手，舉凡能源的取得、商品的原料與製造方式、能源的使用效率乃至於大眾使用電力的習慣等等，不論哪一項都有具有舉足輕重的影響，也都具有研究的價值。

電資通訊領域(Information and Communications Technology, ICT)的用電量是全球能源消耗的大宗之一，而且數值逐年上升。根據前人的研究與統計指出，電資通訊領域(ICT)的用電量大約佔全球能源消耗的 2.6%，電力消耗的 8%[1]，而這數值還僅只統計各裝置在使用時的耗電量，不包括設備與裝置在生產階段的能源消耗。同時該研究還將 ICT 的用電分成 5 個大類別來討論：

1. 數據中心(Data Centers)：

泛指大大小小的伺服器與其周邊裝置。占整體耗電的 17%。

2. 個人電腦(PCs)：

包含其螢幕與網路介面卡。占整體耗電的 18%。

3. 網路設備(Network Equipment)：

在此指所有網路裝置與設備。占整體耗電的 15%。

4. 電視(TV sets)：

DVD 撥放器與其他電視周邊用電裝置亦計入此類。占整體耗電的 26%。

5. 其他電器(Others)：

除了上述裝置之外，例如手機或印表機皆算是其他電器類。占整體耗電的 24%。

雖然這數據是 2008 年的統計資料，現今各個類別的耗電量必然已成長許多，但是整體的分布和今日勢必差異不大，甚至因為使用者對於網路頻寬的需求快速上升，網路設備類的耗電比重相形之下反而還會更高。

網路設備尚可再粗分為核心網路(Core Network)與接取網路(Access Network)兩類來討論，兩者以局端(Central Office, CO)為分界。以道路系統來比喻，前者可視為高速公路或省道，而後者則是緊密交織的一般街道。我們從[2]的研究可以發現，接取網路的耗電占網路設備耗電的 65%，也就是說，對於網際網路服務提供者(ISP)或是無線/行動服務提供者而言，負擔接取網路設備的電費是一項沉重的營運成本(OpEx)。

簡單來說，降低接取網路的耗電量有許多的好處：就環保觀點而言，因省電而減少的排碳量能夠延緩溫室效應對全球生態環境與氣候的影響；就相關電信業者而言，降低營運成本也就能增加獲利。因此，利用簡易的架構調整與相關演算法來降低有線接取網路的耗電量，是一項值得研究的議題，也是本篇論文的研究主題。

1.2 問題簡介與研究目標

整體而言，在不改變現有網路架構或運作模式底下，要降低有線接取網路的耗電並不容易，主要受其布建方式所造成的影響：核心網路為了頻寬以及可靠度等等的因素，大多選擇採用網狀拓譜 (Mesh Topology) 的方式來布建 (如圖 1-1 所示)，因此在一日當中流量較低的時段，將部分核心設備 (如路由器) 關閉抑或切換至睡眠模式是常見的省電策略；然而這樣的策略在接取網路並不適用，因有線接取網路大多是以樹狀拓譜 (Tree Topology) 的方式來布建 (如圖 1-2 所示)，就現行的架構而言，任何一個節點裝置的關閉，都會使得部分使用者無法連接上網路。

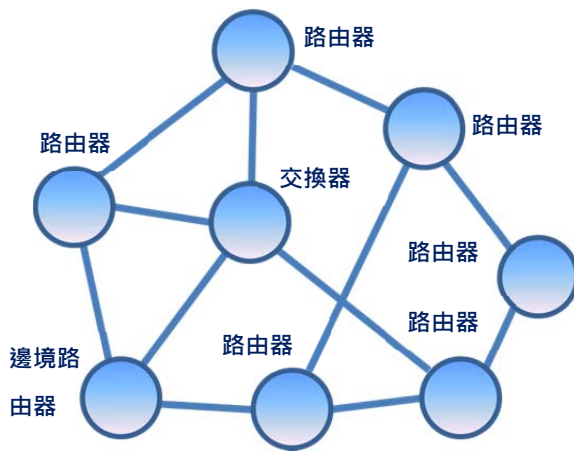


圖 1-1 網狀拓譜示意圖

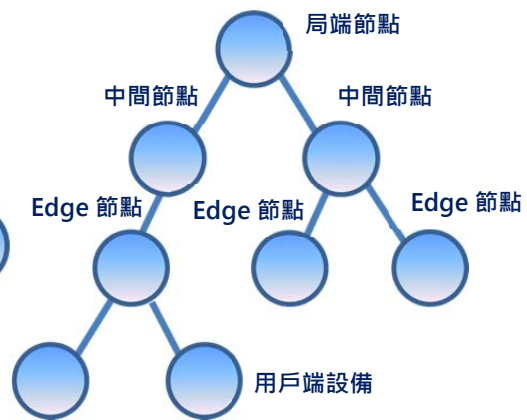


圖 1-2 樹狀拓譜示意圖

即使如此，由於目前廣泛使用的網路設備其耗電量與封包流量不具有必然的線性關係，甚至在某些情境底下，兩者完全不具有相關性[3]，根據[4]的建議，與其致力於增加網路設備耗電量與封包流量的線性關係，將多餘的裝置關閉依然是現今最佳的省電策略。

我們認為，有線接取網路的設備並非完全沒有關閉的可能，這也是本論文與其他研究最大的不同點，主要的原因有三：

1. 除了有線接取網路之外，隨著近幾年智慧型手機與平板電腦使用者人數的激增，無線接取網路的布建與涵蓋範圍漸趨完備，同時提供的頻寬亦越來越高。
2. 不論是有線接取網路還是無線接取網路，在深夜時段的使用率都不高。
3. 無線接取網路的基地台因同時還提供傳統語音服務，不可能因為流量降低而完全關閉，否則會有違反電信法規之虞。

綜合以上觀察，若是能有一個有效的架構與機制能夠在深夜時段將有線接取網路剩餘的小流量導引匯集至無線接取網路之基地台，那麼有線接取網路的設備就有很大的機會可以關閉，藉此省下可觀的電力消耗。本論文乃提出可達成上述內容之省電架構與演算法，並證明其可行性，此即是本論文之研究標的。

1.3 論文章節架構

本論文共分為五個章節，為方便讀者了解本論文提出之網路架構與演算法，在第二章之中將詳述目前已廣泛布建的各式接取網路，以及分析使用者行為與使用者感受之相關研究。第三章為本論文提出之創新架構與相應之省電演算法，並討論其可行性。而第四章乃是利用上述兩章描述之背景知識及演算法，在套用不同環境參數所進行之程式模擬。最後在第五章則是結論以及未來研究方向。



第二章 接取網路現況與使用者行為相關研究

在本章中，會介紹數種已廣泛布建之常見接取網路與其特性，以及探討使用者在使用接取網路存取網際網路時的相關研究，以方便讀者理解第三章之混合式寬頻接取網路架構與演算法。

2.1 常見接取網路技術與發展現況

混合式寬頻接取網路，顧名思義是由一個以上之寬頻接取網路所構成，在本論文之中選擇採用三種寬頻接取網路：ADSL、3G 與 WiMAX，用以驗證本論文提出之混合式架構與省電演算法之可行性。選擇這三種寬頻接取網路的理由，主要是因為上述三者已然在台灣部分地區同時佈建。於 2010 年 12 月的調查顯示，包含 ADSL 之接取網路在有線寬頻市場佔有率達 81.26%（xDSL 與 FTTx）[5]，而 3G 執照在台灣已釋出 5 張執照，同時 WiMAX 則已釋出 6 張執照[5]，唯可惜最有潛力的 LTE 迄今在台灣仍未釋照。

2.1.1 非對稱數位用戶線路(ADSL)

非對稱數位用戶線路，英文全名為 Asymmetric Digital Subscriber Line，簡稱 ADSL，是目前最常見的有線寬頻接取網路標準。非對稱數位用戶線路（以下簡稱 ADSL）之所以會成為近年來最通用的有線寬頻接取網路，主要的原因是它採用了分頻多工（Frequency-division multiplexing）的方式，將普通的電話線分為三個不同的頻帶[6]，由頻率自低而高分別傳輸類比電話語音資料、數位上行網路資料封包（Upstream）以及數位下行網路資料封包（Downstream），如圖 2-1，三者訊號

彼此之間不互相干擾。因此對於用戶（Subscribers）而言，只需要在原電話線路上加裝一個用戶端設備（Customer Premise Equipment，CPE），即可在不影響原本電話語音服務的同時經由網際網路服務供應商(Internet Service Provider，ISP)連上網際網路，相較於其他接取網路，不論是安裝或與使用均較為方便。

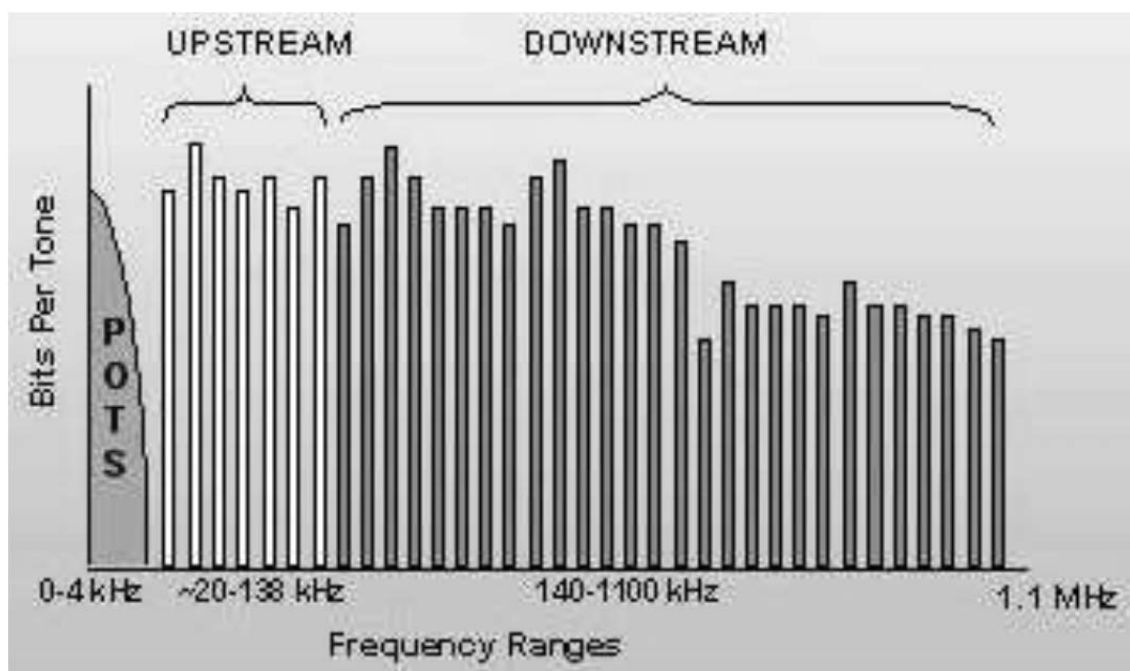


圖 2-1 ADSL 電話銅線頻寬配置圖 [6]

從圖 2-1 來看，在電話線之中上行與下行的頻寬並不相等，主要因為 ADSL 是設計給一般家庭用戶連網使用而非網路伺服器，故較為偏重下行頻寬，就技術層面而言，下行頻寬大於上行頻寬也有助於減少不同用戶在線路集散時訊號彼此干擾（Crosstalk）。也由於上下行頻寬不對稱的這個特性，該技術被命名為「非對稱」數位用戶線路接取網路。

然而 ADSL 只是通稱，自從第一代 ADSL 技術（ANSI T1.413-1995）在 1995 年發表以來，至今已經歷多次改版，名稱也都有所不同，例如：ADSL、ADSL2 以及 VDSL 等等，如表 2-1 所示。但 ISP 業者為了宣傳方便，依然全部通稱為 ADSL 或是 xDSL。而在本論文之中，則選擇採用 ADSL 泛指所有 DSL 相關技術。

表 2-1 常見 ADSL 標準一覽表 [7]

標準名稱	通用名稱	下行速率	上行速率
ANSI T1.413-1998 Issue 2	ADSL	8 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.1 Annex A	ADSL	8 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.2 Annex A	ADSL Lite	1.5 Mbit/s	0.5 Mbit/s
ITU G.992.3 Annex A/4	ADSL2	12 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.3/4 Annex J	ADSL2	12 Mbit/s	3.5 Mbit/s
ITU G.992.3/4 Annex L	RE-ADSL2	5 Mbit/s	0.8 Mbit/s
ITU G.992.5	ADSL2+	24 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.5 Annex A	RE-ADSL2+	26 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.5 Annex M	ADSL2+	23.5 Mbit/s	3.5 Mbit/s
ITU G.993.1	VDSL	55 Mbit/s	3.0 Mbit/s

在發展出 ADSL 系列技術之前，電信業者主要是提供電話語音服務。然而在電話線路同時也具備傳輸數據的功能之後，原本位於局端（Central Office，CO）的電話交換機（Telephone Exchange）便逐漸演進為能同時支援語音與數據服務的數位用戶線接入復用設備(Digital Subscriber Line Access Multiplexer，DSLAM)，而提供市內電話服務的電信業者也因此逐漸轉型成為 ISP 業者。

數位用戶線接入復用設備（以下簡稱 DSLAM）原本位於局端內，被稱為 Monolithic DSLAM，但隨著 ADSL 技術不斷的演進，傳輸速率不斷的上升，受限於電話銅線本身信號衰減的性質，為了維持訊雜比（Signal-to-noise Ratio，SNR），DSLAM 布建的位置離局端越來越遠，離用戶端設備(CPE or DSL Modem)則是越來越近。該種架設於局端外之 DSLAM 又被稱為 Remote DSLAM，而留在局端內的裝置則改為寬頻遠程接入系統（Broadband Remote Access Server，BRAS），負責匯集來自各個 DSLAM 的訊號[8]，三者之間的連接關係可簡單以圖 2-2 表示，而彼此之間的通訊協定[9]則如圖 2-3 所示，由於細節非本論文之重點，在此並不贅述。

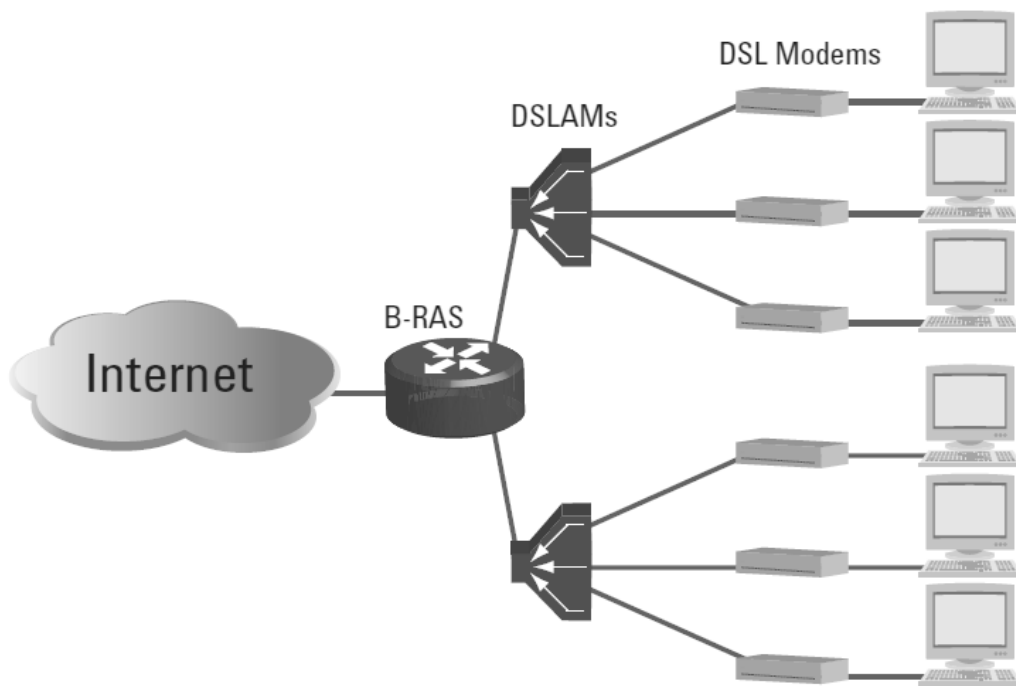


圖 2-2 BRAS、DSLAM 與 DSL Modem 之關係示意圖 [8]

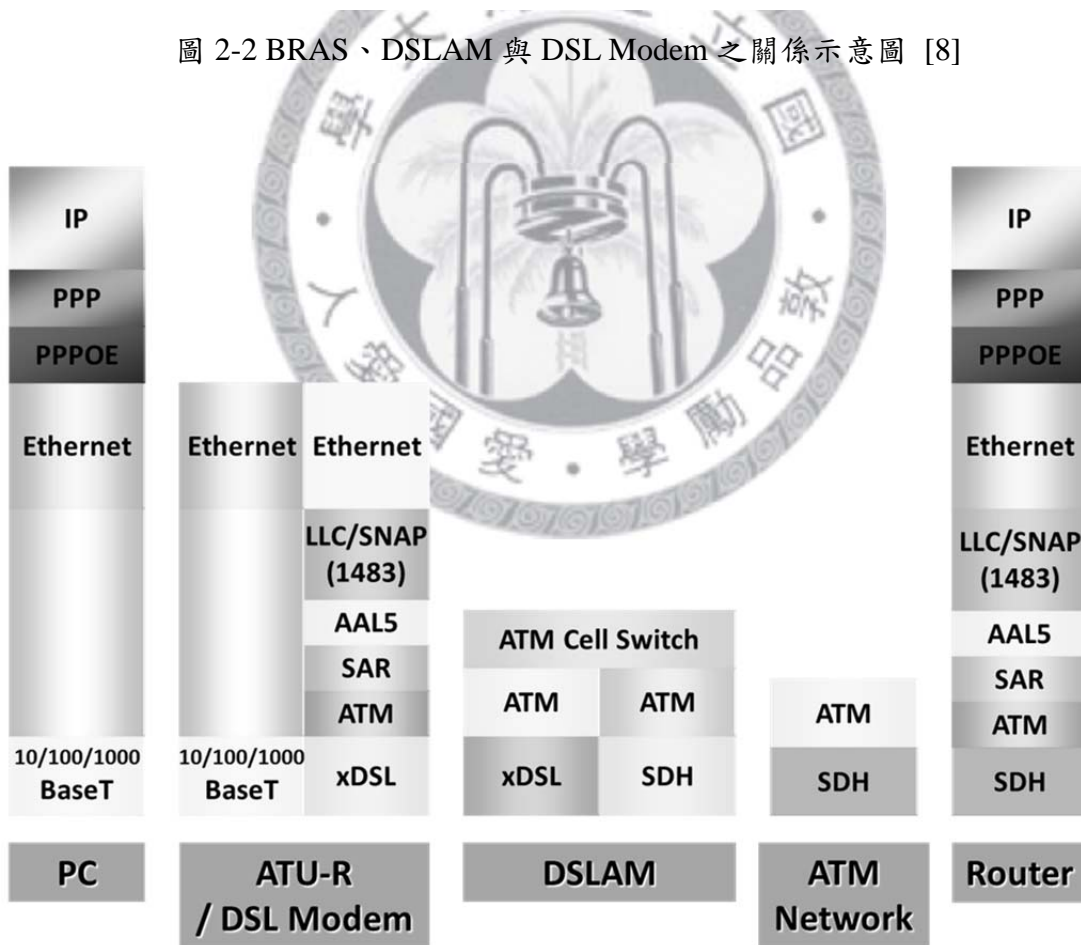


圖 2-3 BRAS、DSLAM 與 DSL Modem 之通訊協定架構圖。參考自[9]

2.1.2 第三代行動通訊系統(3G)

第三代行動通訊技術 (3rd-generation, 3G) 泛指符合 IMT-2000 規範但尚未滿足 IMT-Advanced 要求的各種手持裝置通訊標準。IMT-2000 與 IMT-Advanced 均由國際電信聯盟 (International Telecommunication Union, ITU) [10] 所制定。IMT-2000 在當時認為, 唯有在室內、室外和行車的環境中能夠分別支持至少 2Mbps、384kbps 以及 144kbps 的傳輸速度之技術, 才能被稱為 3G [11]; 而在 2008 年由 IMT-Advanced 所定義的 4G 通訊系統則是指可使手持裝置在靜止與高速移動時分別達到至少 1.0Gbps 和 100Mbps 的通訊標準 [12]。

介於兩者之間的常見通訊標準有 CDMA2000、UMTS (WCDMA)、HSPA (HSDPA、HSUPA)、HSPA+、WiMAX 與 LTE 等等。其中, 現今在台灣最為通行的無線接取網路則是由第三代合作夥伴計劃組織 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) [13] 所定義之通訊標準, 包含 UMTS、HSDPA 與 HSPA+。三者之間的演進如圖 2-4 所示。

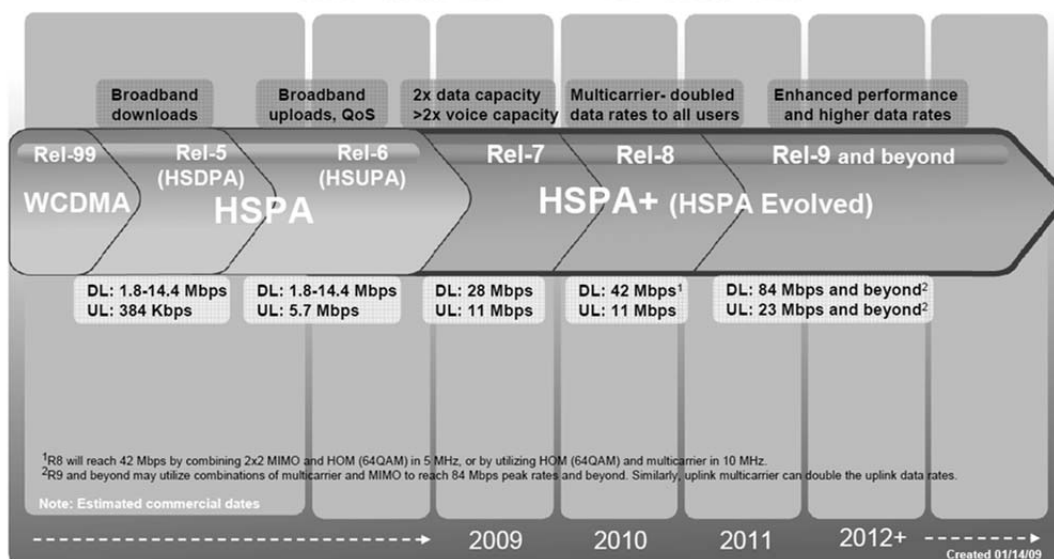


圖 2-4 3GPP 通訊協定演進示意圖 [14]

由於在台灣既有的 3G 網路以 UMTS、HSDPA 與 HSPA+三者為大宗，且現行多模 3G 網卡會根據通道狀況與壅塞情形自行於三網之間切換，因此為了簡化起見，在本論文之中將三者合稱為 3G 系統。其實體層最大傳輸速率如表 2-2 所示。

表 2-2 UMTS、HSDPA 與 HSPA+傳輸速率理論最大值 [14]

通訊協定	實體層最大上行速率	實體層最大下行速率	Channel BW
UMTS (Rel-99)	384 kbps	384 kbps	2×5MHz, FDD
HSDPA (Rel-5)	384 kbps	14.4 Mbps	2×5MHz, FDD
HSPA+ (Rel-7)	11 Mbps	28 Mbps	2×5MHz, FDD

然而根據[15]的研究，HSPA 實體層所能達到的資料傳輸速率會由於編碼、標頭等等的負擔而打折扣，最終約為實體層最大下行速率之 75%。再考慮 RLC 與 MAC 層的標頭負擔，一般公認 IP 層的傳輸速率約為實體層最大下行速率之 60%。換句話說，對於 HSPA+而言，IP 層之最高下行速率可視為 $28\text{Mbps} \cdot 0.6 \cong 17\text{Mbps}$ 。同時該速率為基地台涵蓋範圍內之所有使用者共享。

2.1.3 全球互通微波存取網路(WiMAX)

全球互通微波存取網路 (Worldwide Interoperability for Microwave Access，以下簡稱 WiMAX)，是由 2001 年 6 月成立的 WiMAX Forum[16]依據 IEEE 802.16 家族標準所命名、測試與推廣。其目標是提供寬頻使用者在最後一哩路 (last mile) 除了 ADSL 與 Cable 之外另一種寬頻接取的選擇[17]。

由於 WiMAX 是根據 IEEE 802 系列標準所制定，在本質上與 IEEE 802.11 家族標準 (或稱為 WiFi) 極為相似，兩者的重點皆放在接取網路，缺乏如同 3GPP

系列所制定的完整核心網路標準。然而 WiMAX 與 WiFi 在應用上與技術上卻十分的不同。WiMAX 基地台涵蓋範圍較廣，屬於無線都會區域網路 (Wireless Metropolitan Area Network, Wireless MAN)，遠大於 WiFi 的涵蓋範圍。且 WiMAX 底層傳輸採用效率較高的正交分頻多重存取技術 (Orthogonal Frequency-division Multiple Access, OFDMA)，有時亦會加入多輸入多輸出 (Multi-input Multi-output, MIMO) 的方式增加其頻譜使用效率。常見的 WiMAX 版本其頻寬如表 2-3 所示。

表 2-3 常見 WiMAX 版本比較表 [18]

常見名稱	家族	無線技術	實體層最大上行速率	實體層最大下行速率	備註
WiMAX rel 1	802.16	MIMO -SOFDMA	17 Mbps (10MHz,TDD)	37 Mbps (10MHz,TDD)	2 × 2 MIMO
WiMAX rel 1.5	802.16 -2009	MIMO -SOFDMA	46 Mbps (20MHz,TDD) 138 Mbps (2x20MHz,FDD)	83 Mbps (20MHz,TDD) 141 Mbps (2x20MHz,FDD)	2 × 2 MIMO
WiMAX rel 2	802.16 m	MIMO -SOFDMA	<u>2 × 2 MIMO</u> : 70 Mbps (20MHz,TDD) 188 Mbps (2x20MHz,FDD) <u>4 × 4 MIMO</u> : 140 Mbps (20MHz,TDD) 376 Mbps (2x20MHz,FDD)	<u>2 × 2 MIMO</u> : 110 Mbps (20MHz,TDD) 183 Mbps (2x20MHz,FDD) <u>4 × 4 MIMO</u> : 219 Mbps (20MHz,TDD) 365 Mbps (2x20MHz,FDD)	低速率使用者尚可使用 multiple channels 使最大下行速率達 1 Gbps

如同前一小節所述，實體層之傳輸速率打 6 折之後，才較為接近 IP 層所能使用之真實頻寬，在此亦同。且單一使用者能使用之頻寬亦須與其他同一基地台底下之使用者共享。也因此個別使用者最終感受到之資料傳輸速率與表 2-3 所列數據相距甚遠。

2.2 使用者行為模型

不論接取網路的技術如何變革與演進，服務的對象始終是人，是故演算法的設計是否能因應封包流量在不同時段的震盪，乃至於最終的結果是否能令使用者滿意，都與使用者行為息息相關。

自從 1990 年代初網際網路(Internet)開放給一般大眾使用之後，至今已經歷過多次的趨勢變革。最初，網站內容只是由簡易的文字與圖片所構成，在當時的網路資料量並不高而且使用者行為亦較為單純。後來出現了能幫使用者將網頁分類的入口網站與提供使用者更加直觀搜尋方式的搜尋引擎，該類型網站的崛起首次大大更改了大眾使用網路的行為。接下來點對點傳輸(P2P)的檔案分享技術異軍突起，專門提供影音串流服務的網站亦擄獲大眾芳心，再再使得網路頻寬的需求水漲船高。甚至到了近幾年，這類難以預期的變革仍然在持續之中，社群網站的快速興盛即是一例。

而在這過程當中，使用者行為始終不斷地在改變，改變的速度甚至遠快過學術界的研究與業界的預測。因此，以下敘述的使用者行為相關研究將盡可能地採用較為近期的公開文獻資料，以期符合使用者行為的真實樣貌。雖然寬頻接取網路服務提供者擁有真實的商業寬頻接取網路使用者之流量行為，但可惜相關資訊不易由業者取得，故在此我們選擇使用「台大 ADSL」[19]的使用者連線紀錄來取代。

「台大 ADSL」是國立台灣大學與中華電信合作推出的網路服務，主要的目的是方便在外租賃的學生使用校園網路資源，其架構大致可分為二大部份：接取網路與核心網路。前者由中華電信提供，而後者則為台灣學術網路 (Taiwan Academic Network, TANet)，如圖 2-5 所示。

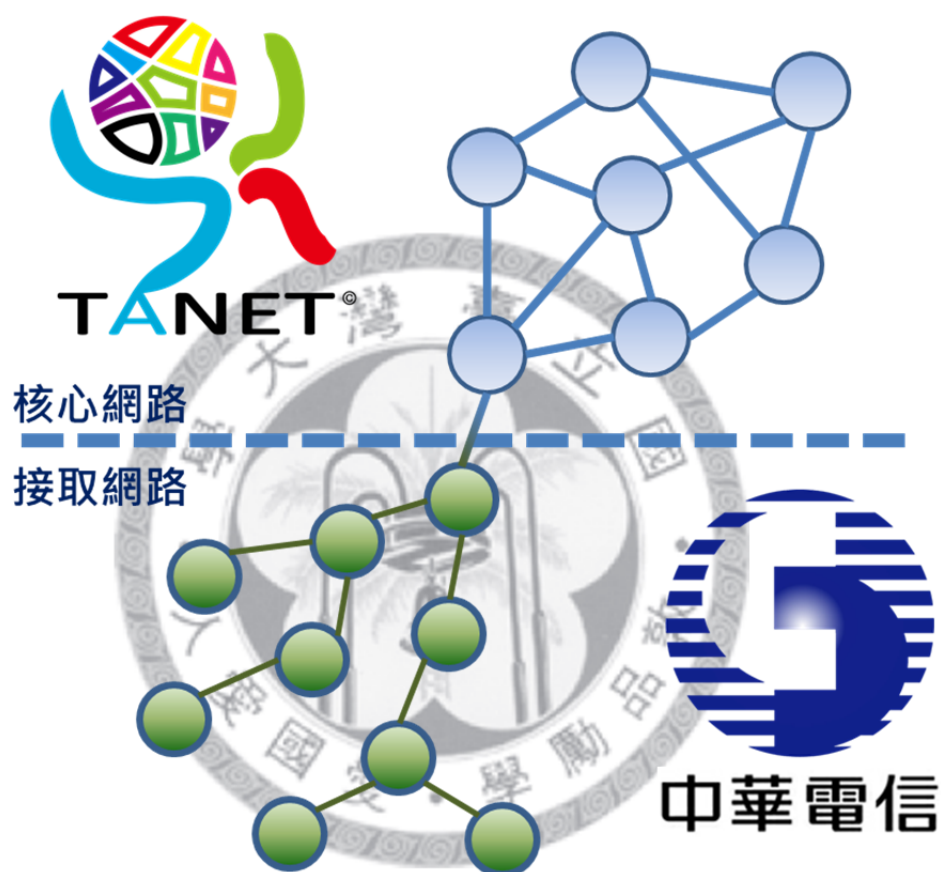


圖 2-5 台大 ADSL 簡易架構圖

由於學術網路會過濾不適當的封包類型 (例如 P2P)，因此在接取網路與核心網路的交界處設有專屬的防火牆，而本論文參考的「台大 ADSL」連線記錄檔即為該防火牆的紀錄檔。該筆資料記錄自 2011 年 11 月 13 日至 2012 年 1 月 8 日，約有七千萬筆連線紀錄。結合「台大 ADSL」的連線記錄與近期公開文獻，合理推測近期使用者行為的全貌應相去不遠。

2.2.1 使用者行為之相關研究

為了要建立單一 ADSL 用戶之流量行為，本論文採取之步驟如下：

步驟一：確立不同種應用類型產生的流量比例。

步驟二：針對各個類型的應用，找出其通信期（Session）所接收之檔案大小機率分布與下行速率機率分布。

步驟三：尚有遺漏之處則使用「台大 ADSL」連線紀錄檔案補足。

首先，為了要找出 ADSL 使用者在不同種應用類型產生之流量比例，本論文選擇採用由業界所提供的數據，例如[20][21]與[22]。主要的原因是業界的設備位在第一線接觸使用者流量，其數據最具有可信度。而考量研究的年份與設備的多寡，三者之中又以[20]最具代表性，這篇白皮書的內容是思科公司（Cisco Systems, Inc.）根據其分布於全球各地的產品在 2010 年所蒐集的資料來推估未來五年全球流量變化的趨勢，而其內容也包含使用者流量類型的數據分析。

該研究報告與本論文相關之部分整理於表 2-4。

表 2-4 思科公司全球網路流量類型預測 [20]

	2012 流量 (PB per Month)	2012 比例	2013 流量 (PB per Month)	2013 比例
File Sharing	7,277	29.73 %	8,867	26.89 %
Internet Video	12,146	49.62 %	17,583	53.33 %
Web, Email and Data	4,146	16.94 %	5,325	16.15 %
Video Calling	659	2.69 %	905	2.74 %
Online Gaming	95	0.39 %	133	0.40 %
VoIP	153	0.63 %	157	0.48 %
Other	1	~0.00 %	3	0.01 %

由這份白皮書可看出，流量排名前三位的類型，依序為「File Sharing」、「Internet Video」與「Web, Email and Data」，佔了總流量的 96%，已具有顯著之代表性。故在本論文之中，選用此三種類型作為使用者產生流量之種類。然而，為了有足夠的佐證資料以產生模擬時之使用者流量，在本論文之中「File Sharing」、「Internet Video」與「Web, Email and Data」再依序簡化為「FTP」、「YouTube」與「HTTP」三大類。雖然彼此不完全相同，但是本質上是相似的，合理推測差異不會太大。

至於 FTP session file size 的產生方式，由於相關技術已然十分穩定，近期並沒有相關的學術文獻研究可供參考，只有在訂定無線接取網路的標準而需要公定的模擬參數時，才会有產生 FTP session file size 的資料，例如[23][24]，而在此選擇使用[23]建議之方式，因為 802.16m 能提供 DSL 等級的傳輸速率，使用者在傳輸檔案時的行為會較為類似。其詳細參數如表 2-6 所示，而 PDF 圖形則如圖 2-5。

表 2-5 802.16m 模擬參數設定建議 (FTP) [23]

Distribution	Parameters	PDF
Truncated Lognormal	Mean = 2 MBytes SD = 0.722 MBytes Max = 5 MBytes	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], x \geq 0$ $\sigma = 0.35, \mu = 14.45$ If $x > \max$ or $x < \min$, discard and generate a new value for x .

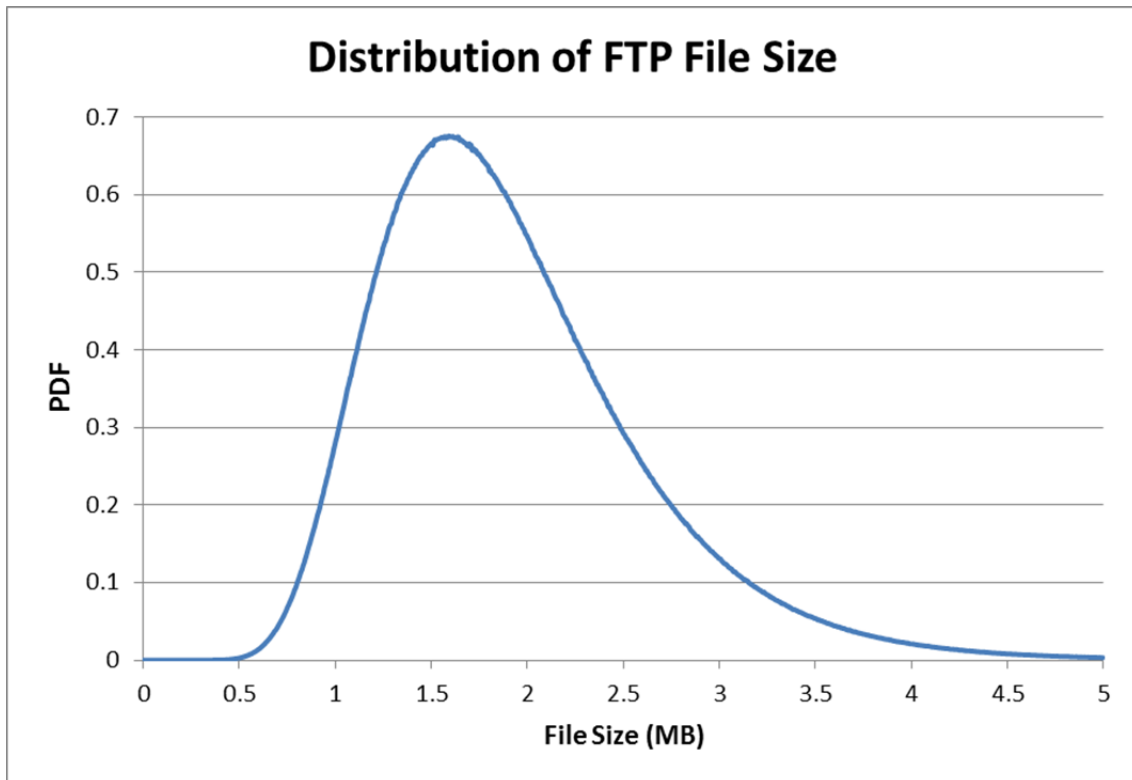


圖 2-6 802.16m 模擬參數設定建議 [23] (FTP 類別之 PDF 圖形)

相較於 FTP，YouTube 顯然較為新穎，因此對於其流量的相關研究亦不少，例如[25][26]與[27]等等。但考量到 YouTube 內部不斷地在改版以及數學模型的完整性，在此選用年份最接近的[25]所建議之方式來產生 YouTube session file size。其詳細參數如表 2-6 所示，而 PDF 圖形則如圖 2-7。

表 2-6 模擬參數設定建議 (YouTube) [25]

Mean	Median	COV	Model
9,809.52 KB	8,480.33 KB	0.93	Gamma(a,b) with a = 1.80 b = 5,441.93

發表於 2009 年 1 月份

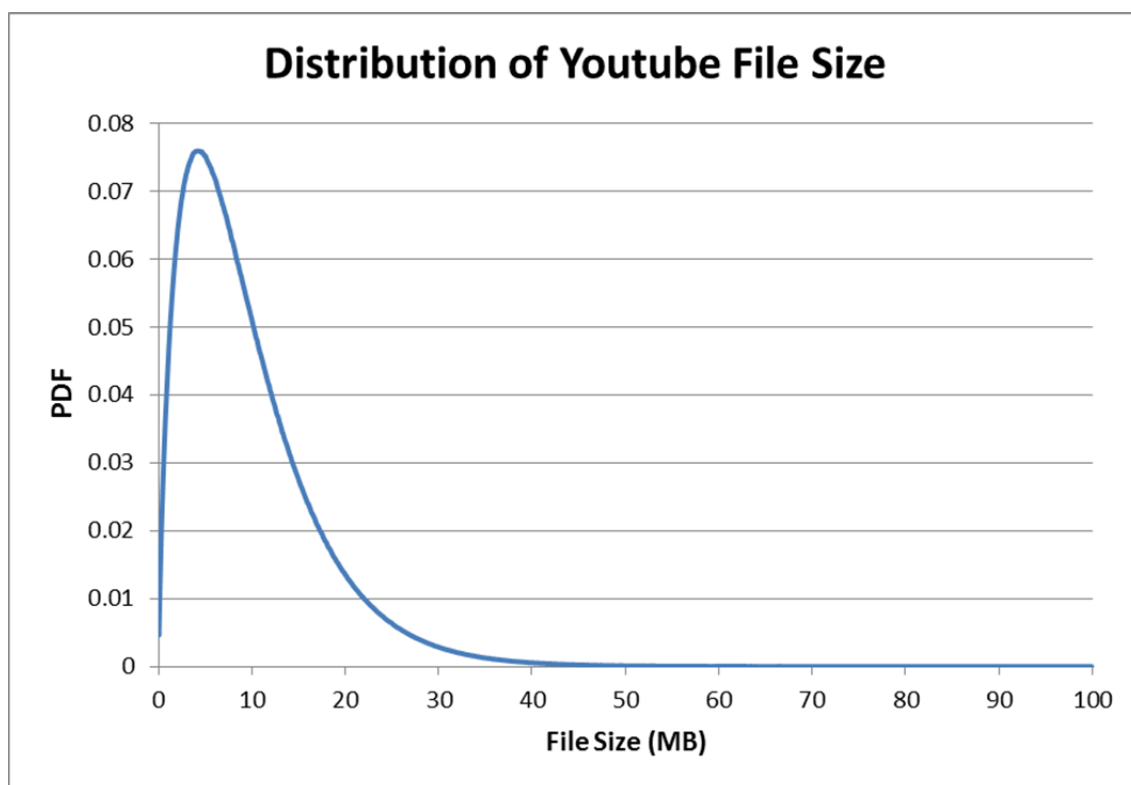


圖 2-7 模擬參數設定建議 (YouTube 類別之 PDF 圖形)

HTTP session file size 的產生方式，和 FTP 時的理由相同，在此均選用[23] 之建議。詳細參數如表 2-7 所示，其 PDF 圖形則如圖 2-8。

表 2-7 802.16m 模擬參數設定建議 (HTTP) [23]

Component	Distribution	Parameters	PDF
Main object size	Truncated Lognormal	Mean = 10710 Bytes SD = 25032 Bytes Min = 100 Bytes Max = 2 Mbytes (Before truncation)	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp\left[\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right],$ $x \geq 0$ $\sigma = 1.37, \mu = 8.37$ <p>If $x > \max$ or $x < \min$, discard and generate a new value for x.</p>
Embedded object size	Truncated Lognormal	Mean = 7758 Bytes SD = 126168 Bytes Min = 50 Bytes Max = 2 Mbytes (Before truncation)	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp\left[\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right],$ $x \geq 0$ $\sigma = 2.36, \mu = 6.17$ <p>If $x > \max$ or $x < \min$, discard and generate a new value for x.</p>
Number of embedded objects per page	Truncated Pareto	Min = 5.64 Max = 53 (Before truncation)	$f_x = \frac{\alpha \cdot k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, k \leq x \leq m$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m$ $\alpha = 1.1, k = 2, m = 55$ <p>If $x > \max$ or $x < \min$, discard and generate a new value for x.</p>

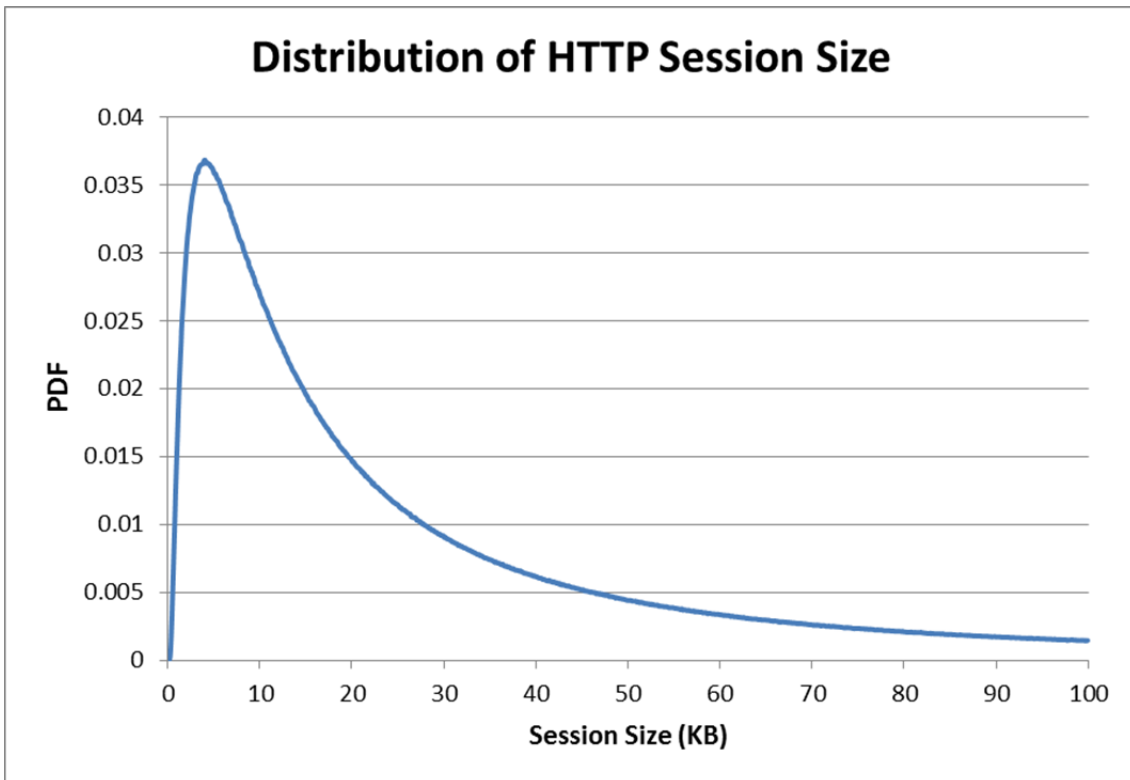


圖 2-8 802.16m 模擬參數設定建議 [23] (HTTP 類別之 PDF 圖形)

2.2.2 使用者行為統計分析

為了補足現有公開文獻之不足，本論文亦使用「台大 ADSL」[19]自 2011 年 11 月 13 日至 2012 年 1 月 8 日共 56 天約七千萬筆 2000 人之通信期連線紀錄檔案來分析。每筆資料紀錄的資訊主要是其 start time、source、destination、port、file size、UDP or TCP 與 duration，如圖 2-9。

```
Dec 15 05:00:52 nat-█.adsl.ntu.edu.tw nsisg1000: NetScreen device_id=013312200
6000█ [Root]system-notification-00257(traffic): start_time="2011-12-15 04:44:
44" duration=920 policy_id=91 service=tcp/port:4244 proto=6 src zone=Trust dst z
one=Untrust action=Permit sent=525 rcvd=3408 src=10.112.90.█ dst=50.16.39.█
src_port=52665 dst_port=4244 src-xlated ip=140.112.5.█ port=49509 dst-xlated ip
=50.16.39.█ port=4244 session_id=240324 reason=Close - TCP FIN
```

用戶 IP 網址與相關資訊已予隱藏

圖 2-9 台大 ADSL 之 log 檔範例

利用前述資料統計後，即可再多獲得兩項參數資料：下行傳輸速度之機率分布，以及一日當中各時段流量大小。有了這些資訊之後即可拼湊出本論文第四章在模擬時所使用之流量產生器全貌。至於 FTP、YouTube 與 HTTP 的檔案大小機率分布不使用這份 log 檔分析的主要原因，乃是因為單從這些資訊並沒有辦法精準判斷每筆 session 所屬之類別，故改以公開學術研究[23]與[25]取代。

至於各個類別的傳輸速率則存在統計方法。以 YouTube 下載速率為例，由於該公司在中研院有一暫存器，在台灣的使用者要觀看 YouTube 影片時，有極大的比例會連線至該暫存伺服器。同時，其主機 IP 位置通常為 202.169.175.1~254，利用這個特性即可將台大 ADSL 記錄檔之中屬於 YouTube 的 sessions 過濾出來，再挑出其中檔案大小大於 10MB 的 session 以確保內容為影片本身。而滿足上述條件之記錄共有 44,768 筆，其傳輸速度之機率密度圖如圖 2-10 所示。

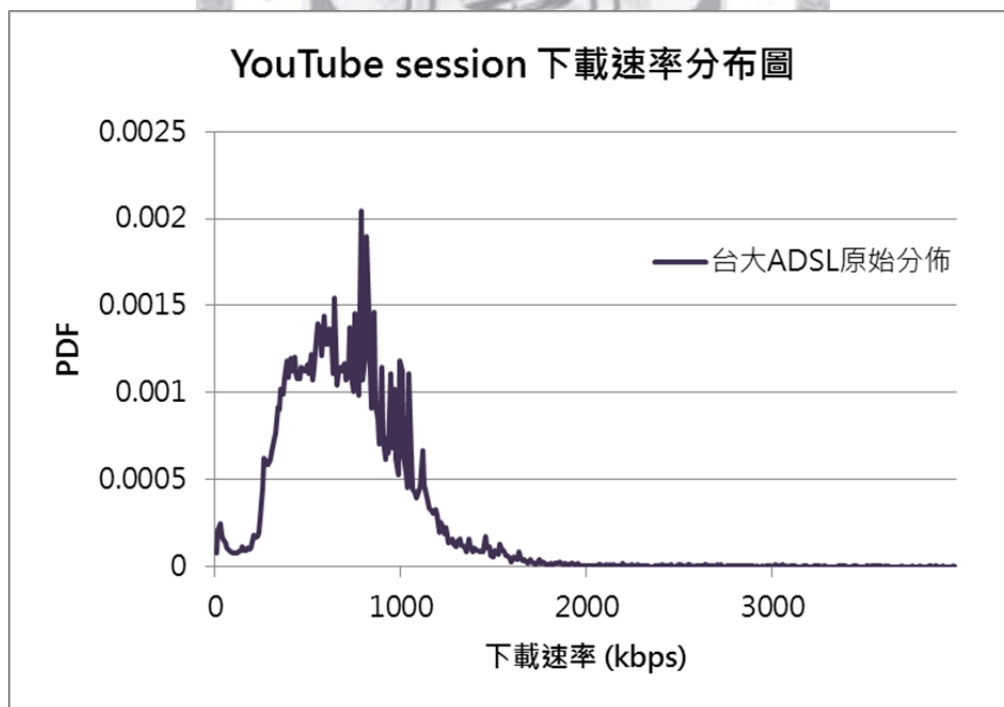


圖 2-10 台大 ADSL YouTube Sessions 下行傳輸速度機率分布

為了方便後續模擬時套用其資訊，在此將其以 Lognormal Distribution 來近似，其機率密度函數(PDF)如(2-1)式所示，而 MLE 公式(Maximum Likelihood Estimation of Parameters)則如(2-2)(2-3)所示：

$$f_X(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (2-1)$$

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_k \ln x_k}{n}, \quad (2-2)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_k (\ln x_k - \hat{\mu})^2}{n}, \quad (2-3)$$

其中 $\hat{\mu}$ 與 $\hat{\sigma}$ 代表在(2-1)式之中 μ 與 σ 的估計值， x_k 代表第 k 個樣本的值，而 n 則代表樣本的總數。套用上述公式可得 YouTube Sessions 傳輸速度之 $\hat{\mu} = 6.46562$ ， $\hat{\sigma} = 0.576755$ ，而其 PDF 圖形則如圖 2-11。

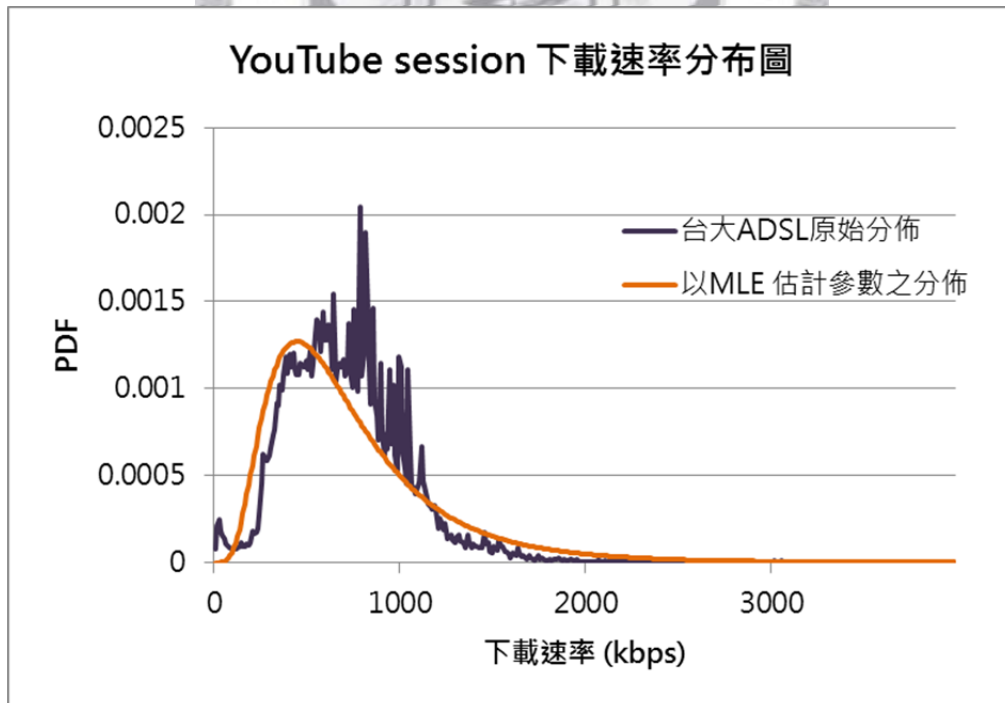


圖 2-11 台大 ADSL YouTube Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)

同理，FTP Sessions 也可使用兩個指標來過濾，其一是連線類型必須是 TCP 而不是 UDP，其二是檔案大小必須大於 50MB，並排除已知為 YouTube sessions 的紀錄。符合上述限制條件的紀錄共有 11,019 筆，且使用 Lognormal Distribution 近似而得之 $\hat{\mu} = 6.25212$, $\hat{\sigma} = 0.945979$ ，其 PDF 圖形如圖 2-12 所示。

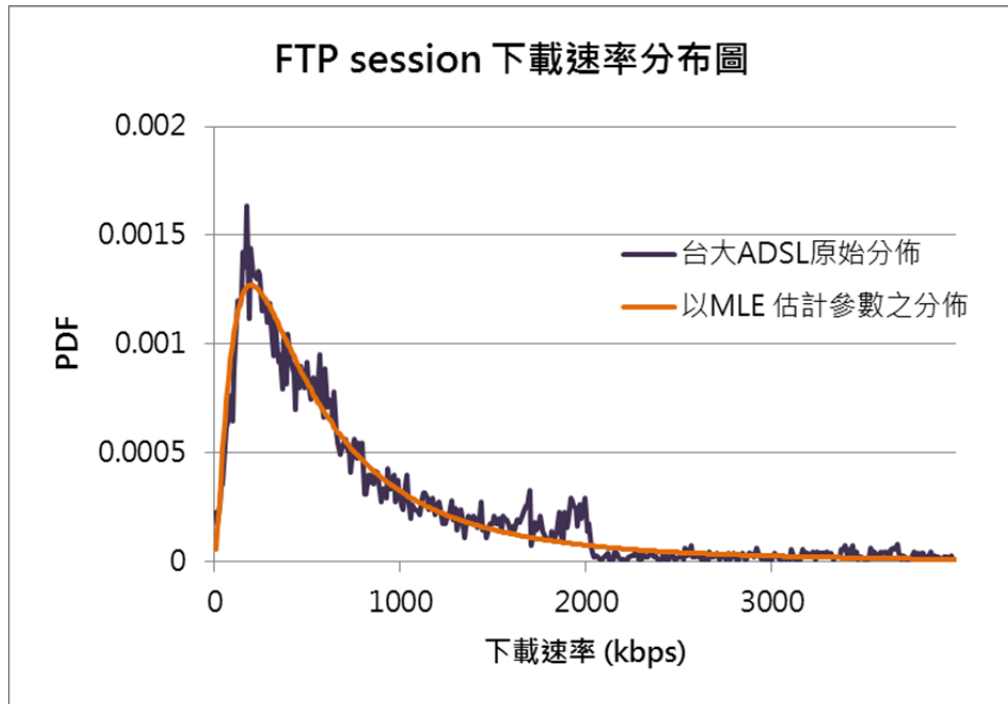


圖 2-12 台大 ADSL FTP Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)

至於 HTTP Sessions 篩選的方式，在此使用連接埠(port num.)作為判斷標準，理由是 HTTP Sessions 必然會使用連接埠 80 作為連線的窗口。但為了降低傳輸時間因延遲紀錄而被高估的影響，在此亦加上檔案大小須高於 1MB 之限制條件。符合的紀錄共有 67,490 筆，使用 Lognormal Distribution 近似而得 $\hat{\mu} = 4.55822$, $\hat{\sigma} = 1.02965$ ，而其 PDF 圖形如圖 2-13 所示。

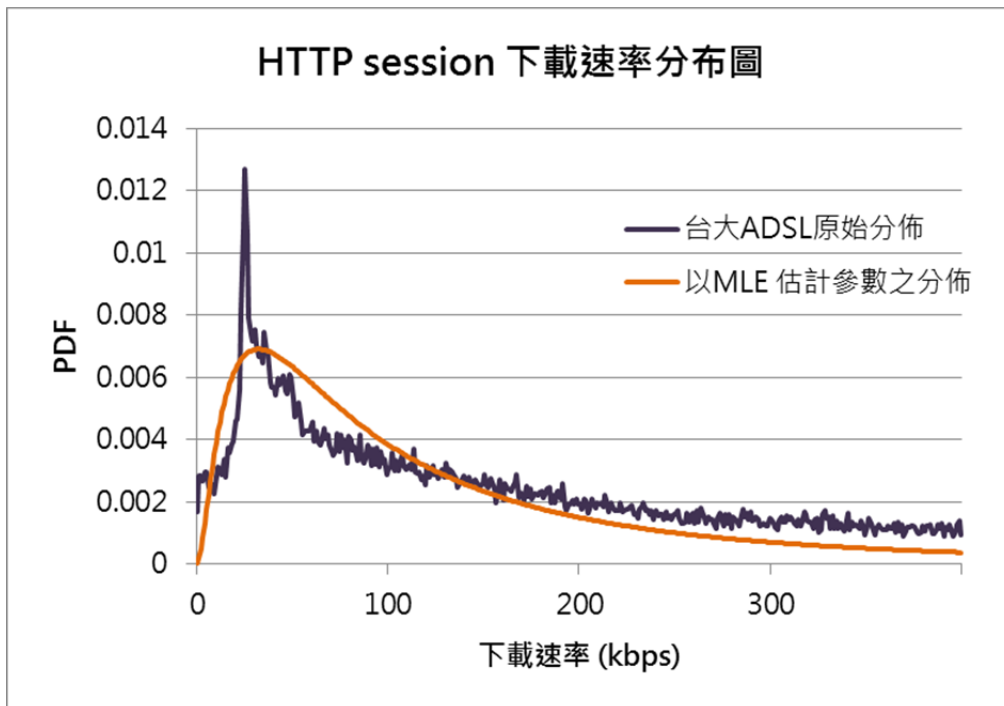


圖 2-13 台大 ADSL HTTP Sessions 下行傳輸速度機率分布(含 MLE)

除了下行傳輸速度之機率分布，台大 ADSL 記錄檔也可以用來計算一日各時段之流量大小趨勢。受限於篇幅之關係，在此僅列出一日各時段流量之平均值，如圖 2-14 所示。該統計資料除了可以在模擬時用來產生 Non-stationary Poisson Process，亦將在第三章演算法之中有關使用歷史資訊的部分予以運用。

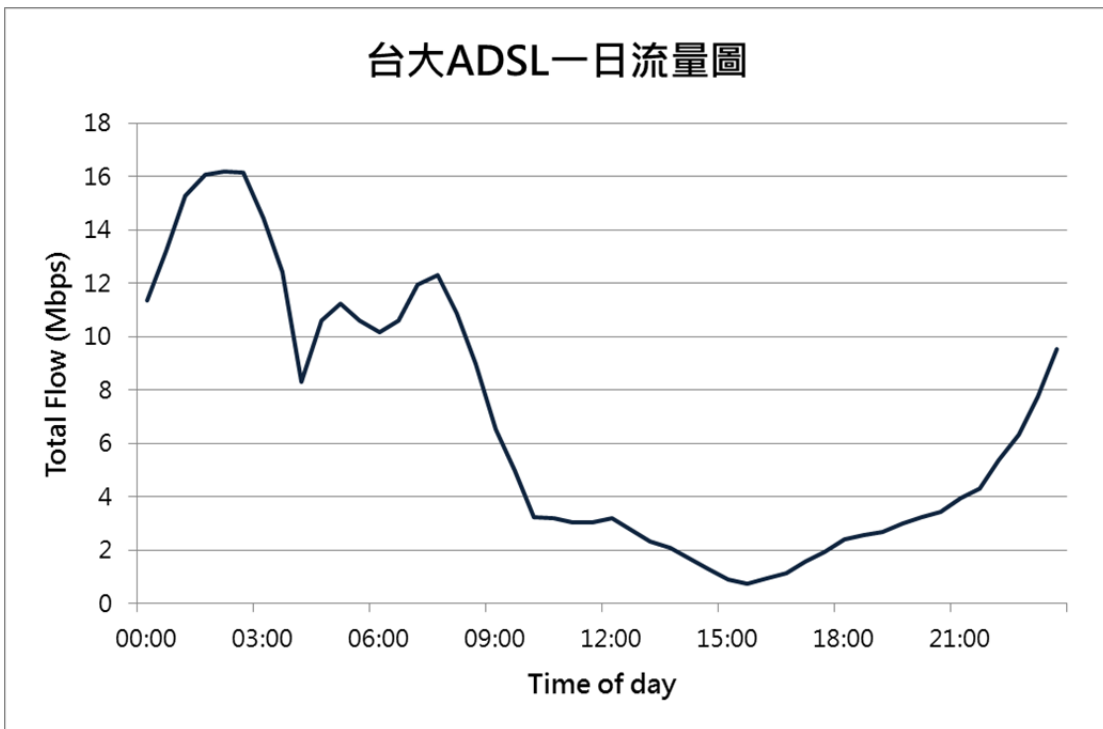


圖 2-14 台大 ADSL 一日各時段流量平均值

2.2.3 使用者效用函數定義

使用者效用函數 (Utility Function) 代表一使用者在使用某些服務之後，對於該服務滿意程度之量化值。而為了確保使用者在本論文提出之省電架構下其服務品質 (Quality of Service, QoS) 和現行架構相比不會有太大的改變，常見作法即是事後計算所有使用者之效用函數總和，並比較兩者之異同。

本論文選擇採用[28]所定義之效用函數，主要的原因是它將每個 Session 分別計算其效用值，而且定義了適用於四種類型之效用函數：VoIP、IPTV、TCP 與 HTTP。其中 VoIP 在本論文之中並無特別討論，IPTV 就本質上而言與 YouTube 是相同的，TCP 即是 FTP 底層之傳輸協定，而最後一項 HTTP 則與本論文定義相同。簡而言之，[28]所定義之效用函數和本論文之使用者行為模型十分契合。

[28]所定義之四種效用函數如圖 2-15 所示。

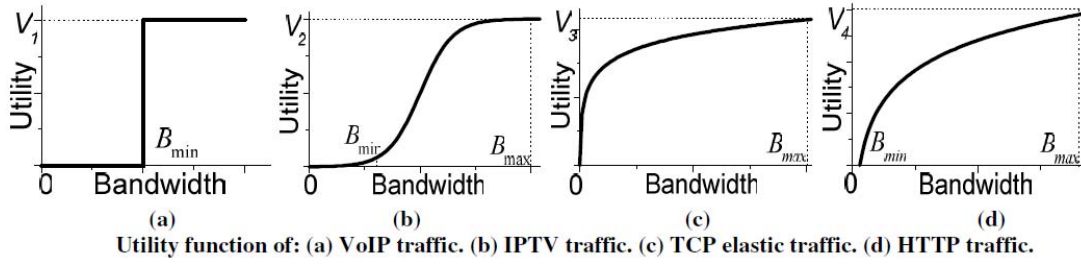


圖 2-15 不同服務類型之效用函數圖 [28]

本論文採用其中的三種服務類型之效用函數，其數學式分別為(2-4)(2-5)(2-6)。

(一) IPTV traffic (YouTube) 之效用函數：

$$u_k^{(IPTV)}(b_1) = V_1 \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) e^{-r_1 b_1}}, \quad 0 \leq b_1 \leq B_{1,max}, \quad (2-4)$$

$$r_1 = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)}{B_{1,max}}, \quad \varepsilon = 10^{-3},$$

其中 $u_k^{(IPTV)}(b_1)$ 代表第 k 個 session 在 IPTV traffic 所得到的滿意度， V_1 為使用 IPTV traffic 所能得到之滿意度最大值， b_1 為該 session 所分得之頻寬大小， $B_{1,max}$ 為欲達到 IPTV traffic 滿意度最大值所需之頻寬。

(二) TCP traffic (FTP) 之效用函數：

$$u_k^{(TCP)}(b_2) = V_2 \frac{\log(b_2 + 1)}{\log(B_{2,max} + 1)}, \quad 0 \leq b_2 \leq B_{2,max}, \quad (2-5)$$

其中 $u_k^{(TCP)}(b_2)$ 代表第 k 個 session 在 TCP traffic 所得到的滿意度， V_2 為使用 TCP traffic 所能得到之滿意度最大值， b_2 為該 session 所分得之頻寬大小， $B_{2,max}$ 為欲達到 TCP traffic 滿意度最大值所需之頻寬。

(三) HTTP traffic 之效用函數：

$$u_k^{(HTTP)}(b_3) = V_3 \frac{\log\left(\frac{b_3}{B_{3,min}}\right) \operatorname{sgn}(b_3 - B_{3,min}) + 1}{\log\left(\frac{B_{3,max}}{B_{3,min}}\right) \cdot 2}, \quad 0 \leq b_3 \leq B_{3,max} \quad (2-6)$$

其中 $u_k^{(HTTP)}(b_3)$ 代表第 k 個 session 在 HTTP traffic 所得到的滿意度， V_3 為使用 HTTP traffic 所能得到之滿意度最大值， b_3 為該 session 所分得之頻寬大小， $B_{3,min}$ 為使用

HTTP traffic 之最小頻寬需求， $B_{3,max}$ 為欲達到 HTTP traffic 滿意度最大值所需之頻寬。

(2-4)(2-5)(2-6)式之中的參數，本論文亦採用[28]之建議，整理於表 2-8。

表 2-8 效用函數之參數設定值[28]

中文參數名稱	參數	設定值	單位
IPTV 服務之滿意度最大值	V_1	1	無
TCP 服務之滿意度最大值	V_2	1	無
HTTP 服務之滿意度最大值	V_3	1	無
欲達到 IPTV 服務最大滿意度所需之頻寬	$B_{1,max}$	10	Mbps
欲達到 TCP 服務最大滿意度所需之頻寬	$B_{2,max}$	10	Mbps
欲達到 HTTP 服務最大滿意度所需之頻寬	$B_{3,max}$	10	Mbps
使用 HTTP 服務之最小頻寬需求	$B_{3,min}$	24	kbps

除此之外，就常理而言，當使用者的連線請求被拒絕(Blocking)抑或服務被中斷(Dropping)時，均會對系統感到不滿意。而[28]並未將此效應納入考量，因此本論文亦參考[29]的方法，在 Blocking 與 Dropping 發生時的不滿意度，視為負的滿意度，且其值均定為最大滿意度之 20%，如(2-7)(2-8)(2-9) 式所示：

$$u_{k,Blocking}^{(IPTV)} = -20\% \cdot u_k^{(IPTV)}(B_{1,max}) \cong -0.2 \cdot V_1, \quad (2-7)$$

$$u_{k,Blocking}^{(TCP)} = -20\% \cdot u_k^{(TCP)}(B_{2,max}) = -0.2 \cdot V_2, \quad (2-8)$$

$$u_{k,Blocking}^{(HTTP)} = -20\% \cdot u_k^{(HTTP)}(B_{3,max}) = -0.2 \cdot V_3, \quad (2-9)$$

惟須注意在本論文之中，效用值的計算並非用來幫助系統即時性的決策，而是使用在模擬系統行為後之事後分析，藉此判斷架構的調整與演算法的使用對使用者之影響。因此，套用效用函數的分析結果，將會於第四章討論之。

第三章 混合式寬頻接取網路模型與演算法

本章將詳述我們提出之嶄新混合式寬頻接取網路省電機制，以及與其相關之演算法，為本篇論文核心內容。首先，在 3.1 節我們會介紹本論文提出之架構，而從 3.2 到 3.4 節則是與其相應之演算法，最後在 3.5 節會分析本架構在未來之可行性。

3.1 現行接取網路架構之修改與假設

在第二章之中，已介紹了數種常見的寬頻接取網路。然而現今不同接取網路之間彼此獨立運作，無法達到如同在第一章描述之容量互相支援的目的，因此在架構上必須有所調整。新提出之架構與其元件將於以下各小節逐一介紹。

3.1.1 省電之混合接取網路架構

由於理想中不同接取網路之流量能互相支援與現行架構差異太大，因此本論文共提出兩種省電架構：「過渡型省電架構」與「全無線省電架構」。前者為過渡時期適用之省電架構，對使用者而言改變最小；而後者則是全無線時代適用之架構，省電效率較佳。

(一) 過渡型省電架構：

本架構如圖 3-1 所示。

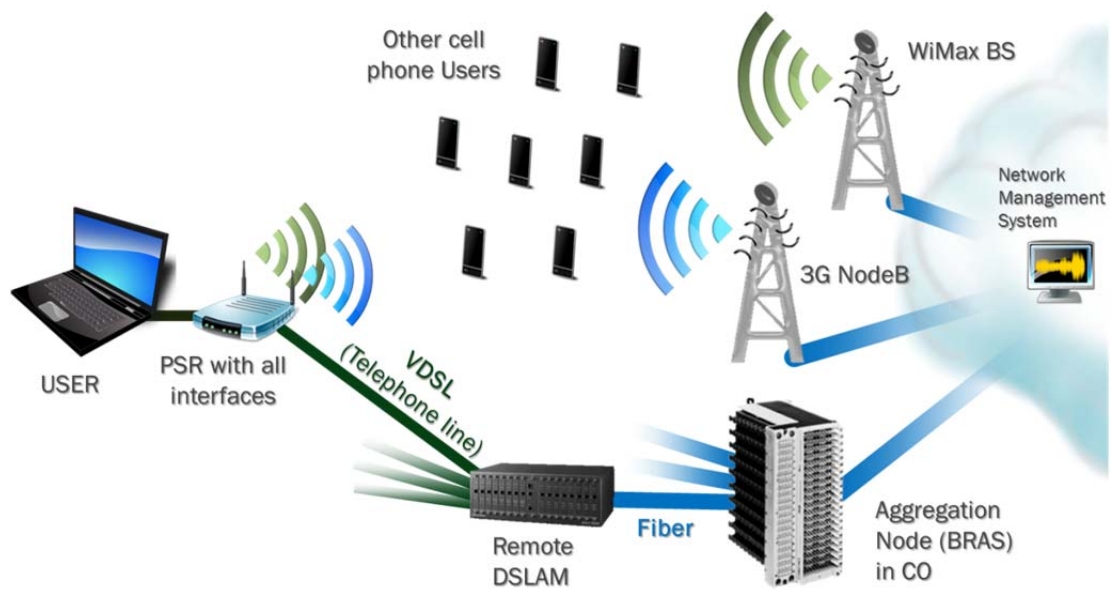


圖 3-1 過渡型省電架構示意圖

本架構與現行接取網路架構最大之不同處，即是在使用者與接取網路之間多增加了一台具有多種網路介面卡(Network Interface Card, NIC)的 PSR (全名為 Power Saving Router, 其細部功能介紹可參考 3.1.2 小節), 以方便將使用者的封包導向不同接取網路技術, 進而達成在低流量時段關閉有線接取網路同時使用者依然可連上網路之目的。這種做法之缺點為它必須在系統之中增加額外的設備, 對於整體省電的成效必然形成限制。

(二) 全無線省電架構：

本架構如圖 3-2 所示。

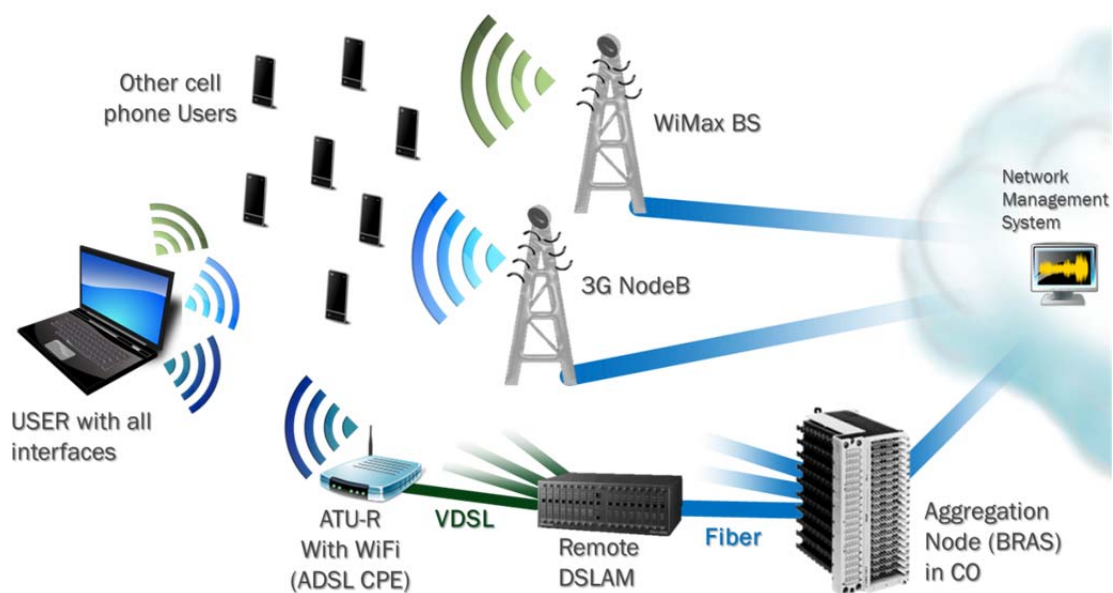


圖 3-2 全無線省電架構示意圖

近年來，隨著智慧型手機以及平板電腦的快速普及，越來越多 ISP 業者免費幫 ADSL 使用者家中之 ATU-R 加裝 WiFi 功能，以期紓解日益壅塞的 3G 無線網路。這現象無形中加速了接取網路無線化以及物件連網之進程。假如，未來的接取網路已演變為全無線環境，而個人連網裝置則是以筆電、平板電腦為主，其硬體已然內建多種無線接取技術之介面卡(NIC)。在這情境底下的省電接取架構即可再大大的簡化至如圖 3-2。此時已不需增加額外的路由器裝置，而原過渡型省電架構之 PSR 與相關演算法也可輕易的整合至使用者裝置，大大降低系統整體電力消耗。

3.1.2 省電決策路由器(Power Saving Router)

省電決策路由器(Power Saving Router，以下簡稱 PSR)，是本篇論文提出的一種新的使用者裝置，其目的是為了要將有線接取網路的流量導引至無線接取網路的基地台。PSR 具有多種網路介面卡(NIC)，除了可以取代有線接取網路的使用者裝置(CPE)連上網際網路，還能利用其內部的天線連接上無線接取網路的基地台。

而使用者並不需要知道後端各式各樣複雜的連網技術，只需要使用隨插隨用的區域網路技術即可連接上網際網路，是一個方便使用者上網的小型裝置。類似的觀念首見於 2002 年提出的 Personal Router[30]，直到 2009 年，美國的 Novatel Wireless 公司將其商品化並取名為 MiFi[31]，現今在歐美以及日本的行動業者已經推出許多商務型 MiFi 的方案。然而 PSR 與現行 Personal Router 的功能並不完全相同，Personal Router 主要的訴求是便利使用者，而 PSR 的目的則是利用其優點再加上主動導引網路封包流量的方式去節省有線接取網路的耗電量。

除此之外，PSR 為了要達成連接上多個接取網路以導引流量之目的，PSR 的設計必須要能做到同時使用多個 NIC 並且各自傳送不同的封包，也就是 PSR 為多重主目錄(Multihoming)裝置，與現行類似裝置有些許差異。

而之所以要在使用者端增加新裝置的理由，乃是因為網路上的伺服器會根據使用者送來的連線請求回傳資料，目的地即是連線請求者的 IP 位置。也就是說，要將有線接取網路上的流量轉移至無線接取網路，必須要在使用者端就先將連線請求改傳至無線接取網路，伺服器回傳的資料也才會從無線接取網路送回給使用者。如果不增加新的裝置，要達到導引流量的目的即須大幅修改多個既有的網路通訊協定，相較之下工程將會十分浩大。

3.1.3 網管中心

網管中心(Network Management and Operation Center)中的網管系統(Network Management System，在此簡稱為 NMS)，是專門用來蒐集並統整所屬網路的現況，ISP 業者為了能掌控其網路服務的可靠度與穩定度，網管中心是不可或缺的。然而本篇論文的網管中心與傳統的網管中心稍有不同，多了下列新功能：

1. PSR 為了要做到網路封包的導引與決策，必須要得到一些接取網路狀態的資訊，而這部分的資訊無法單靠使用者裝置取得，必須要依賴網管中心的統整與廣播，

因此網管中心還需要擁有對所屬 PSR 廣播的能力。

2. 在流量較低的深夜時段將有線接取網路的設備關閉是本篇論文提出的省電手段，因此網管中心須具備遠端關閉相關裝置的能力。等到白天網路流量回升時，網管中心也要能將已關閉的裝置從遠端開啟。其可行性將於 3.5 節探討。
3. 網管中心必須要能掌握受其管轄的所有基地台與所有 DSLAM 的涵蓋區域，才有能力事先估計當關閉特定 DSLAM 之後，被 PSR 轉送到無線接取網路的封包對於附近基地台的影響。其估計方式詳見 3.4 節。

3.1.4 網路架構之簡化與假設

為了降低省電節能分析時的複雜度，在本論文後續內容之中，上述架構尚需套用下列合理的簡化假設：

1. 一般而言，因接取網路的使用者大多不是扮演伺服器(Servers)角色，故網路尖峰時段的塞車絕大部分會發生在下行頻寬。有鑑於此，本論文於後續分析時，會預設上行頻寬充足，而演算法與模擬則只考慮下行通道，參數定義亦同。
2. 無線通道的品質瞬息萬變，通常會採用雷里衰減(Rayleigh Fading)來近似其現象。然而在本論文提出的省電架構中，由於演算法決策的時間長通常為數十秒至數百秒，且基地台與 PSR 均未移動，在此情境之下已然具有足夠長之時間將無線通道品質視為定值，而不會對模擬結果產生巨大影響。基於上述理由，本論文選擇將無線接取網路之基地台頻寬定為常數。
3. 在直觀上，一個裝置的耗電量會因封包流量的上升而增加。然而實際量測的結果顯示，現行網路設備該效應並不顯著，甚至在滿載時的耗電量也只比閒置時微增大約 2% [32]。因此在本論文中，從基地台到 PSR 到 NIC，所有裝置的耗電功率只要開啟就視其為定值，且與負載程度無關。同時各裝置的耗電功率估計參考[33]的研究，整理於表 3-1。

表 3-1 混合式接取網路各裝置耗電功率[33]

裝置類型	耗電功率
3G CPE	2 W
WiMAX CPE	5 W
ADSL CPE	10 W
Remote DSLAM (16-port)	47 W
Monolithic DSLAM (1008-port)	1,700 W

然而在圖 3-1 的架構當中，並不具有獨立的無線接取網路 CPE。相關的 NIC 均已整合進 PSR 之中；此時 PSR 的耗電估計可參考兼具 CDMA, WiMAX 以及 WiFi 802.11 b/g/n 三者功能之現有產品 Novatel MiFi 4082，其耗電功率只有 1.23W（續航力 4.5 小時、電池容量 1500mAh、額定電壓 3.7V）[34]，再加上 ADSL CPE 的功率為 10W，合理估計該 PSR 的耗電功率為 12W，並且簡單假設其中 3G NIC 占 1W、WiMAX NIC 占 3W、ADSL NIC 占 3W，而剩餘的 PSR 晶片組則占 5W。

至於圖 3-2 的架構，由於相關介面均已全部整合進使用者連網裝置之中，架構中已無 PSR 的存在，故在此時可將其耗能視為 0W，最為省電。

3.2 PSR 開關 NIC 決策演算法

在本節之中將會詳述 PSR 在做決策時的演算法，使用到的參數整理於表 3-2，完整參數列表可參考附錄一。本演算法定為每隔 $T_{PSR_check_NIC}$ 的時間執行一次，且不同 PSR 之間彼此獨立運作，不互相干擾。演算法執行時，會依序執行三大步驟，分別為：「開啟 NIC 演算法」(Turn-on-NIC Algorithm)、「關閉 NIC 演算法」(Turn-off-NIC Algorithm)以及「設定 NIC 路由順位演算法」(Set-NIC-priority Algorithm)，如圖 3-3 所示。

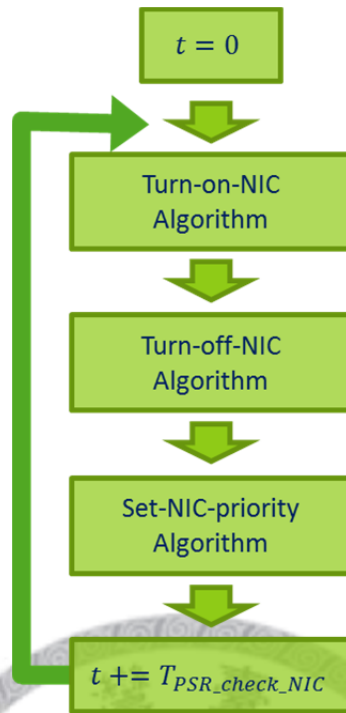


圖 3-3 PSR 開關 NIC 決策演算法簡易流程圖

表 3-2 PSR 開關 NIC 決策演算法參數表

參數名稱	參數意義
K	總共的接取網路種類
k	表示接取網路的種類, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 且 $k = 1$ 代表 ADSL
M_k	接取網路 k 總共的基地台個數 (DSLAM 也視為基地台)
m	基地台編號, 且根據 k 的不同 $m \in \{1, 2, \dots, M_k\}$
N	PS Router 總數
n	PS Router 編號, 且 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$
$C_{k,m}^{BS}$	在接取網路 k 底下第 m 個基地台的容量
$F_{k,m}^{BS}(t)$	在時間 t 時, 接取網路 k 底下第 m 個基地台的流量
$C_{k,n}^{NIC}$	PSR n 連往接取網路 k 的 NIC 最大頻寬
$F_{k,n}^{NIC}(t)$	在時間 t 時, PSR n 連往接取網路 k 的 NIC 流量
$T_{PSR_check_NIC}$	PSR 檢查 NIC 流量並做出決策的週期
P_k^{NIC}	連上接取網路 k 的 NIC 在 Active 時的耗電功率
$G_n, Priority_List$	PSR n 用來記錄 Routing Priority 的參數
O_k	接取網路 k 對該 PSR 之 Routing Priority
$\alpha_{Max_blocking_prob}$	PSR n 可接受之最大 Blocking Probability
l_{k,NIC_OFF}	紀錄連往接取網路 k 的 NIC 符合開關係條件之次數
$L_{NIC_tolerance}$	NIC 符合開關係條件之次數最大值

(一) 「開啟 NIC 演算法」(Turn-on-NIC Algorithm):

本演算法有兩大重點，其一是尋找適合開啟新 NIC 的時機，其二則是應該開啟通往哪一個接取網路的 NIC。前者我們選擇使用 Blocking Probability 來判斷:若在 $T_{PSR_check_NIC}$ 時間內 PSR 之 Blocking Probability 超過可接受的最大值 $\alpha_{Max_blocking_prob}$ ，則須開啟新的 NIC 以期紓解 PSR 之壅塞。至於 Blocking 的判斷會在 3.4 與 3.5 節之中詳述。而後者的判斷標準則是「電功率效率」(以 $Power_Efficiency$ 表示)，其定義如(3-1)所示。

$$Power_Efficiency = \frac{\text{可使用頻寬(} Available_Bandwidth \text{)}}{\text{網卡耗電功率}} = \frac{C_{k,m}^{BS} - F_{k,m}^{BS}(t)}{P_k^{NIC}}. \quad (3-1)$$

其中基地台的頻寬($C_{k,m}^{BS}$)與基地台的流量($F_{k,m}^{BS}(t)$)，NMS 每隔固定時間即會廣播給所屬所有 PSR。而網卡耗電功率(P_k^{NIC})在此為定值，故可視為已知。

而當 PSR 決定要開啟新 NIC 時，會選擇從目前已關閉的 NIC 之中挑選 $Power_Efficiency$ 預計將會最高的 NIC 來開啟，以確保未來在傳輸使用者流量時，能以最少的電功率完成，藉此省去系統部分耗電。完整的演算法如圖 3-4 所示。

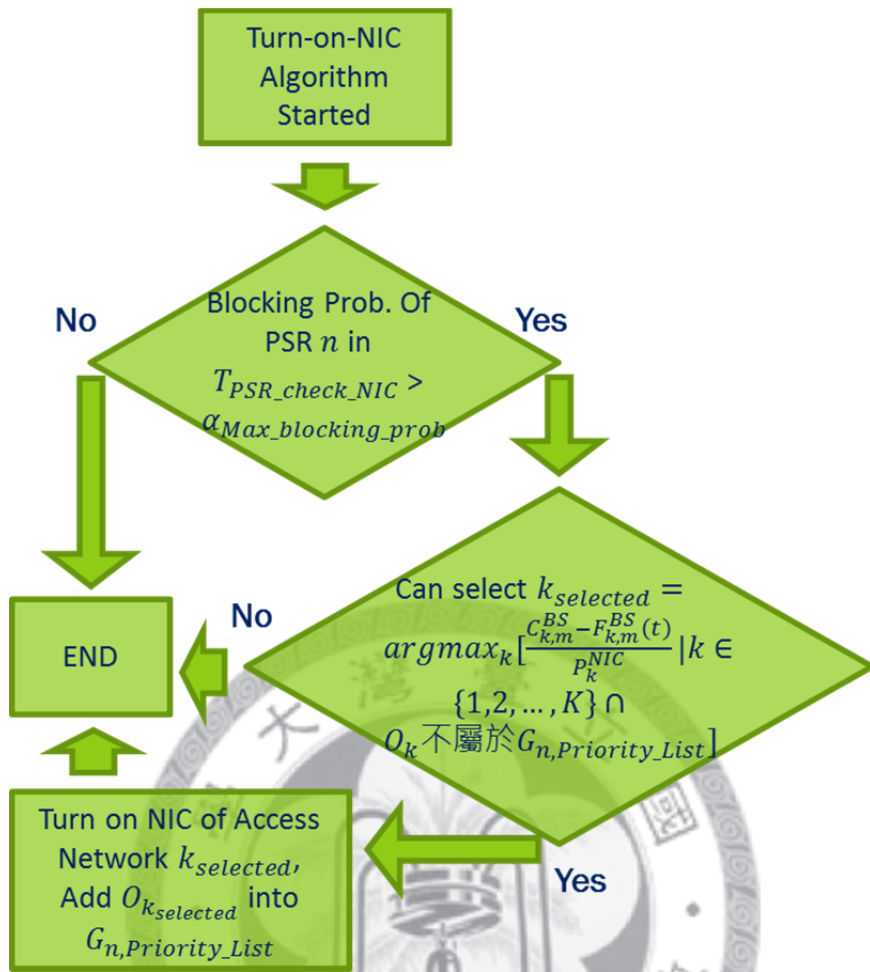


圖 3-4 PSR 開關 NIC 決策演算法—開啟 NIC 演算法 流程圖

在圖 3-4 演算法中， $G_{n, Priority_List} \subset \{O_1, O_2, \dots, O_K\}$ 為一集合，負責紀錄各個已開啟 NIC 之路由優先順位(Routing Priority 即 O_k)，該參數由各個 PSR 自行維護，細節可參考 3.3 節。

(二) 「關閉 NIC 演算法」(Turn-off-NIC Algorithm)：

在本演算法之中，PSR 決定要關閉 NIC 的條件很簡單，即是連續 $L_{NIC_tolerance}$ 次該 NIC 流量均為 0 即可關閉，意即該 NIC 已閒置超過 $L_{NIC_tolerance} \cdot T_{PSR_check_NIC}$ 的時間。因此將其關閉並不會造成任何使用者連線中斷，算是十分寬鬆的關閉條件。完整的流程圖可參考圖 3-5。

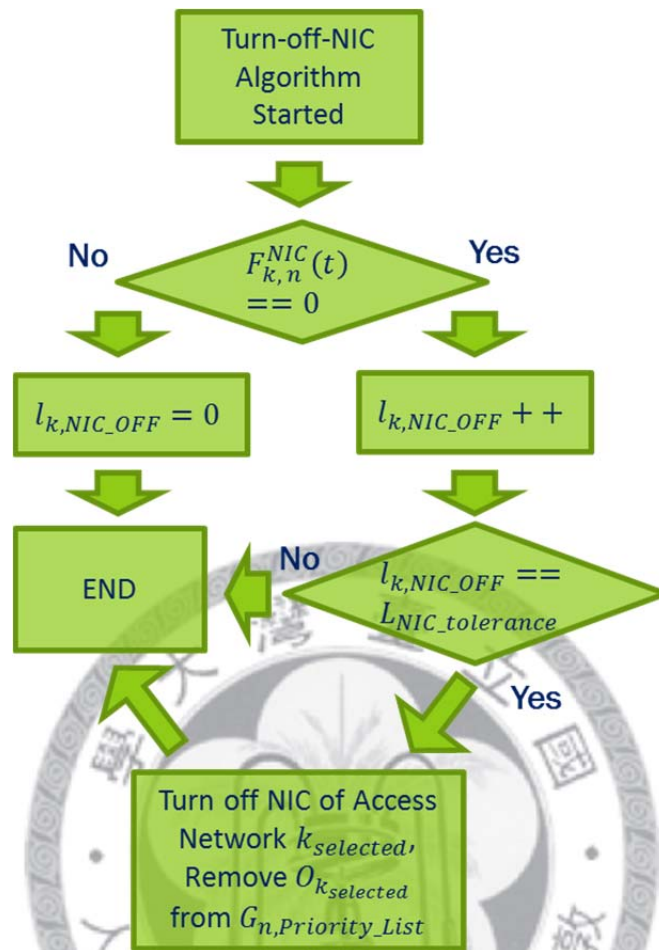


圖 3-5 PSR 關閉 NIC 決策演算法—關閉 NIC 演算法 流程圖

唯需注意在本部分演算法之中，PSR 必須針對每個接取網路的 NIC 都執行一次，符合流量為 0 的次數則記錄在 l_{k,NIC_OFF} ，而當 NIC 被關閉時也需要維護 PSR 的 $G_{n,Priority_List}$ 值。

(三) 「設定 NIC 路由順位演算法」(Set-NIC-priority Algorithm):

本演算法的目的是維護 PSR 的 $G_{n,Priority_List}$ ，方便 PSR 在收到使用者要求連線的封包時，能直接查表即可得知應該將封包送往哪一個接取網路。而重設 $G_{n,Priority_List}$ 的方式也是使用 $Power_Efficiency$ 作為指標。在已開啟的 NIC 之中若其 $Power_Efficiency$ 越高，即將其 O_k 設的越小，使的該 NIC 在 3.3 節路由演

算法時有較前面的順位(higher priority)被選取。而因為有線接取網路(ADSL)的穩定度較高，而且將封包改送到無線接取網路可以算是有線向無線「借用」頻寬，因此有線接取網路在本演算法之中視為例外，只要它開啟就是必然的第一順位，意即 $O_1 \equiv 1$ 。(k = 1 代表 ADSL)

然而這裡提到的 *Power_Efficiency* 與本節第(一)部分提到的稍有不同，主要是此時需要計算 *Power_Efficiency* 的 NIC 均已開啟，除了基地台的容量與流量之外，NIC 本身的流量及 NIC 與基地台之間通道的品質也須納入考量。因此，此時的可使用頻寬(以 *Available_Bandwidth* 表示)則可如(3-2)所示。

$$Available_Bandwidth = \min \left[\left(C_{k,m}^{BS} - F_{k,m}^{BS}(t) + F_{k,n}^{NIC}(t) \right), \left(C_{k,n}^{NIC} \right) \right], \quad (3-2)$$

而在計算 *Available_Bandwidth* 時，其目的是找出該 NIC 於基地台之中能使用的頻寬，因此除了將基地台總頻寬減去基地台流量，尚須加回該 NIC 的流量，才能算是中肯的表示該 NIC 能在基地台取得的最大資源。否則當 NIC 貢獻越多流量時，會覺得其基地台越沒價值，反而 PSR 又將流量送往另一個接取網路，這並非是本演算法之初衷。除此之外，將 NIC 流量納入考量，也可以使不同 PSR 感受到不同的 *Available_Bandwidth*，也才不會在同一時間做出相同的決策，進而將特定基地台塞爆。簡而言之，加回 NIC 流量計算 *Available_Bandwidth* 可說是一舉數得。

同時，*Available_Bandwidth* 的計算亦應考量 NIC 與基地台之間的通道品質，即使基地台的可使用頻寬很充裕，也有可能因為通道狀況不佳而無法充分使用，故須選擇較小的值視為 *Available_Bandwidth*。然而在本論文的架構當中，因為假設通道狀況為定值故可忽略此效應。

Power_Efficiency 的定義與本節第(一)部分提到的相同，即為 *Available_Bandwidth* 除以裝置耗電功率，故此時 *Power_Efficiency* 應如(3-3)所示。

$$Power_Efficiency = \frac{Available_Bandwidth}{網卡耗電功率}$$

$$= \frac{\min \left[\left(C_{k,m}^{BS} - F_{k,m}^{BS}(t) + F_{k,n}^{NIC}(t) \right), \left(C_{k,n}^{NIC} \right) \right]}{P_k^{NIC}}$$

(3-3)

綜上所述，完整的設定 NIC 路由順位演算法如圖 3-6 所示。

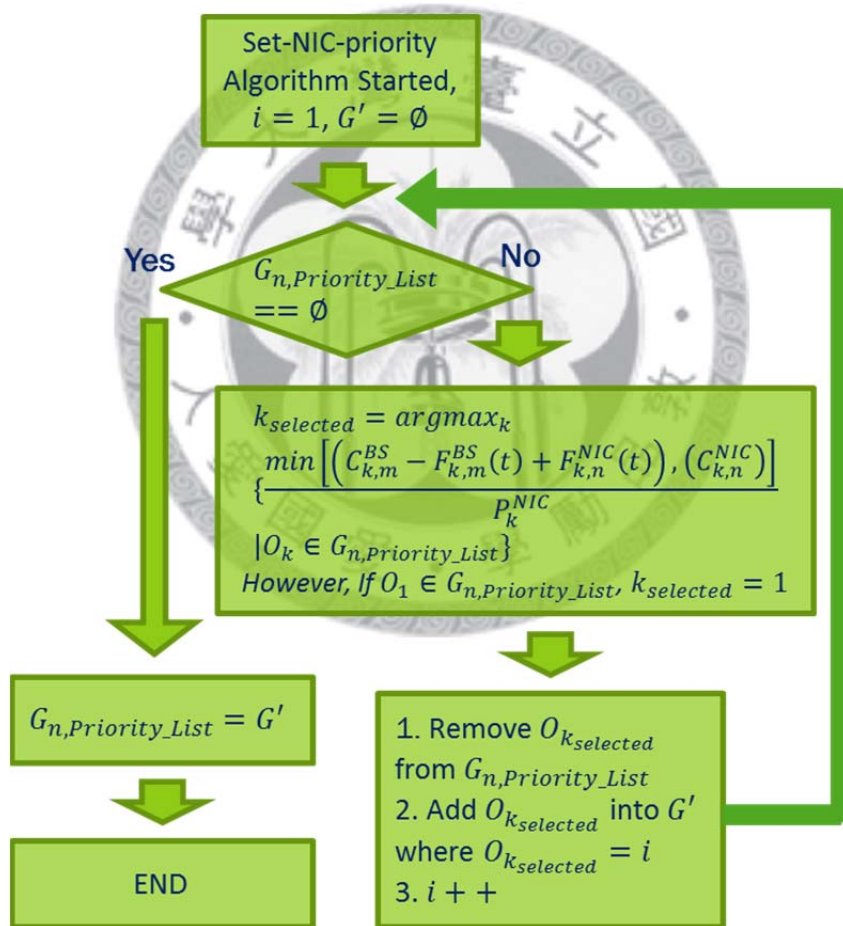


圖 3-6 PSR 開關 NIC 決策演算法—設定 NIC 路由順位演算法 流程圖

3.3 PSR 封包路由演算法

本節演算法可以算是 3.2 節的延伸，只是執行的時機不同。3.2 節的「PSR 開關 NIC 決策演算法」是固定每隔 $T_{PSR_check_NIC}$ 執行一次，然而此時的「PSR 封包路由演算法」則是在 PSR 每收到一個新的連線請求封包(Request Packet)即須執行一次。

由於本演算法被 PSR 執行的頻度較高，因此不宜太過複雜。主要是對照在 3.2 節建立之路由順位表($G_{n,Priority_List}$)，並且避免將 Request Packet 送往頻寬不足的接取網路，十分簡易。使用到的參數整理於表 3-3，完整參數列表可參考附錄一。演算法流程圖詳見圖 3-7。

表 3-3 PSR 封包路由演算法參數表

參數名稱	參數意義
K	總共的接取網路種類
k	表示接取網路的種類， $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 且 $k = 1$ 代表 ADSL
M_k	接取網路 k 總共的基地台個數 (DSLAM 也視為基地台)
m	基地台編號，且根據 k 的不同 $m \in \{1, 2, \dots, M_k\}$
N	PS Router 總數
n	PS Router 編號，且 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$
$C_{k,m}^{BS}$	在接取網路 k 底下第 m 個基地台的容量
$F_{k,m}^{BS}(t)$	在時間 t 時，接取網路 k 底下第 m 個基地台的流量
$G_{n,Priority_List}$	PSR n 用來記錄 Routing Priority 的參數
O_k	接取網路 k 對該 PSR 之 Routing Priority
i	PSR 送出的 session 之類型，且 $i \in \{HTTP, FTP, YouTube\}$
j	PSR 送出的 session 之編號
$B_{n,i,j}^{Required_BW}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session 所需最低頻寬
$B_{n,i,j}^{Server_Max_BW}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session 最高下載速率
$B_{n,i,j}^{Session_Size}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session size

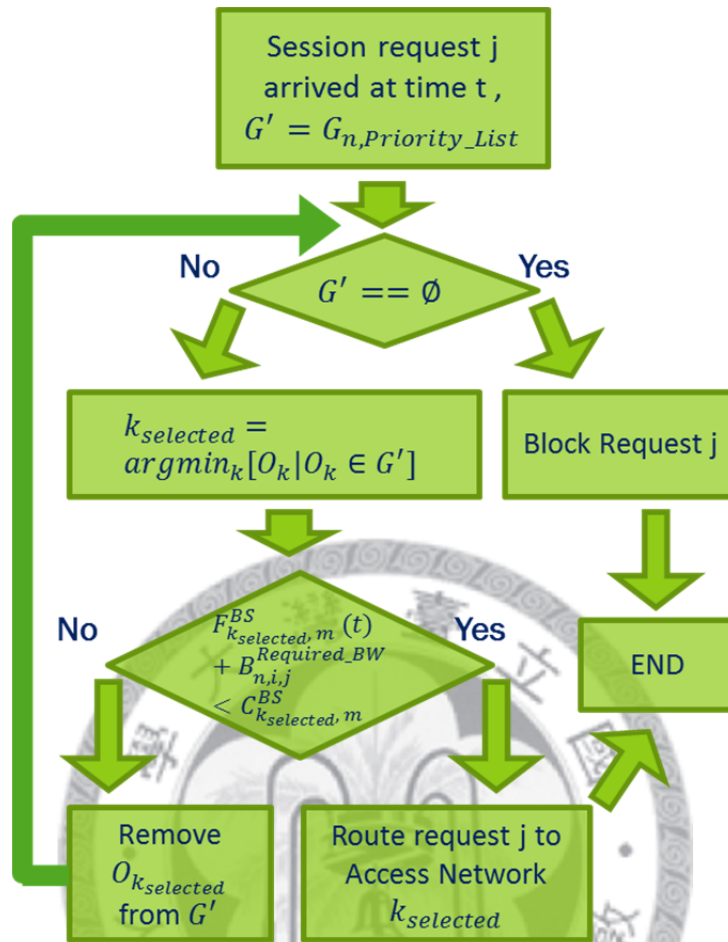


圖 3-7 PSR 封包路由演算法 流程圖

在圖 3-7 演算法中， $B_{n, i, j}^{Required_BW}$ 代表該 Request Packet 所代表之 session 所需最低頻寬， n 為 PSR 編號， i 代表 session 類型，由第二章所述可得知 $i \in \{HTTP, FTP, YouTube\}$ ，而 j 則代表 session 編號。由於本論文假設 PSR 收到 Request Packet 時能分析得知該 session 所屬類型，因此可推算出每個 Session 之最低頻寬需求，綜合考量第二章效用函數之設定值，在此假設 HTTP 與 FTP 的最低需求頻寬為 24Kbps，而 YouTube 所需之最低頻寬為 100Kbps，若接取網路剩餘頻寬無法滿足其最低需求，只好再檢查下一個順位之接取網路，所有可連接之接取網路均無法滿足其需求時，PSR 便會主動地將 Request Packet 捨棄並且記錄 Blocking。

假使在實務上辨識 session 類型窒礙難行時，亦可不論 session 類型均使用相同的最低需求頻寬去選擇接取網路，所有接取網路都不滿足時也無須將其 Blocked，在應用層或使用者會自行切斷連線。故此時只須紀錄低於最低需求頻寬的 session 並回報給 3.2 節第(一)部分演算法，使其有辦法判斷開啟新 NIC 的時機即可。

3.4 NMS 開關 DSLAM 決策演算法

3.2 與 3.3 節提到的演算法均執行在 PSR 之中，然而本節的「NMS 開關 DSLAM 決策演算法」卻是由網管中心(NMS)來執行。由於兩者的計算能力具有顯著差異，因此本演算法會稍微複雜一些。同時，也因為本演算法關閉的對象是耗電功率動輒數十瓦至數千瓦的 DSLAM，故省下的電力消耗將十分可觀，效益遠勝於關閉 PSR 的 NICs。

本演算法定為每隔 $T_{NMS_check_BS}$ 才執行一次，而內容又可分為兩大部分：第(一)部分是用來判斷開關 DSLAM 的時機以及對向；第(二)部分則是歷史流量資訊的應用，主要是用來輔助第(一)部分的決策。使用到的參數整理於表 3-4，完整參數列表可參考附錄一。

表 3-4 NMS 開關 DSLAM 決策演算法參數表

參數名稱	參數意義
K	總共的接取網路種類
k	表示接取網路的種類, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 且 $k = 1$ 代表 ADSL
M_k	接取網路 k 總共的基地台個數 (DSLAM 也視為基地台)
m	基地台編號, 且根據 k 的不同 $m \in \{1, 2, \dots, M_k\}$
$T_{NMS_check_BS}$	NMS 檢查基地台流量並做出決策的週期
α_{BS_flow}	在計算基地台 EWMA 流量時用到的 ratio
$\hat{F}_{k, m}^{BS}(t)$	在時間 t 時, 接取網路 k 底下第 m 個基地台經過 EWMA 後的流量
$D_{k, m}^{BS}$	在接取網路 k 底下第 m 個基地台的涵蓋區域
S	將 1 天 24 小時切成 S 份統計歷史流量資訊
s	時段編號, 且 $s \in \{1, 2, \dots, S\}$
U	記錄的歷史流量資訊總天數
u	天數編號, 且 $u \in \{1, 2, \dots, U\}$
$F_s^{total_PSR}(u)$	代表 u 天前在 s 時段所有 PSR 送出的流量的平均
$\mu_{s, total_PSR_flow}$	在 1 日當中時段 s 時, PSR 送出的總流量 U 天平均值
$\sigma_{s, total_PSR_flow}$	在 1 日當中時段 s 時, PSR 送出的總流量 U 天標準差
$F^{total_PSR}(s)$	在時段 s 時, 所有 PSR 的平均流量總和
$V_{flow_pattern}$	標記現在的流量有無落在可接受區間, 且 $V_{flow_pattern} \in \{Normal, Abnormal\}$
$\gamma_{acceptance}$	$\{Normal\}$ 代表流量落在歷史平均加減 $\gamma_{acceptance}$ 倍標準差
L_{loose_bound}	在不嚴格執行時, 符合開關 DSLAM 演算法之最高次數
L_{strict_bound}	在嚴格執行時, 符合開關 DSLAM 演算法之最高次數
$l_{k, m, ON}$	NMS 用來紀錄特定基地台符合開啟 DSLAM 演算法之次數
$l_{m, OFF}$	NMS 用來紀錄 DSLAM m 符合關閉 DSLAM 演算法之次數
G_{closed_DSLAM}	NMS 用來紀錄已關閉 DSLAM 之集合, 且 $G_{closed_DSLAM} \subset \{1, \dots, M_1\}$
$\beta_{BS_flow_high}$	當 $\frac{\hat{F}_{k, m}^{BS}(t)}{C_{k, m}^{BS}} > \beta_{BS_flow_high}$ 時, 開啟新 DSLAM
$\beta_{BS_flow_low}$	若該 DSLAM 關閉後仍可使各基地台滿足 $\frac{\hat{F}_{k, m}^{BS}(t)}{C_{k, m}^{BS}} < \beta_{BS_flow_low}$, 則關閉之

(一) 開關 DSLAM 時機:

首先，若是 NMS 發現有一無線基地台的使用率已超過可接受的上限，亦即 $\frac{\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)}{C_{k,m}^{BS}} > \beta_{BS_flow_high}$ 時，即將 $l_{k,m,ON}$ 值加 1，而若 $l_{k,m,ON}$ 大於設定的上限值（由歷史紀錄與流量趨勢決定），即可開啟任意一個在同區域已關閉的 DSLAM 來減緩該基地台負荷。其中 $\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)$ 代表 $F_{k,m}^{BS}(t)$ 經過 Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) 進行平均之後的流量趨勢值，如(3-4)所示。

$$\hat{F}_{k,m}^{BS}(t) = \alpha_{BS_flow} \cdot \hat{F}_{k,m}^{BS}(t - T_{NMS_check_BS}) + (1 - \alpha_{BS_flow}) \cdot F_{k,m}^{BS}(t). \quad (3-4)$$

採用 EWMA 的理由和 TCP protocol 在計算 Time out 時的理由相同，都是為了要在忽高忽低變化極大的數值之中，能夠即時的找出其趨勢。而 α_{BS_flow} 值則通常介於 0.7 至 0.9 之間。簡單的說，若是基地台的流量連續多次超過容許的上限，即應開啟有線接取網路疏導流量。

接下來就是關閉 DSLAM 時機的判斷。此時須先找出流量最低的 DSLAM $m_{selected}$ ，因為將其關閉對使用者而言影響將會最小，同時轉送到無線基地台的流量亦會最少。選擇 DSLAM 的數學式如(3-5)所示。

$$m_{selected} = argmin_m \left(\hat{F}_{1,m}^{BS}(t) \right), \quad (3-5)$$

下一個步驟是估計 DSLAM $m_{selected}$ 關閉之後，改流入無線接取網路的交通流對於無線基地台的影響。由於基地台因關閉 DSLAM 而增加的流量有可能會導致上述開啟 DSLAM 演算法的執行，故在關閉 DSLAM 前應先估計預計會流入各個基地台的流量，以避免 DSLAM 被關閉後隨即又被開啟。

在這裡我們採用簡易的方式估計，就直觀上而言，一基地台和待關閉之 DSLAM 的涵蓋範圍交集面積與該基地台分到的流量成正比，例如：甲基地台涵蓋範圍與待關閉 DSLAM 涵蓋範圍的交集面積是 $40000m^2$ ，而乙基地台與丙基地台均為 $20000m^2$ ，在 PSR 的分布是均勻的情況下，合理預估待關閉 DSLAM 現有流量的 $1/2$ 在 DSLAM 被關閉後將會流入甲基地台， $1/4$ 流入乙基地台，而 $1/4$ 流入丙基地台。

而不同接取網路分到的流量則因為 PSR 在路由時會考量 *Power_Efficiency* 的緣故，會和 NIC 耗電成正比。例如：接取網路 A 的基地台其剩餘容量 (*Available_Bandwidth*) 為 10Mbps，而接取網路 B 基地台的剩餘容量為 5Mbps，同時 PSR 連網接取網路 A 的 NIC 耗電量為 2W，接取網路 B 為 1W，若是此時將一個現有流量 9Mbps 的 DSLAM 關閉，雖然會瞬間造成無線基地台的流量不規則的竄升，但在穩態時接取網路 A 的基地台與接取網路 B 的基地台其對於 PSR 的 *Power_Efficiency* 都是一樣的，意即接取網路 A 的基地台多增加了 6Mbps 剩餘容量為 4Mbps；接取網路 B 的基地台多增加了 3Mbps 剩餘容量為 2Mbps (*Power_Efficiency* 均為 2 Mbps/W)。由此可看出，在 DSLAM 關閉後各接取網路增加的流量正比於 NIC 的耗電功率。

綜合這兩項觀察，可得出接取網路 k 所屬之基地台 m 在 DSLAM $m_{selected}$ 關閉之後分得的流量將會和 $area(D_{1, m_{selected}}^{BS} \cap D_{k, m}^{BS}) \cdot P_k^{NIC}$ 成正比，其中 $D_{k, m}^{BS}$ 代表基地台涵蓋區域，而 $area(.)$ 則代表取其面積值。在 NMS 知道所有的 DSLAM 與基地台之涵蓋範圍時，一 DSLAM 關閉後預計會流入附近基地台之流量即可輕易得知。而若各基地台加上預計流入的流量之後，使用率依然不會超過 $\beta_{BS_flow_low}$ (此值小於 $\beta_{BS_flow_high}$)，則可將 $l_{m_{selected}, OFF}$ 值加 1，代表符合關閉的條件多 1 次，上述之關閉條件亦可由 (3-6) 表示。

For $\forall k \in \{2, 3, \dots, K\}, m \in \{1, 2, \dots, M^k\}$

$$\hat{F}_{k,m}^{BS}(t) + \frac{\text{area}(D_{1,m_{\text{selected}}}^{BS} \cap D_{k,m}^{BS}) \cdot P_k^{NIC}}{\sum_{k'=2}^K \sum_{m'=1}^{M^{k'}} [\text{area}(D_{1,m_{\text{selected}}}^{BS} \cap D_{k',m'}^{BS}) \cdot P_{k'}^{NIC}]} \cdot \hat{F}_{1,m_{\text{selected}}}^{BS}(t) < \beta_{BS_flow_low} \cdot C_{k,m}^{BS} \quad (3-6)$$

而若 $l_{m_{\text{selected}},OFF}$ 已累加大於設定的上限值 (由歷史紀錄與流量趨勢決定), DSLAM m_{selected} 即可關閉。完整的流程圖如圖 3-8 所示。

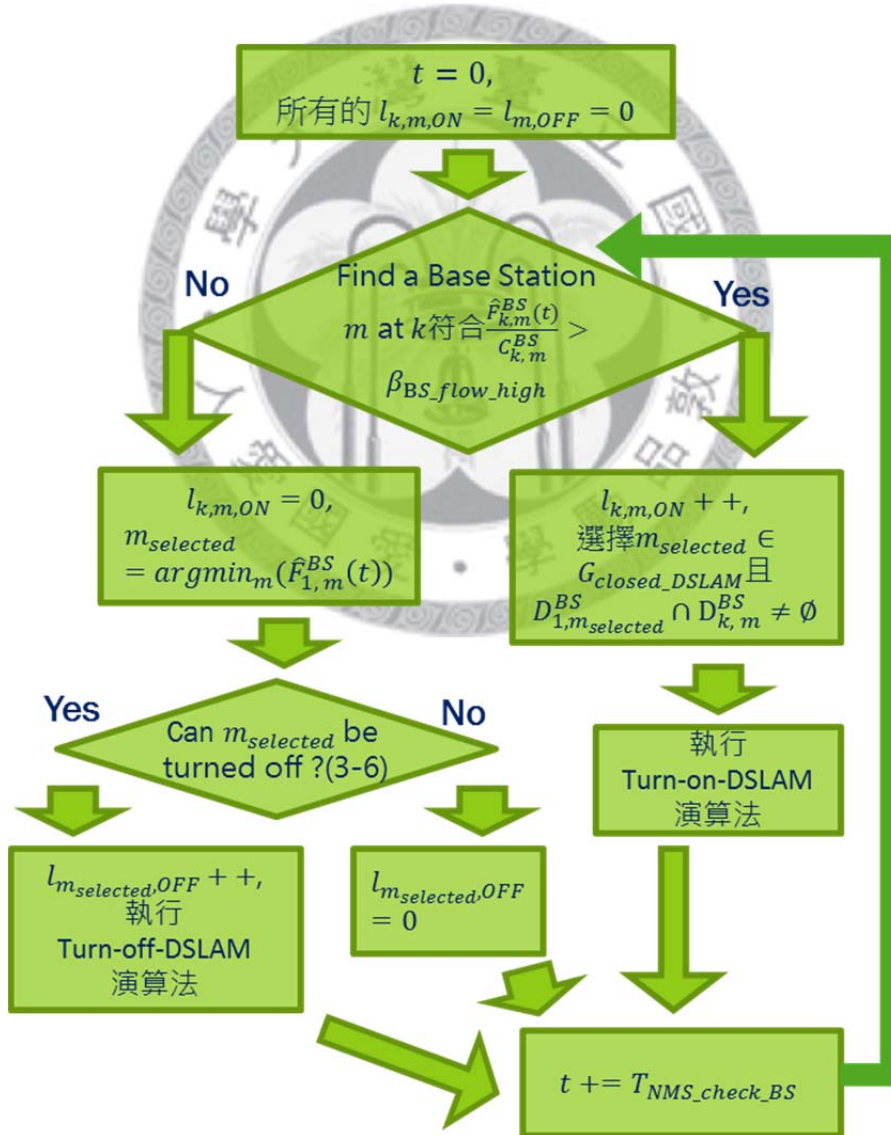


圖 3-8 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—開關 DSLAM 時機 流程圖

至於 $l_{k,m,ON}$ 與 $l_{m_{selected},OFF}$ 上限值的設定，與第(二)部分 $V_{flow_pattern}$ 的值有關，若現在 PSR 的總流量被認定為符合歷史趨勢（即 $V_{flow_pattern}$ 為 $\{Normal\}$ ），而歷史流量有逐漸上升的趨勢，意即 $\mu_{s+1, total_PSR_flow} - \mu_{s, total_PSR_flow} > 0$ 則 DSLAM 為了減緩無線基地台的負荷，應較容易被開啟，只要 $l_{k,m,ON} > L_{loose_bound}$ 即可。同理，此時關閉 DSLAM 的門檻應設較高，為 $l_{m_{selected},OFF} > L_{strict_bound}$ ；反之，在歷史流量的趨勢為下降時，開關門檻的鬆緊程度即對調，讓關閉 DSLAM 較容易，同時開啟較困難。

但是在 $V_{flow_pattern} = \{Abnormal\}$ 時，因歷史流量趨勢的高低已不具有參考價值，故此時不論是開啟或關閉 DSLAM 的門檻均一視同仁的設定為 $\frac{1}{2} \cdot (L_{strict_bound} + L_{loose_bound})$ 。完整的流程圖如圖 3-9 與 3-10 所示。

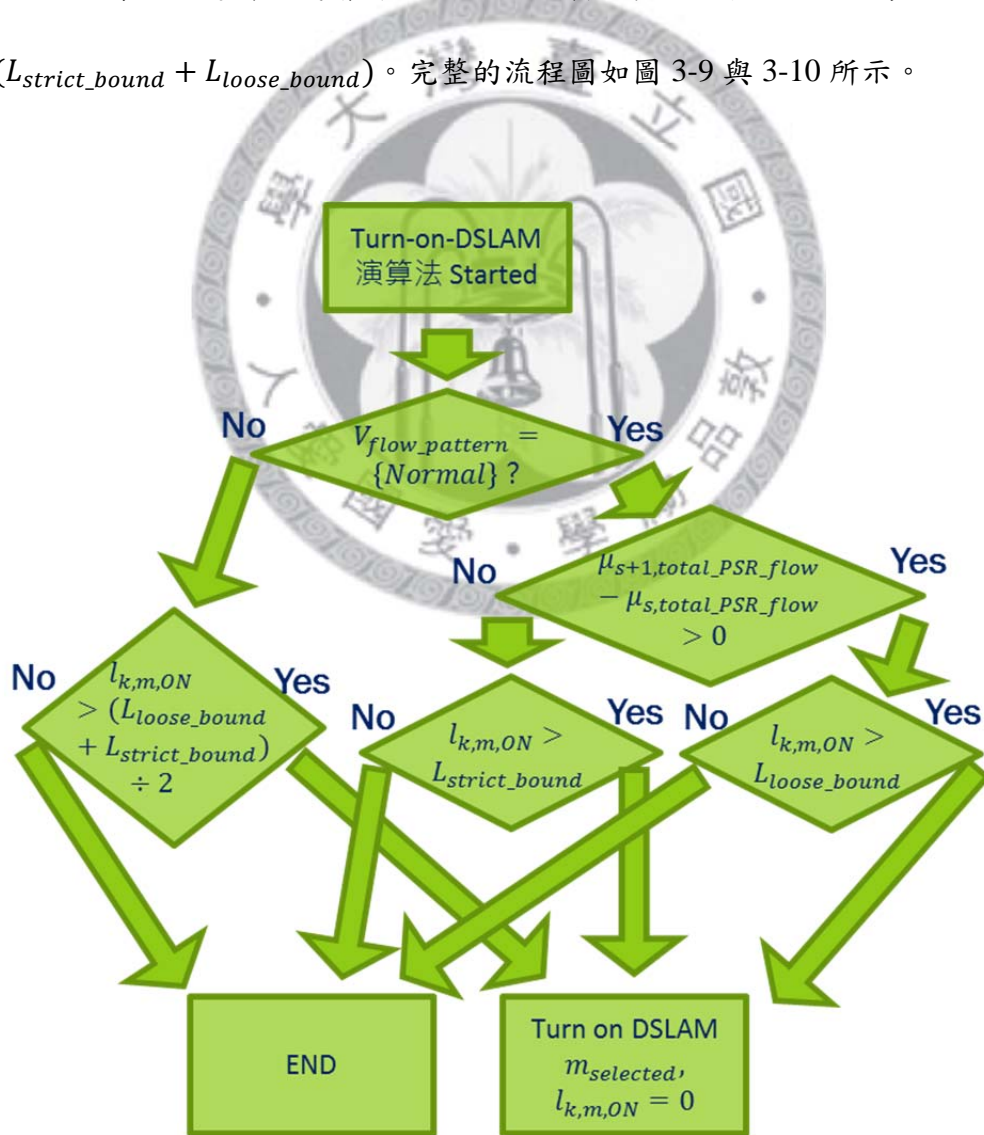


圖 3-9 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—Turn-on-DSLAM 演算法 流程圖

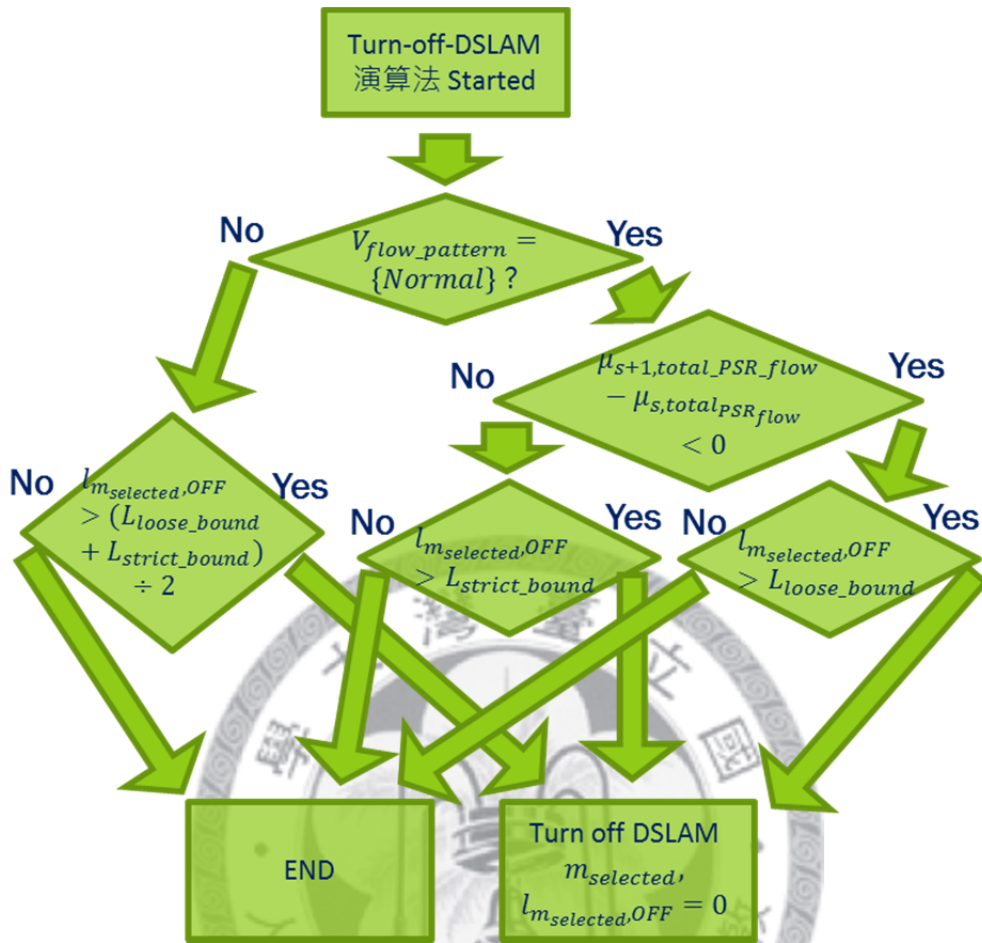


圖 3-10 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—Turn-off-DSLAM 演算法 流程圖

(二) 歷史流量資訊的應用：

為了使開關 DSLAM 時不至於因為流量的震盪而造成誤判，了解整體流量趨勢是十分重要的。假如已經知道將來的流量趨勢是持續上升，那麼開啟 DSLAM 將流量導引回有線接取網路就應該給予較低的門檻，同理此時亦不太適合繼續關閉 DSLAM 故執行的門檻較高。然而未來實則無法預料，只能參考過去的流量趨勢來推測，好在網路流量與人的作息密切相關，也具有周期為一天，一星期或一年的特性，鑑古知今的做法在這裡有很高的可信度。

我們選擇忽略其他的週期性，只考慮變化最劇烈的一日周期，並將一天分為 S

個時段來討論，故本部分演算法每隔 $\frac{24 \text{ 小時}}{S}$ 才需要執行一次。

每次執行時都需要先取得各個 PSR 在上個時段的平均流量，對於一般網管系統而言，使用 Simple Network Management Protocol (SNMP) 即可取得該資訊。當得到所有 PSR 流量之加總後 ($F^{total_PSR}(s-1)$)，即可將此值與過去 U 天該時段的歷史流量之平均值 ($\mu_{s-1, total_PSR_flow}$) 與標準差 ($\sigma_{s-1, total_PSR_flow}$) 做比較，若是其值落入 $\gamma_{acceptance}$ 倍標準差之間，如(3-7)式所示，則將此時段視為符合趨勢的時段，即 $V_{flow_pattern} = \{Normal\}$ 。

$$\left| F^{total_PSR}(s-1) - \mu_{s-1, total_PSR_flow} \right| < \gamma_{acceptance} \cdot \sigma_{s-1, total_PSR_flow} \quad (3-7)$$

反之若是其值位在 $\gamma_{acceptance}$ 倍標準差之外，則視該時段為 $\{Abnormal\}$ ，意即之後的流量趨勢不適合使用歷史資訊推斷。而 $V_{flow_pattern}$ 的用處可參考本節第(一)部分。詳細的流程圖如圖 3-11 所示。



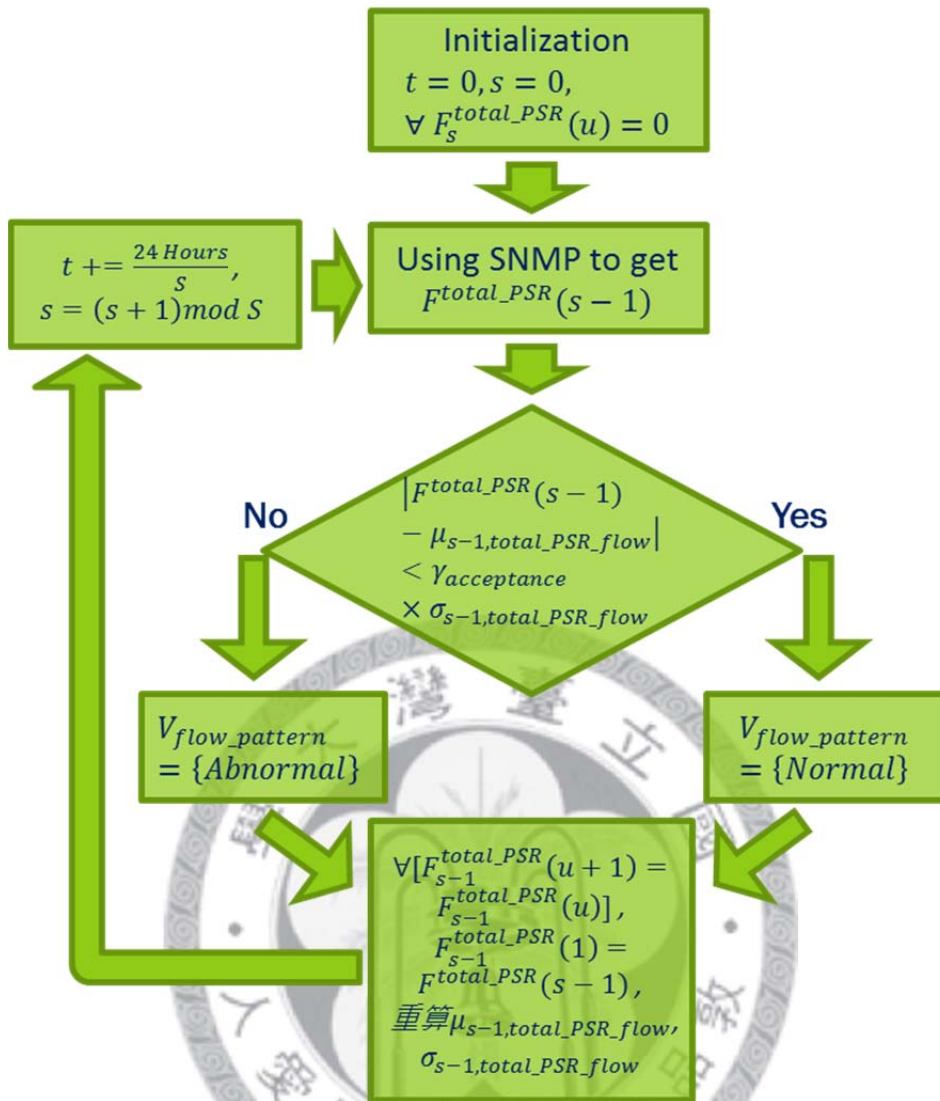


圖 3-11 NMS 開關 DSLAM 決策演算法—歷史流量資訊的應用 流程圖

然而，使用歷史資訊並非是必然的選擇，在流量的週期不明顯的區域或已知流量會異常的時段，亦可跳過本部分演算法，只需要將 $V_{flow_pattern}$ 永遠設為 $\{Abnormal\}$ 即可，在本節第(一)部分開關 DSLAM 時，便會採取相同嚴格的門檻來判斷。這麼做勢必會增加 Blocking Prob.與延緩開關 DSLAM 的反應時間，但其對結果並非影響甚鉅。

3.5 實作可行性探討

在本論文提出的架構之中，所有的省電皆是來自於網路設備的關閉，例如 PSR 可關閉自己的 NICs，而 NMS 可關閉所屬的 DSLAMs。同時在必要時亦可將已關閉的設備喚醒。PSR 關閉網路介面卡(NIC)的技術其實十分常見，許多市面上的智慧型手機都已可輕易的經由軟體設定不同 NIC 的開關，故在此並無太複雜的技術難度。

至於遠端開關 DSLAM 在直觀上看似並不容易，因為它牽涉到硬體對相關指令的支援，也和網路安全的議題息息相關。但在實務上而言，一個完整的商用網路管理軟體為了要在緊急狀況發生時及時調度備援的設備，都具有遠端開啟與遠端關閉裝置的功能。相關的遠端喚醒技術甚至在大眾的個人電腦上也早已成為必備功能，稱為網路喚醒 (Wake-on-LAN, WoL)，已關機的個人電腦在收到特定格式的魔術封包 (Magic Packet) 後，即會自行開啟[35]。基於上述理由，NMS 為了省電而遙控 DSLAMs 的開關在現今亦無太複雜的技術難度。

除此之外，在 3.2 節提到的 *Available Bandwidth* 需要知道基地台的使用率與無線通道的品質。前者並不困難，只要在安裝 PSR 時有向 NMS 註冊即可對其廣播相關資訊，而後者雖然在模擬時因為演算法執行的間隔極長，都將其頻寬視為定值，但是實際通道的性質則會因為遮蔽物的移動或天氣的變化而改變其統計特性，需要常常重新量測。可採用的解決方式有二種，第一種方式是將 3G 或 WiMAX 協定之中既有的通道量測結果從 NIC 之中擷取出來給 PSR 使用，是較為麻煩但是有效率的方式；而另一種方式則是在 NMS 與 PSR 之間額外加入量測頻寬的機制，例如 PathChar[36]或是 Packet-Pair Method[37]，這種做法較為直覺但是會浪費少許頻寬資源在量測上。兩種做法各有其優缺點，但均不失為可行之解決方式。

最後這部分是一個至關重要但是在討論可行性時常被忽略的議題，也就是商業策略(Business Strategy)，亦即吸引使用者採用新省電架構的方式。

首先是架構上必須先做調整，將原本的 1 台 Remote DSLAM 換成 2 台，一台不具有省電功能而另一台支援省電演算法，同時兩台 DSLAM 依然服務相同區域，畢竟不是所有使用者都會改用新的省電架構，為了避免 DSLAM 在低流量時段被關閉時導致舊方案的使用者斷線，本做法為必要之惡。而接著下來就是資費方案的調整，由於 PSR 位在使用者家中因此轉嫁了部分耗電，故當 ISP 業者採用省電架構之後，根據第四章的模擬結果顯示可省去約達五成的耗電，且依照表 3-1 的裝置耗電數據來估算：一臺 DSLAM 年度節省電費 = $(0.047 \cdot 24 \cdot 365)$ (度/年) · 3 (元/度) · $50\% \cong 620$ (元/年)。同時假設 ISP 業者未來數年後在汰舊換新時將一台 ATU-R 改裝成 PSR 的額外成本為 150 元且每一 DSLAM 支援 16 部 ATU-R，則

$$\text{改裝成本攤還年份} = \frac{150(\text{元}) \cdot 16(\text{ATU-R/DSLAM})}{620(\text{元/年})} \cong 3.9(\text{年})$$

而接下來的年份則可因 DSLAM 的關閉省去不少的電費開銷，足可將多餘的資金用作資費方案的調降與廣告宣傳，藉此吸引更多綠色消費者改用省電架構，可說是一舉數得。當然相關的數據尚須經過精算，但顯然本架構並非學術上之空談，未來寬頻網路耗電隨速度提高而上升後，將極具可施行之潛力。

第四章 模擬結果與比較

本章運用第二章之背景知識結合第三章提出之網路架構與省電演算法，並使用電腦程式模擬系統運作，以期驗證本論文提出之省電架構效用。內容大致可分為四個部分，4.1 節會介紹模擬程式的撰寫方式及模擬環境；4.2 節會使用平均流量與常見情境來設定模擬參數，可視為本論文最重要的結果；而 4.3 節則是 4.2 節的延伸，改由變化多端的每日流量來模擬，反覆驗證 4.2 節的結果；最後在 4.4 節依然使用平均流量模擬，但改為極端情境，藉此測試本架構在不同環境之適應性。

4.1 模擬程式的撰寫與模擬環境

由於本論文在模擬時的重點並非是複雜的數值運算，因此選擇採用 C++ 語言來撰寫，而模擬的結果以副檔名.csv 輸出，最後再使用 Microsoft Office Excel 來繪圖，使用到的程式與版本如表 4-1 所示。

表 4-1 模擬時使用之程式

軟體名稱	版本
Microsoft Windows 7	企業版、64 位元、SP1
Bloodshed Dev-C++	4.9.9.2
Microsoft Office Excel 2010	14.0.6112.5000 (32 位元)

而程式在撰寫時，選擇採用事件導向模擬鐘(Next-Event Time Advance)，意即在程式之中設定多個事件，例如：「封包抵達 PSR」、「封包離開 PSR」或是「封包抵達基地台」……等等。同時每個事件有一專屬的參數紀錄下次會發生該事件的

時間，而程式的核心很簡單，即是尋找下一個即將發生的事件，執行他並根據該事件的特性更新其餘系統參數，一直運作到設定的時間長即可停止（本論文模擬時間長度都設定為 1 天）。而使用這種模擬方式的好處是程式執行較快，且擴充性也較高。

至於亂數(Random Number)的產生則採用線性同餘產生器(Linear Congruential Generator, LCG)，雖然這種做法事實上是假隨機(Pseudorandom)，因為後一個亂數乃是由前一個亂數所決定，但是在起始值相同的情況下比較兩個系統的運作時，反而因此較能客觀分析兩者的不同。該種做法亦被稱為 Common Random Numbers。

同時，在執行模擬程式使用到的硬體環境則如表 4-2 所示。

表 4-2 模擬時使用之硬體

硬體名稱	廠牌型號
CPU	Intel Core i5-2400 3.10GHz
記憶體	Kingston DDR3 1333 4G ×2
主機板	ASUS P8P67 LE
硬碟	WDC WD10EALX-009BA0 1TB

4.2 情境一：使用平均流量與常見情境之模擬結果

4.2.1 參數與環境設定

為了要創建一個合理的常見情境，在這裡使用涵蓋範圍作為估計的參考。假設 3G 和 WiMAX 基地台的涵蓋半徑都是 1 公里，而 DSLAM 因為銅線訊號衰減的緣故，涵蓋半徑設為 200 公尺。則三網的分布關係即可如圖 4-1 所示。

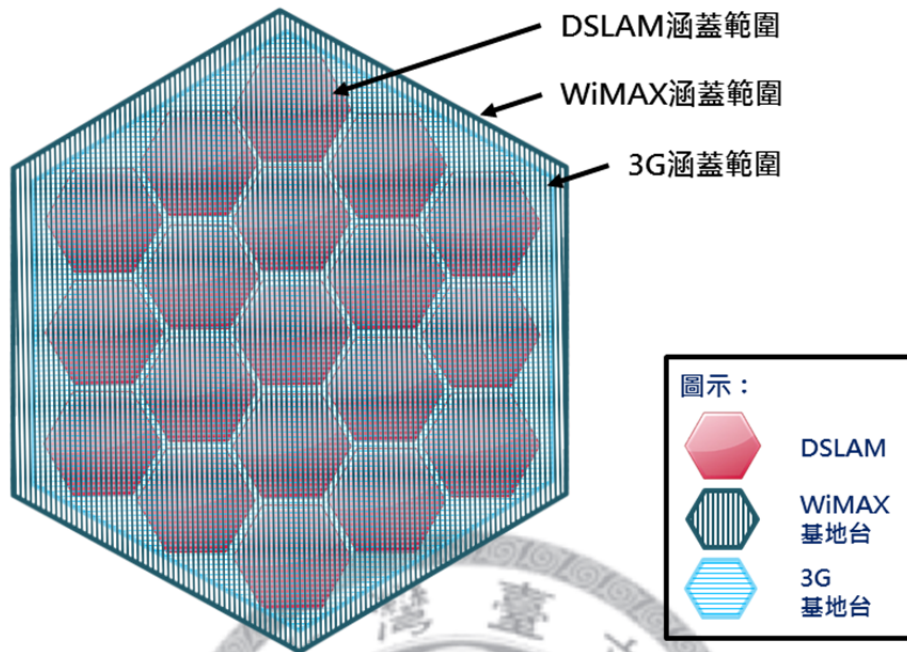


圖 4-1 情境一實驗組，DSLAM、WiMAX 基地台與 3G 基地台分布關係圖

從圖 4-1 可看出，在實驗組的 DSLAM 共有 19 個，WiMAX 基地台與 3G 基地台各一，同時假設 1 個 DSLAM 共有 16 個 port，代表其可連接共 16 個 PSR。因此，在本情境底下共有個 $19 \cdot 16 = 304$ 個 PSR。

而根據第二章的內容假設 WiMAX 基地台由 layer-3 觀測的容量有 70Mbps、3G 基地台由 layer-3 觀測的容量有 22Mbps、DSLAM 由 layer-3 觀測的容量有 50Mbps 且每個 PSR 最大在 layer-3 可使用頻寬均為 12Mbps，意即集縮比(Concentration Rate)在此為 $1: \frac{16 \cdot 12 \text{Mbps}}{50 \text{Mbps}} = 1: 3.84$ 。算是落在常見的合理範圍內。

且每個 PSR 在模擬時均產生「FTP」、「YouTube」與「HTTP」3 種交通流，三者的傳輸速度與檔案大小均依照 2.2 節之建議設定，同時維持三者的流量比為 29.73 : 49.62 : 16.94 [20]，而單一 PSR 總交通流為 non-stationary Poisson Process，其流量大小趨勢與台大 ADSL 平均流量相同(如圖 2-13)。但是在流量最大的時段，所有 PSR 總流量定為 DSLAM 總流量 8 成，並假設後端核心網路均不會發生壅塞。

本情境所有的參數設定詳見表 4-3，完整列表可參考附錄一。

表 4-3 情境一實驗組參數設定值

參數名稱	參數類型	設定值
K	常數	3
M_k	常數	$M_1 = 19$ (將 DSLAM 視為 ADSL 之基地台) $M_2 = M_3 = 1$
N	常數	$19 \cdot 16 = 304$
$C_{k,m}^{BS}$	常數	$C_{1,m}^{BS} = 50\text{Mbps}$, $C_{2,m}^{BS} = 70\text{Mbps}$, $C_{3,m}^{BS} = 22\text{Mbps}$
$C_{k,n}^{NIC}$	常數	$C_{1,n}^{NIC} = 12\text{Mbps}$, $C_{2,n}^{NIC} = 70\text{Mbps}$, $C_{3,n}^{NIC} = 22\text{Mbps}$
$T_{PSR_check_NIC}$	常數	120 秒*
P_k^{NIC}	常數	$P_1^{NIC} = 3W$, $P_2^{NIC} = 3W$, $P_3^{NIC} = 1W$
$\alpha_{Max_blocking_prob}$	常數	0.03*
$L_{NIC_tolerance}$	常數	5*
$B_{n,i,j}^{Required_BW}$	常數	$B_{n,HTTP,j}^{Required_BW} = B_{n,FTP,j}^{Required_BW} = 24\text{Kbps}$, $B_{n,YouTube,j}^{Required_BW} = 100\text{Kbps}$.
$B_{n,i,j}^{Server_Max_BW}$	隨機變數	詳見 2.2 節
$B_{n,i,j}^{Session_Size}$	隨機變數	詳見 2.2 節
$T_{NMS_check_BS}$	常數	30 秒*
α_{BS_flow}	常數	0.7*
$D_{k,m}^{BS}$	平面區域	如圖 4-1
S	常數	48*
U	常數	30 天*
$\gamma_{acceptance}$	常數	2*
L_{loose_bound}	常數	4*
L_{strict_bound}	常數	20*
$\beta_{BS_flow_high}$	常數	0.8*
$\beta_{BS_flow_low}$	常數	0.7*

註:標記*者乃是依據經驗法則選取

在表 4-3 中，為了防止網路流量在不同接取網路之間震盪，部分參數值乃根據經驗法則選取。雖然經試驗後發現流量震盪的現象對整體省電效果影響不大，但會大大降低使用者滿意程度，然而其數值不易由數學求得，故以經驗法則選取之。

而為了要和上述省電架構做比較，在此亦使用對照組模擬。對照組的架構即是現行架構，ADSL、WiMAX 與 3G 之間不存在流量轉送的關係，故可將 WiMAX 與 3G 視為不存在。同時實驗組與對照組兩者均使用相同的亂數種子，以方便模擬結果分析。對照組的基地台分布關係如圖 4-2 所示。

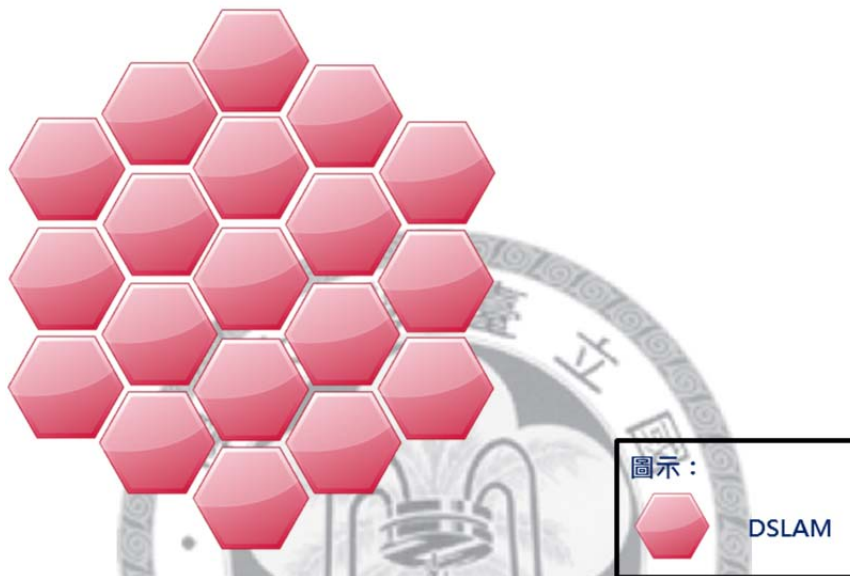


圖 4-2 情境一對照組，DSLAM 分布圖

待模擬結果出來之後，再比較實驗組與對照組之 Blocking Probability、使用者滿意度以及實驗組省電比等等，詳見 4.2.2 節內容。

4.2.2 模擬結果

為了使流量趨勢更加清晰易懂，之後的模擬起始點都設在流量最低的 16:00 而不是 00:00。因此初始值的設定考量到流量特性，對照組除了 ADSL NIC 設為開啟，其餘 NIC 都設為關閉；然而實驗組恰好相反，因模擬啟動時恰巧為整體流量最低的時候，故將 ADSL NIC 設為關閉，其餘無線接取網路的 NIC 都預設為開啟。

(一) PSR 觀點之模擬結果比較：

這部分的模擬結果代表著一般使用者在省電架構(實驗組)和現行架構(對照組)底下所能感受到的差別。理想上使用者的傳輸速度不能下降且 Blocking Probability 不能上升，如此才能維持其滿意度。而由於數據量較大，下列結果大多以圖表方式呈現，並選擇有代表性的 PSR 繪圖。首先，現行架構的模擬結果如圖 4-3 所示。

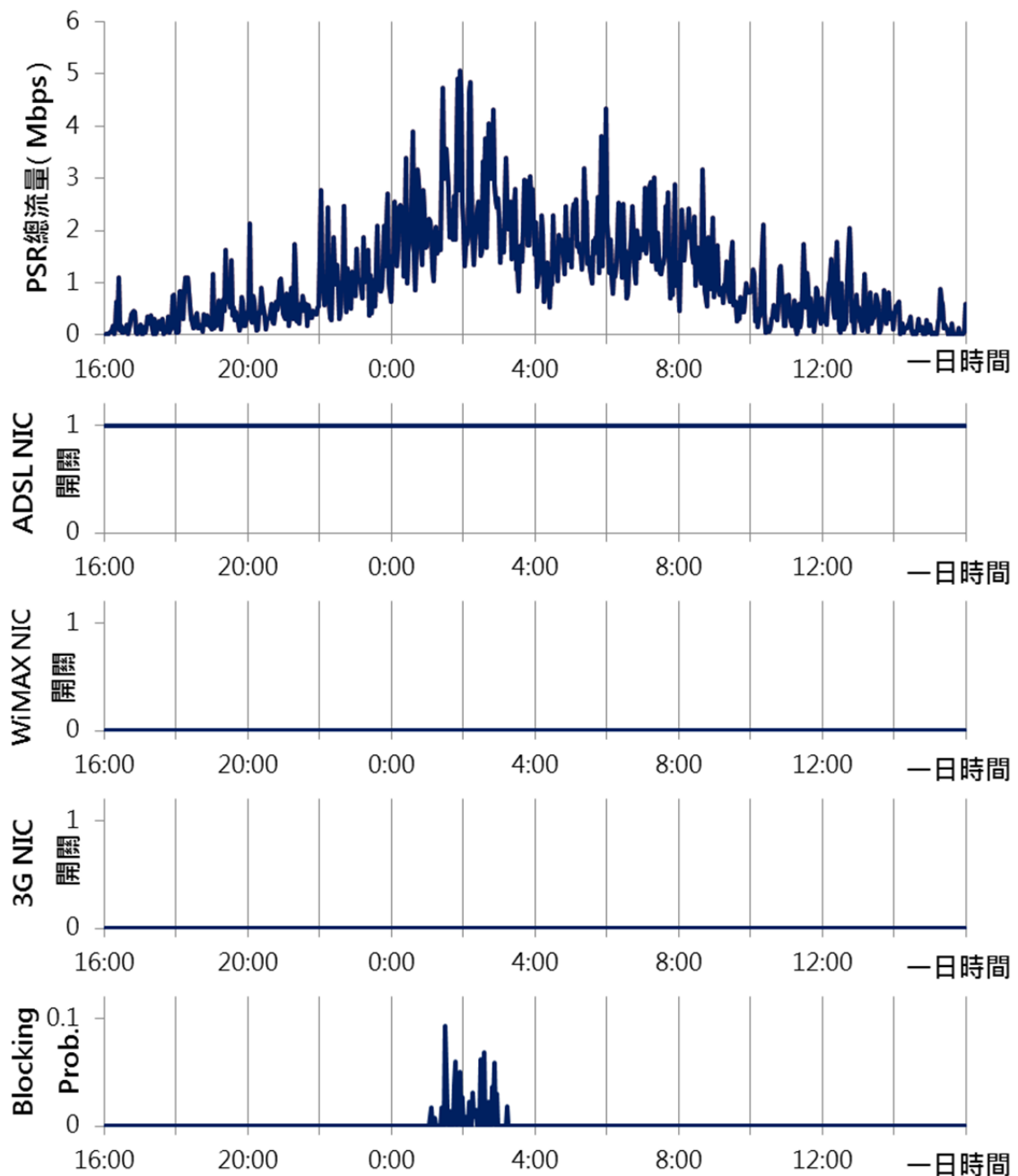


圖 4-3 編號 PSR86 號使用現行架構(對照組)於情境一之模擬結果

其中 NIC 開關為 1 代表開啟；0 代表關閉。而由於現行架構的 PSR 即是 ADSL 的 ATU-R，不具有 WiMAX 與 3G 的網路介面卡(NIC)，因此始終是維持關閉的狀態，流量全數流入 ADSL。圖 4-3 之中較需注意的部分是在 AM1:00~AM3:00 之間由於整體流量較高，造成少部分的 request 被 Blocked，也算是符合一般使用者經驗。

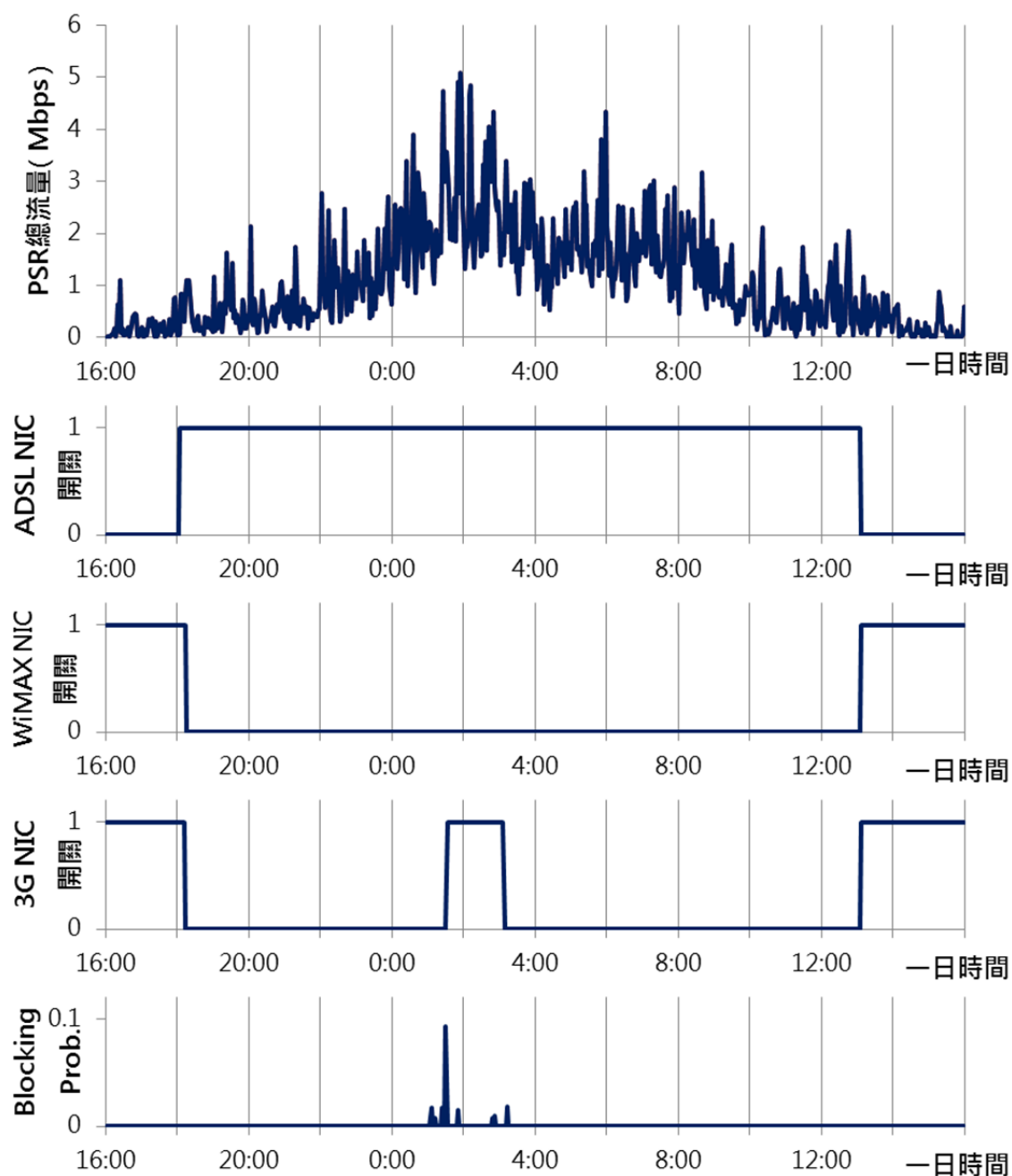


圖 4-4 編號 PSR86 號使用省電架構(實驗組)於情境一之模擬結果

圖 4-4 即是採用省電架構之後，編號 PSR86 號的模擬結果。因為使用相同的亂數種子，和現行架構相比，兩者的流量是相似的。

在此模擬剛啟動時，所有類型的流量因為量不大，都經由無線接取網路傳送，直到 NMS 認為無線基地台超過負荷，命令 DSLAM 開啟(約為 18:00 時)，ADSL NIC 也就隨之開啟。但 PSR86 號的 ADSL NIC 開啟之後沒多久，因所有流量都改從路由順位最高的 ADSL 來傳送，無線網路的 NIC 因為完全沒有流量也就關閉了。

到了半夜 1:00，由於 PSR86 號的流量超過其 ADSL NIC 所能負荷，造成了些許 Blocking，觸發了 3G NIC 的開啟條件，待其被開啟之後，反而減緩了大部分的 Blocking。這部分的好處並非是原先省電架構的初衷。但因為 PSR 多了其他接取網路可連接，大大降低了尖峰時期的 Blocking Probability，使用者的滿意度在採用省電架構之後不降反升，可說是比預期的理想狀況還更加理想了。

等到 13:00 時，因為此時流量已低到 NMS 覺得 DSLAM 可被關閉，便強制將其關閉，連帶的 PSR86 號的 ADSL NIC 也被強制關閉，取而代之的是 WiMAX 與 3G NICs 被開啟。理論上此時會有 ADSL NIC 正在傳送中的連線(Sessions)被強制切斷(Dropping)，本論文亦將其視同 Blocking，造成相同的負值滿意度。然而 PSR86 號在此時恰好沒有流量，因此在圖 4-4 看不出有任何 Blocking 的發生。實際上此時增加的 Blocking 並不高，遠比尖峰時期減少的 Blocking 還少，整體的 Blocking Probability 依舊有改善，從第(二)部分的分析來看會更為清楚。

(二) NMS 觀點之模擬結果比較：

和上一部分不同，這部分是從 NMS 的觀點來看整體模擬結果。因此看重的是流量在不同接取網路之間的分配與 DSLAM 的開啟情形。而從 PSR 的模擬結果可推測此時總體的 Blocking 應會較現行架構低，同時滿意度較高，預期這部分的結果能驗證上述猜想。而最後會依照各個裝置的開啟比例來推測系統省電比。

首先觀察現行架構(對照組)的模擬結果，如圖 4-5 所示。

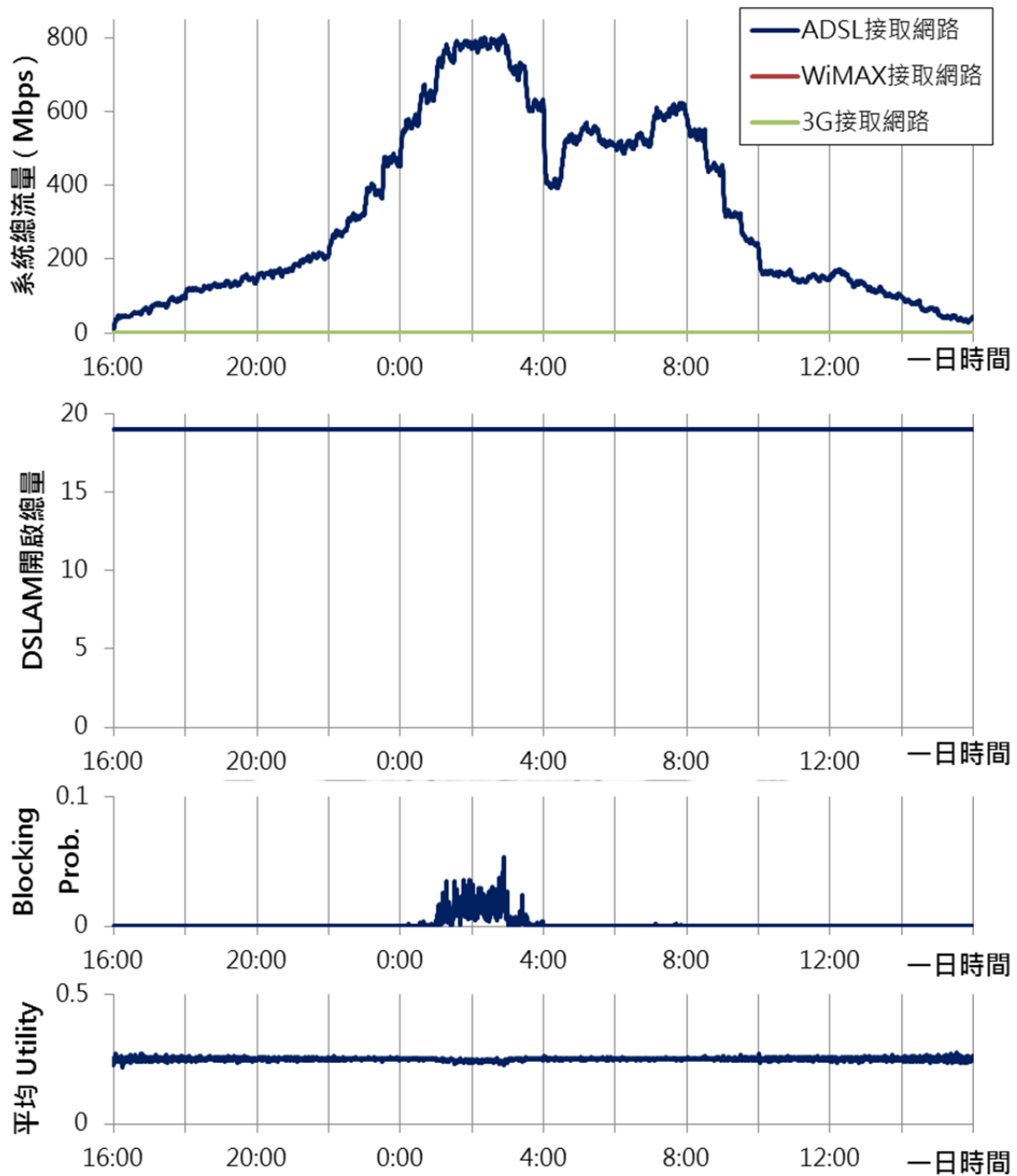


圖 4-5 現行架構(對照組)於情境一之整體模擬結果

從圖 4-5 最上面的「系統總流量」可看出所有 PSR 的流量加總其實並不小，但是 DSLAM 提供的總容量高達 $50\text{Mbps} \cdot 19 = 950\text{Mbps}$ ，因此單獨只有 ADSL 開啟在絕大部分時間都能吸收全部的流量，然而和 PSR 模擬結果類似的是，在尖峰時段有時會有 Blocking 發生，平均的使用者滿意度(Utility)也因此略為下降。

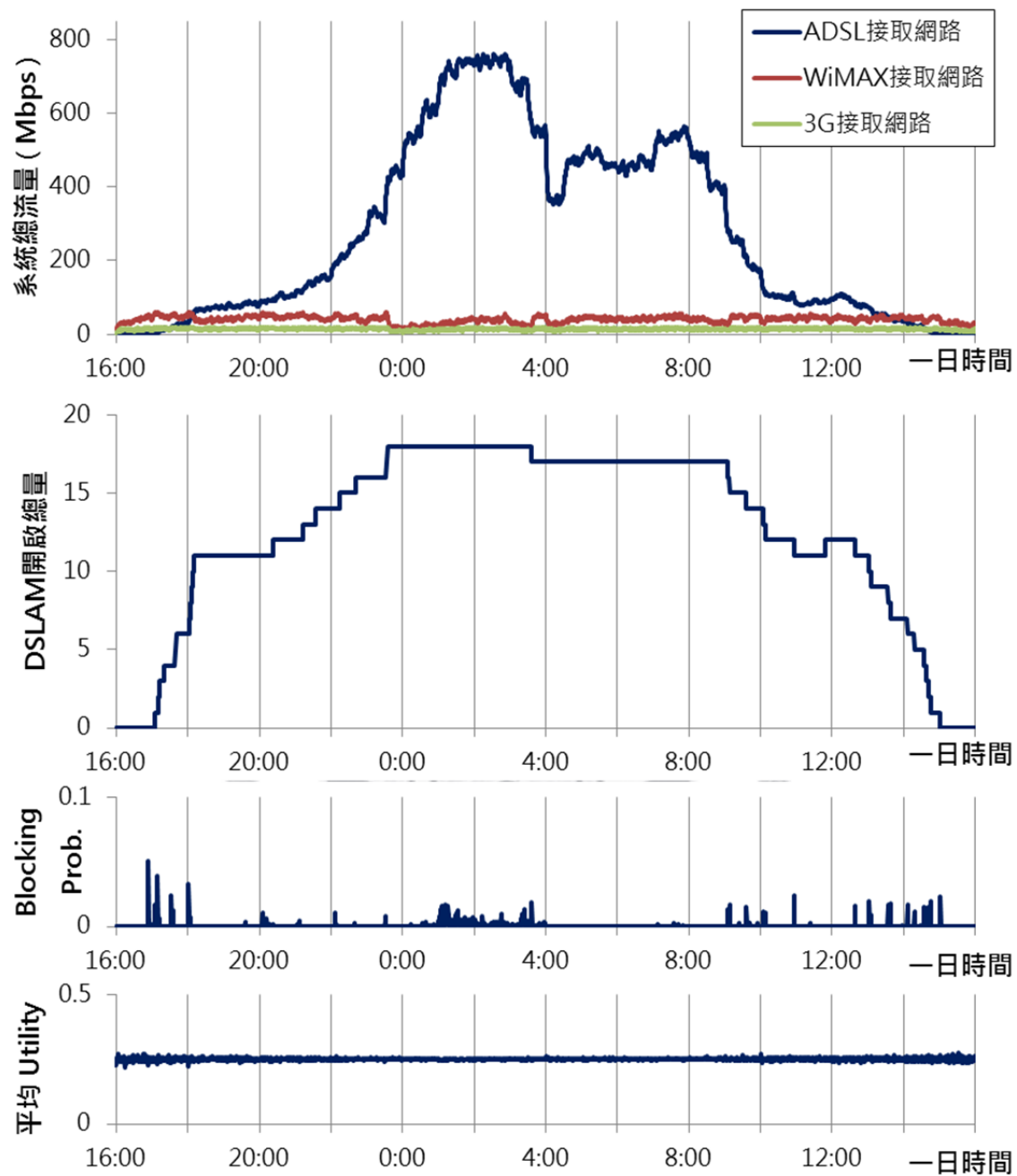


圖 4-6 省電架構(實驗組)於情境一之整體模擬結果

圖 4-6 即是使用省電架構時整體的結果，可以當作本論文最具代表性的結論。從系統總流量與 DSLAM 開啟總量來看，可發現 DSLAM 開關的趨勢基本上和總流量的趨勢是一致的，但由於無線存取網路能吸收的流量有限，顯然 DSLAM 有容易被開啟以及不易被關閉的特性，但平均也有高達 34% 的時間是關閉的，省電

結果還算不差(詳見表 4-4)。

至於 Blocking Prob.的部分，從圖中可看出在流量漸漸上升時，因為無線基地台的容量有限，會發生零星的 Blocking，但在 DSLAM 開啟之後即會緩解。而尖峰時段的 Blocking 和圖 4-5 相比，明顯下降了許多，這和 PSR 部分的模擬結果是一致的。等到整體流量逐漸下降時，又會因為有 DSLAM 的強制關閉造成部分連線被中斷(即為 Dropping 但本論文亦視其為 Blocking)，但比例其實都十分的低。

實驗組與對照組一些關鍵數據的比較如表 4-4 所示。

表 4-4 情境一省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
現行架構 (對照組)	0.33202%	100.000%	0.000%	0.000%	2.9201 · 10 ⁶
省電架構 (實驗組)	0.07300%	65.991%	40.049%	26.722%	2.9338 · 10 ⁶

從上表可看出，在這個情境底下，Blocking Prob.變為原本的1/4，同時整體滿意度上升了大約 0.5%，可算是很出色的結果。

至於省電的比例，在此可使用表 4-4 來推估。假設 DSLAM 的平均開啟比例為 r_{DSLAM} ，WiMAX NIC 的平均開啟比例為 r_{WiMAX} 而 3G NIC 的平均開啟比例為 r_{3G} ，再加上各類裝置的耗電估計值(如表 3-1)，則可計算過渡型省電架構(如圖 3-1)的整體耗電功率，如(4-1)所示。

$$\begin{aligned} \text{過渡型省電架構整體耗電功率} &= 19 \cdot 76W \cdot r_{DSLAM} + 304 \cdot 3W \cdot r_{DSLAM} \\ &+ 304 \cdot 3W \cdot r_{WiMAX} + 304 \cdot 1W \cdot r_{3G} + 304 \cdot 5W. \end{aligned} \quad (4-1)$$

在(4-1)式中，前兩項分別代表「所有 DSLAM 的耗電功率」與「所有 PSR 的 ADSL NIC 總耗電功率」，而接下來分別是「所有 PSR 的 WiMAX NIC 總耗電功率」、「所有 PSR 的 3G NIC 總耗電功率」以及「PSR 除網卡外之基本耗電功率」。但是後 4 項的電費其實是由 ADSL 使用者(Subscriber)負擔，因此過渡型省電架構 ISP 業者耗電功率可化減為(4-2)。

$$\text{過渡型省電架構ISP業者耗電功率} = 19 \cdot 76W \cdot r_{DSLAM}. \quad (4-2)$$

至於全無線省電架構(如圖 3-2)的整體耗電功率則可以(4-3) 表示。

$$\begin{aligned} \text{全無線省電架構整體耗電功率} &= 19 \cdot 76W \cdot r_{DSLAM} + 304 \cdot 3W \cdot r_{DSLAM} \\ &+ 304 \cdot 5W \cdot r_{DSLAM}. \end{aligned} \quad (4-3)$$

其中前兩項依舊代表「所有 DSLAM 的耗電功率」與「所有 PSR 的 ADSL NIC 總耗電功率」，而最後一項則是「PSR 除網卡外之基本耗電功率」，因為此時 PSR(或 ATU-R)會跟著 DSLAM 一同開關，故須再多乘上 r_{DSLAM} 。同理，全無線省電架構 ISP 業者耗電功率亦可化減為(4-4)式。

$$\text{全無線省電架構ISP業者耗電功率} = 19 \cdot 76W \cdot r_{DSLAM}. \quad (4-4)$$

最後就是現行架構的整體耗電功率與 ISP 業者耗電功率了，可分別由(4-5)與(4-6) 式表示。

$$\text{現行架構整體耗電功率} = 19 \cdot 76W + 304 \cdot 3W + 304 \cdot 5W. \quad (4-5)$$

$$\text{現行架構ISP業者耗電功率} = 19 \cdot 76W. \quad (4-6)$$

其實直接將 r_{DSLAM} 設為 1, r_{WiMAX} 與 r_{3G} 都設為 0, 即可直接由(4-1)與(4-3)得到(4-5); 由(4-2)與(4-4)得到(4-6)。

經由上述公式推導即可計算出省電比率, 如(4-7)(4-8)(4-9)與(4-10)所示。

$$\text{過渡型省電架構整體省電比率} = 1 - \frac{\text{過渡型省電架構整體耗電功率}}{\text{現行架構整體耗電功率}}. \quad (4-7)$$

$$\text{過渡型省電架構ISP業者省電比率} = 1 - \frac{\text{過渡型省電架構ISP業者耗電功率}}{\text{現行架構ISP業者耗電功率}} = 1 - r_{DSLAM}. \quad (4-8)$$

$$\text{全無線省電架構整體省電比率} = 1 - \frac{\text{全無線省電架構整體耗電功率}}{\text{現行架構整體耗電功率}} = 1 - r_{DSLAM}. \quad (4-9)$$

$$\text{全無線省電架構ISP業者省電比率} = 1 - \frac{\text{全無線省電架構ISP業者耗電功率}}{\text{現行架構ISP業者耗電功率}} = 1 - r_{DSLAM}. \quad (4-10)$$

從(4-7)~(4-10)可以很快的發現後三個式子能大大的簡化成 $1 - r_{DSLAM}$, 而從直觀上來說, 因為除了過渡型省電架構在計算省電比時須考慮到 r_{WiMAX} 與 r_{3G} , 其餘的省電都單純是由 DSLAM 的關閉所造成, 故可直接得出「省電比 = 1 - 開啟比例」這個結論。

綜合上述式子與表 4-4 的數據, 在情境一底下的省電比率經計算後整理於表 4-5。

表 4-5 情境一模擬結果省電比率一覽表

	過渡型省電架構	過渡型省電架構	全無線省電架構	全無線省電架構
	整體省電比	ISP 業者省電比	整體省電比	ISP 業者省電比
省電比率	9.185 %	34.009 %	34.009 %	34.009 %

對於 ISP 業者而言，其最重要的結果應是離現行架構最為接近的第二項數據。簡單的說，只要將 ATU-R 加裝多個無線網卡(成為 PSR)，ADSL 接取網路即有機會可減少三成的耗電。即使考量整體耗電也是比現行架構還來的低，甚至還能增加使用者滿意度，是個能讓「業者」、「使用者」與「環境保護」三贏的絕佳策略。

4.3 情境二：使用特定日流量之模擬結果

本情境的模擬設定和 4.2 節情境一大體相同 (如表 4-3)，唯一不同的是：在使用 non-stationary Poisson Process 產生 PSR 流量時，大小趨勢的參考不使用台大 ADSL 各時段平均流量，改為使用自從 2011/12/13 起至 2012/01/06 止，總共 24 天的特定日期流量來模擬，也就是說計算量增加為情境一的 24 倍。而為了簡化數據結果，每次模擬只記錄其一整日下來之「系統平均 Blocking Prob.」、「DSLAM 平均開啟比率」、「WiMAX NIC 平均開啟比率」、「3G NIC 平均開啟比率」與「使用者總滿意度」等 6 項數據。

而之所以使用特定日期流量來模擬，是為了更加客觀的檢視情境一的模擬結果，因為每日的流量的大小以及尖峰時段均有些許差異，利用這些變因勢必能從更多元的角度測試本論文省電架構之嚴謹性。

同時為了簡化篇幅，本節模擬結果的詳細數據整理於附錄二，在此僅使用長條圖分析。

而在台大 ADSL 每日流量紀錄之中，本論文唯獨不使用 2011/12/20 的資料來模擬。原因是當天台大 ADSL 後端網路頻頻斷線且持續長達約 10 小時，因此數據參差不齊無法得到有效的模擬結果，故在此不予採用。

接下來將依序分析各項數據在每日不同流量底下的優劣，以長條圖表示之。

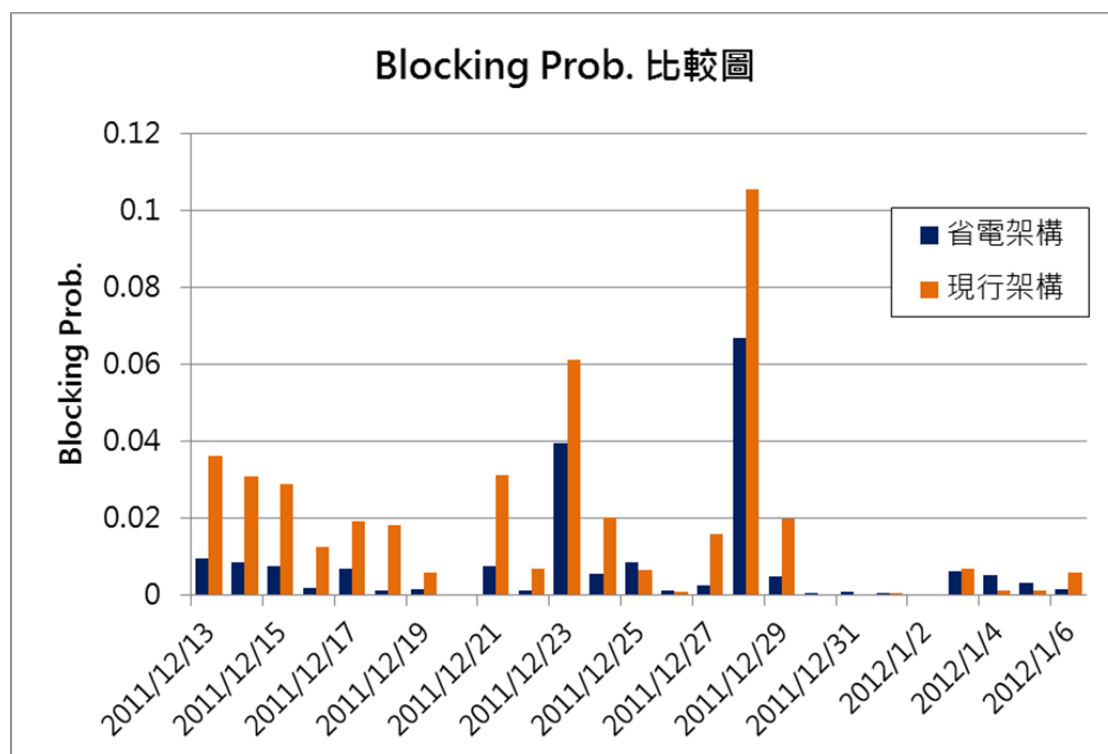


圖 4-7 台大 ADSL 每日流量模擬結果 – Blocking Prob.比較圖

從圖 4-7 我們可輕易發現，省電架構的 Blocking Prob.表現通常都比現行架構還來的更好，與情境一的模擬結果一致。但從附錄二的詳細數據可以發現，當現行架構本來的 Blocking Prob.就很低時(約是小於 0.1%)，使用省電架構反而會造成整體 Blocking Prob.的上升。其主要理由是：在這種情況底下總流量都不高，原本的 ADSL 就能滿足使用者的需求，若此時多加了 PSR 的導引流量功能，反而會因著 NIC 的開開關關而造成些許 Blocking 與 Dropping，但其尖峰時段並不會如圖 4-3 一般有許多 Blocking 被減緩，因此整體的 Blocking Prob.是上升的，好在上升的程度都不高，使用者感受不明顯，如圖 4-8 所示。

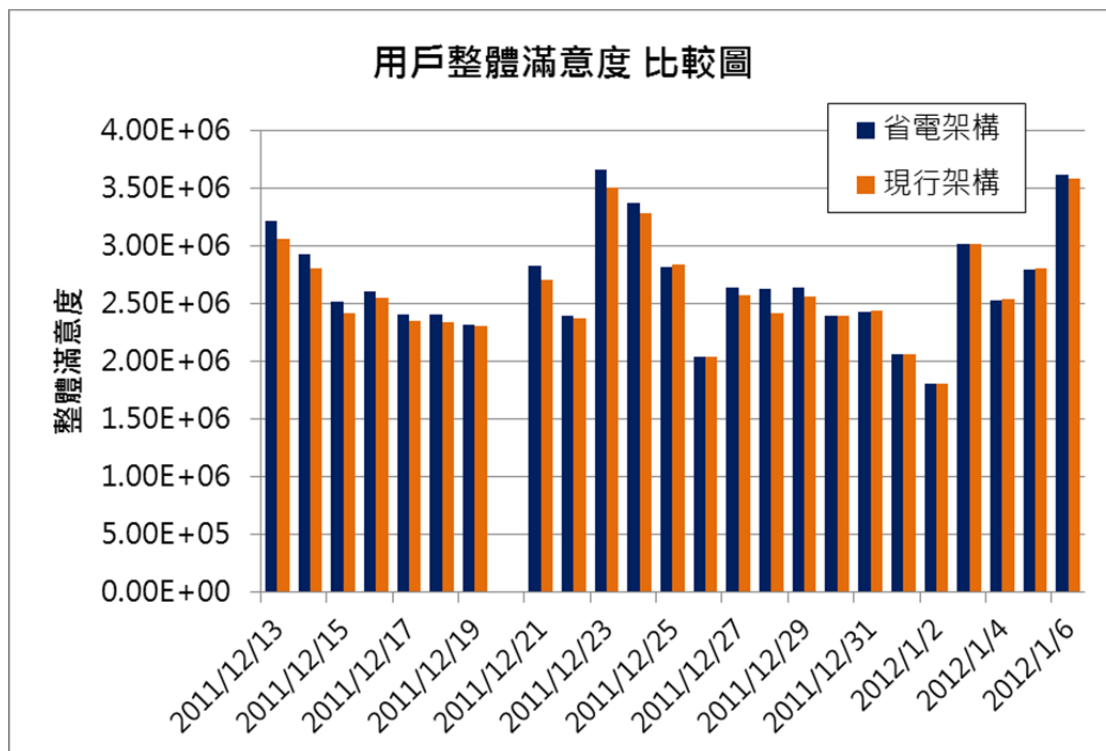


圖 4-8 台大 ADSL 每日流量模擬結果 - 用戶整體滿意度比較圖

使用者整體滿意度的高低和當天總流量成正比，但是省電架構與現行架構滿意度的差別和圖 4-7 的 Blocking Prob. 差別呈負相關。因此在絕大多數的日子裡，使用省電架構的滿意度都比現行架構來的高；即使是在現行架構滿意度較高的日子裡，兩者的差別也低到幾乎無法以肉眼分辨，使用者非量化的真實感受勢必也是如此。

至於與整體省電比率最直接相關的「DSLAM 開啟比率」、「WiMAX NIC 開啟比率」與「3G NIC 開啟比率」則依序如圖 4-9、4-10 與 4-11 所示。

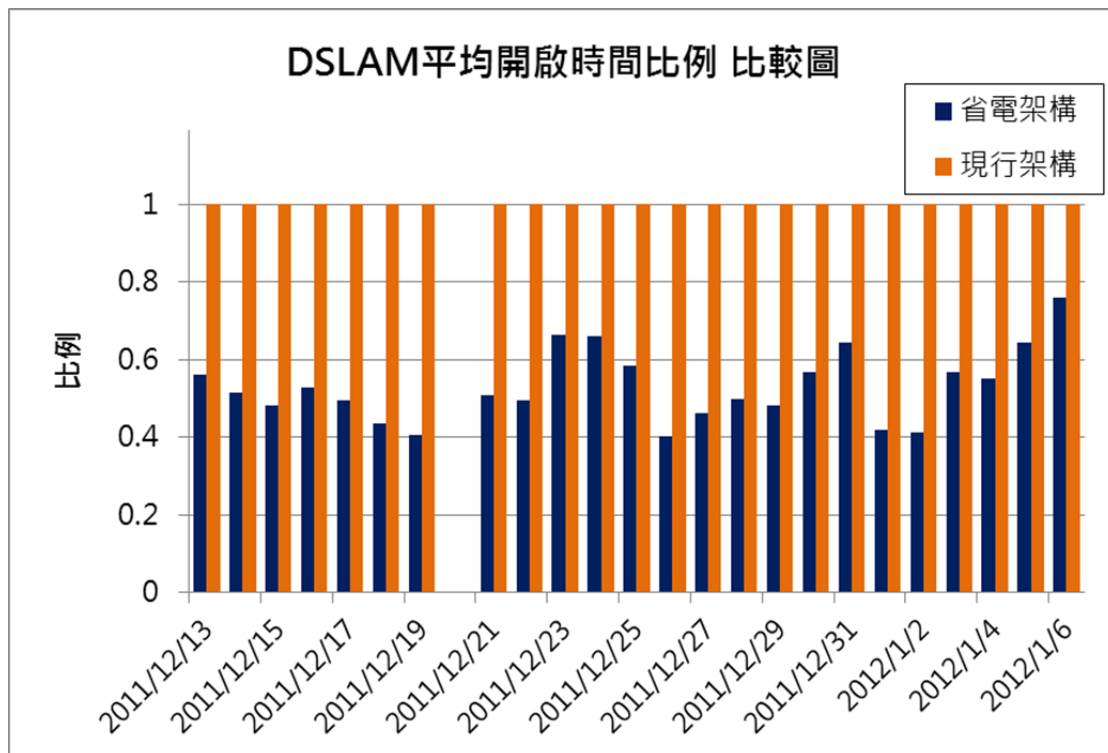


圖 4-9 台大 ADSL 每日流量模擬結果 - DSLAM 平均開啟時間比例比較圖

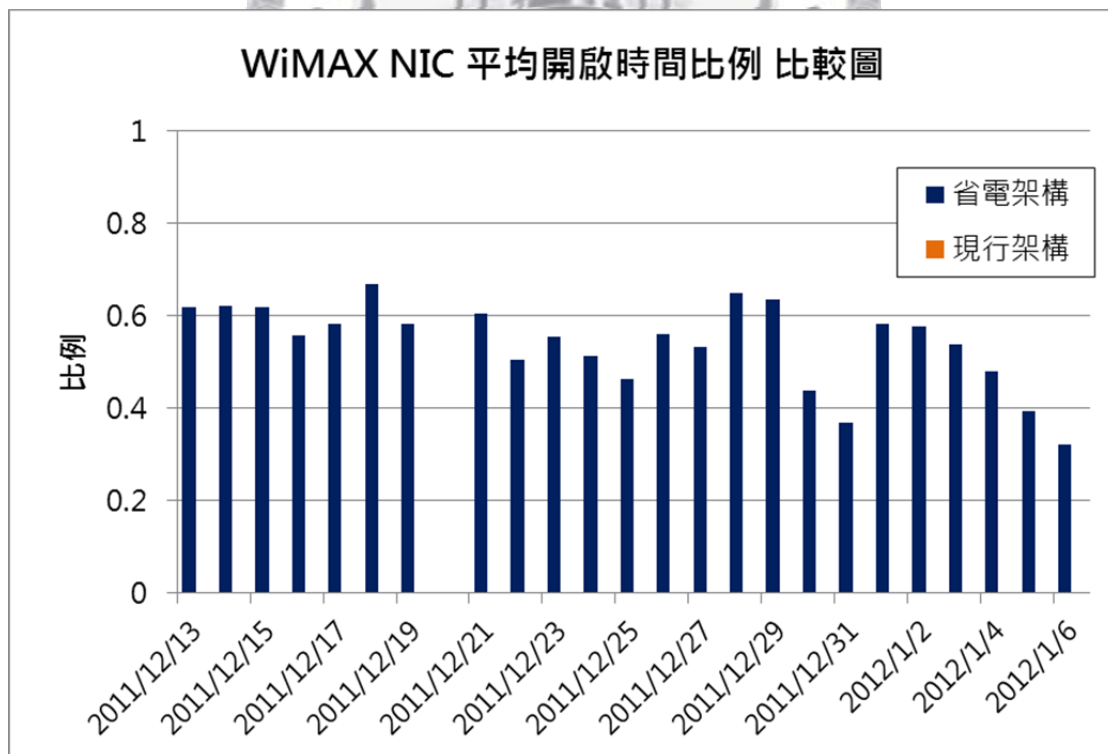


圖 4-10 台大 ADSL 每日流量模擬結果 - WiMAX NIC 平均開啟時間比例比較圖

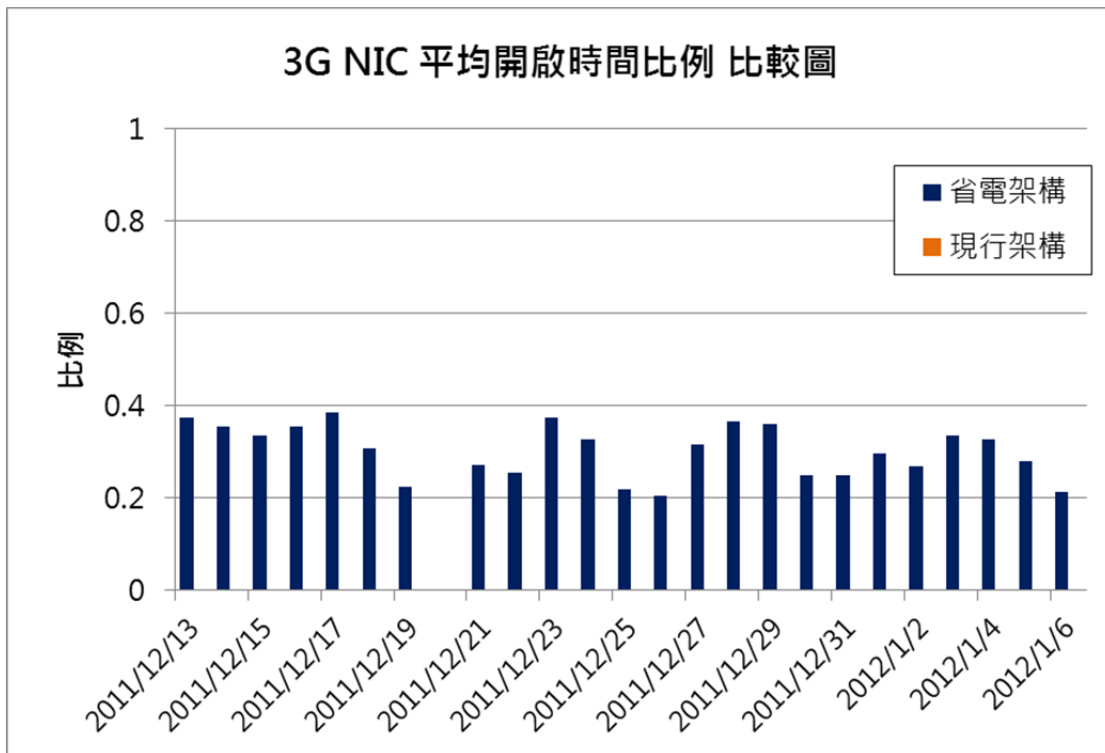


圖 4-11 台大 ADSL 每日流量模擬結果 - 3G NIC 平均開啟時間比例比較圖

從圖 4-9~4-11 三張設備開啟的比例圖可觀察出幾個特性。首先是 DSLAM 開啟的比例大小和總流量的趨勢(正比於滿意度)是類似的，符合直觀的預測，但是當日流量的形狀亦會影響其值，是故不容易直接根據流量大小預測 DSLAM 的開啟比例。至於 WiMAX 與 3G NIC 的平均開啟比例則很難看出其趨勢，雖然兩者的趨勢幾乎是相同的且與 DSLAM 開啟比例略呈負相關，但是在整體流量太高時，WiMAX 與 3G NIC 的開啟比例勢必也會隨之上升。因此可推測其值高低大概不具有明顯的物理意義。唯一比較肯定的是，因為 WiMAX 接取網路的 $Power_Efficiency = \frac{WiMAX\ BS\ 容量}{WiMAX\ NIC\ 耗電量} = \frac{70Mbps}{3W}$ 比 3G 接取網路的值還高 $\left(\frac{3G\ BS\ 容量}{3G\ NIC\ 耗電量} = \frac{22Mbps}{1W} \right)$ ，因此 WiMAX NIC 的開啟比例始終比 3G 還來的高。

而利用圖 4-9~4-11 的數據加上(4-1)~(4-10)式，即可計算出不同架構下每日的省電比率，如圖 4-12 所示。

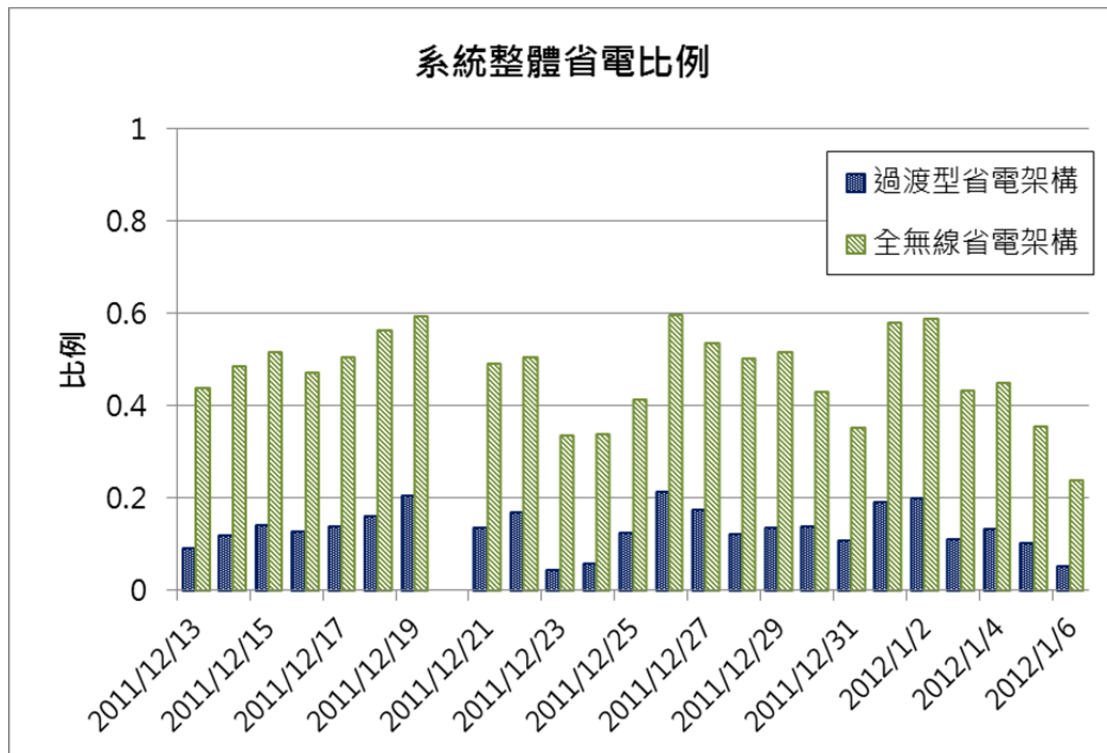


圖 4-12 台大 ADSL 每日流量模擬結果 - 系統整體省電比例

因為(4-8) 式與(4-9)、(4-10)式是相同的，圖 4-12 之全無線省電架構省電比即是 ISP 業者省電比。和情境一的模擬結果類似，整體省電的幅度十分顯著。

最後，將上述每個日期模擬而得的數據再平均，即可得到表 4-6 與表 4-7。

表 4-6 情境二省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)平均模擬結果比較表

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
現行架構 (對照組)	0.81457%	100.000%	0.000%	0.000%	$2.62 \cdot 10^6$
省電架構 (實驗組)	1.82545%	53.151%	54.074%	30.277%	$2.67 \cdot 10^6$

和情境一的表 4-4 相比，可看出 Blocking 上升、DSLAM 開啟比率下降、WiMAX 與 3G NIC 開啟比率上升以及使用者滿意度上升幅度更高。簡而言之，就是因為每日流量的變化幅度較平均後的流量還大，Blocking 在尖峰時段更容易發生，但是 DSLAM 更容易找到低流量的時機關閉，而 WiMAX 與 3G NIC 只好更長時間維持開啟。整體結果甚至比情境一的模擬結果更加出色。

表 4-7 情境二模擬結果平均省電比率一覽表

	過渡型省電架構	過渡型省電架構	全無線省電架構	全無線省電架構
	整體省電比	ISP 業者省電比	整體省電比	ISP 業者省電比
省電比率	13.379 %	46.849 %	46.849 %	46.849 %

表 4-7 可與表 4-5 做比較，由於 DSLAM 開啟的比例較低，每項省電數據都比情境一更為可觀。同時因為本表是將每日流量分別模擬後再取其平均值，理論上本數據顯示的省電比率較表 4-5 更具代表性。這表示對 ISP 業者而言，採用本論文的省電架構有機會可幫 ADSL 省去將近一半的耗電，是個非常優異的省電結果。

4.4 情境三 - 使用平均流量與極端情境之模擬結果

4.4.1 參數與環境設定

本情境的設定主要是參考一些開發中國家的現況，該地區由於網路使用者的密度不高且頻寬需求不大，ADSL 技術仍然停留在使用 Monolithic DSLAM 的階段，也就是該種 DSLAM 仍然位於局端(CO)內，同時其具有的 port 數量多、涵蓋範圍廣、支援頻寬不高。而除了 ADSL 之外，該區域另一種廣泛使用的接取網路技術即是 WiMAX，主要是因為當地少數偏遠地區未架設電話銅線，只能靠涵蓋範圍較

廣的無線基地台取得語音與資料服務。

根據上述特殊情況而創造的模擬情境實驗組與對照組分別如圖 4-13、圖 4-14 所示。簡單的說，就是實驗組(省電架構)有一大型 DSLAM 與一 WiMAX 基地台，且假設涵蓋範圍相同，然而對照組(現行架構)則只具有一大型 DSLAM。

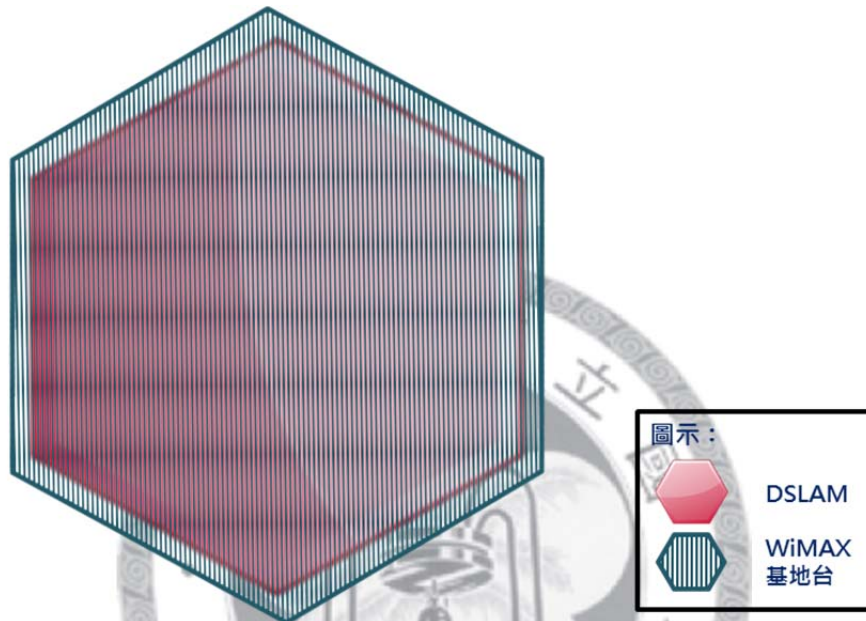


圖 4-13 情境三實驗組，DSLAM 與 WiMAX 基地台分布關係圖

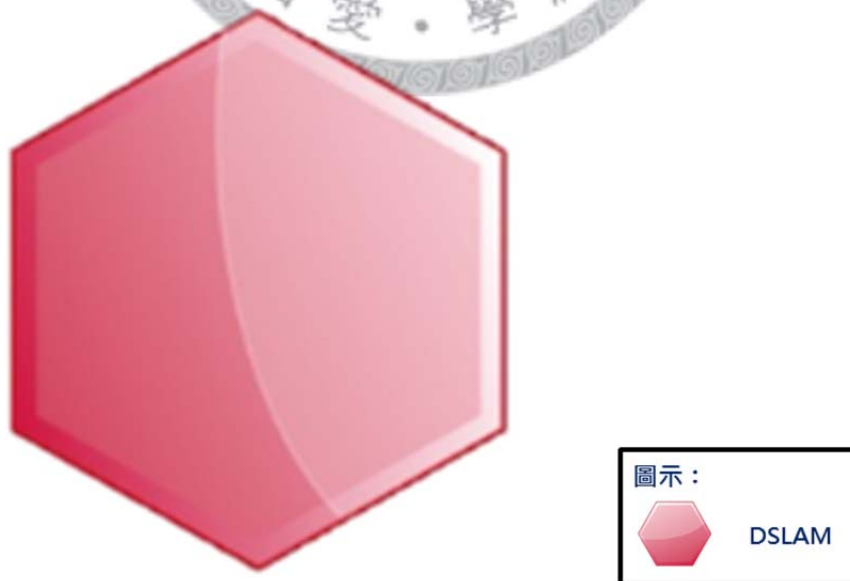


圖 4-14 情境三對照組，DSLAM 分布圖

本情境的參數設定如表 4-8 所示，參數意義以及其他情境參數可參考附錄一。

表 4-8 情境三實驗組參數設定值

參數名稱	參數類型	設定值
K	常數	2
M_k	常數	$M_1 = 1$ (將 DSLAM 視為 ADSL 之基地台) $M_2 = 1$
N	常數	$1 \cdot 1008 = 1008$
$C_{k,m}^{BS}$	常數	$C_{1,m}^{BS} = 500\text{Mbps}$, $C_{2,m}^{BS} = 70\text{Mbps}$
$C_{k,n}^{NIC}$	常數	$C_{1,n}^{NIC} = 2\text{Mbps}$, $C_{2,n}^{NIC} = 70\text{Mbps}$
$T_{PSR_check_NIC}$	常數	120 秒*
P_k^{NIC}	常數	$P_1^{NIC} = 3W$, $P_2^{NIC} = 3W$
$\alpha_{Max_blocking_prob}$	常數	0.2*
$L_{NIC_tolerance}$	常數	5*
$B_{n,i,j}^{Required_BW}$	常數	$B_{n,HTTP,j}^{Required_BW} = B_{n,FTP,j}^{Required_BW} = 24\text{Kbps}$, $B_{n,YouTube,j}^{Required_BW} = 100\text{Kbps}$.
$B_{n,i,j}^{Server_Max_BW}$	隨機變數	詳見 2.2 節
$B_{n,i,j}^{Session_Size}$	隨機變數	詳見 2.2 節
$T_{NMS_check_BS}$	常數	30 秒*
α_{BS_flow}	常數	0.7*
$D_{k,m}^{BS}$	平面區域	如圖 4-13
S	常數	48*
U	常數	30 天*
$\gamma_{acceptance}$	常數	2*
L_{loose_bound}	常數	4*
L_{strict_bound}	常數	20*
$\beta_{BS_flow_high}$	常數	0.8*
$\beta_{BS_flow_low}$	常數	0.7*

註：其中標註*者乃是根據經驗法則選取

上述參數的設定有兩處和情境一不同，首先是 DSLAM 的設定參考[33]的建議，port 數設為 1008 且每一位使用者的最高速率都是 2Mbps，而為了維持集縮比依然在 4.0 左右，DSLAM 的最大容量在此設為 500Mbps（因 $1: \frac{2Mbps \cdot 1008}{500Mbps} = 1: 4.032$ ）。

除此之外，另一處不同點即是 PSR 在判斷 Blocking Prob.時使用的上限值： $\alpha_{Max_blocking_prob}$ 。情境一將其值設為 0.03，算是十分嚴苛的條件。但此時該值卻無法使用，主要的原因是每個 PSR 流量都不大，在 $T_{PSR_check_NIC}$ 的時段之中稍微 Blocking 一個 session request 就超過上限了。而這不一定是代表 PSR 已然有壅塞的傾向，通常只是 Random Process 必然的現象而已。有鑑於此，在本情境之中選擇將 $\alpha_{Max_blocking_prob}$ 提高為 0.2。

而之所以將本情境稱為極端情境，主要的原因是此時的 DSLAM 只有一台，而且服務的使用者眾多。若要將其關閉，唯有在流量低到 WiMAX 可負荷時才有機會，不再像情境一時具有較大的彈性來分別開關 DSLAM。因此可預期在本情境底下 DSLAM 關閉的時間比例必然不高。考慮到省電架構較現行架構多增加了部分設備(PSR)，假使 DSLAM 關閉的時間太少甚至還有可能會導致系統整體耗電上升，結果反而更不環保。

因此本情境的測試對於驗證本論文提出的演算法十分有意義。

4.2.2 模擬結果

和情境一相同，模擬起始點改設在流量最低的 16:00 而不是 00:00。因此初始值的設定須考量到流量特性，意即實驗組在模擬啟動時因為流量最低，合理推測此時 DSLAM 應為關閉狀態，故將 ADSL NIC 設為關閉，同時將 WiMAX NIC 設為開啟。但對照組的 PSR(ATU-R)則是永遠只有 ADSL NIC 維持在開啟狀態。

(一) PSR 觀點之模擬結果比較：

和情境一相同，在此亦選擇有代表性的 PSR 繪圖。首先，現行架構的模擬結果如圖 4-15 所示，而省電架構的模擬結果則如圖 4-16 所示。

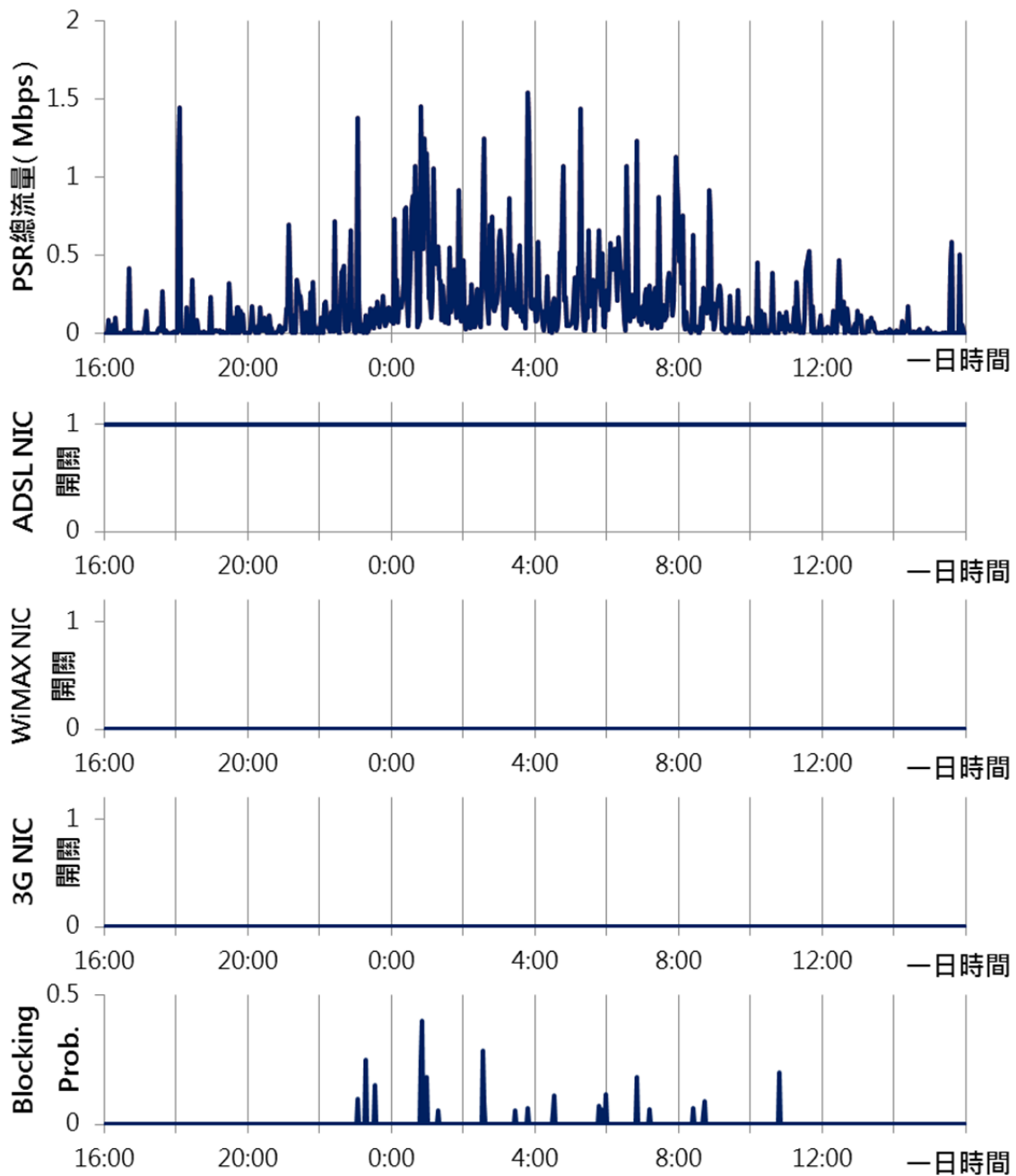


圖 4-15 編號 PSR52 號使用現行架構(對照組)於情境三之模擬結果

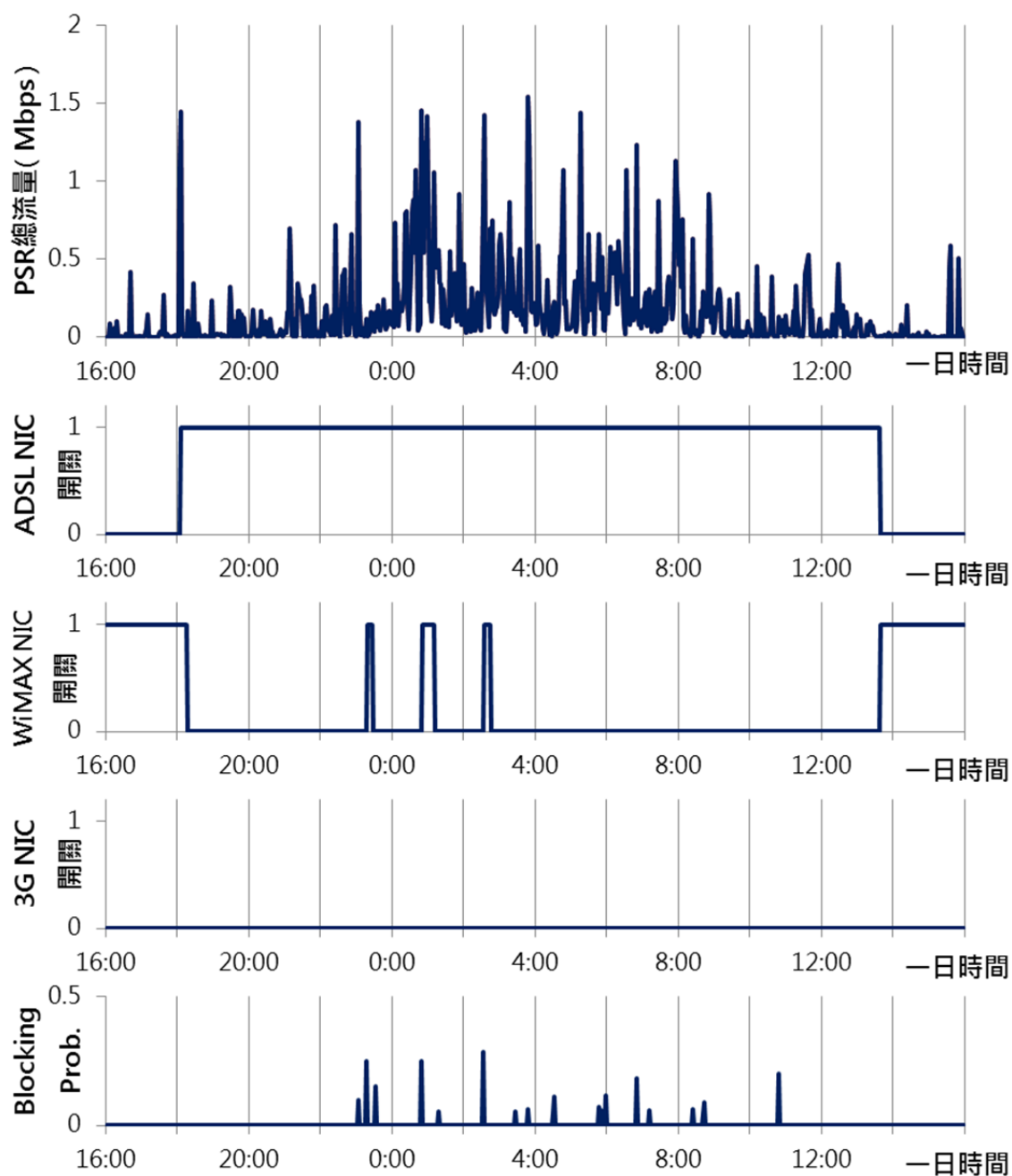


圖 4-16 編號 PSR52 號使用省電架構(實驗組)於情境三之模擬結果

在極端情境底下可發現Blocking的發生較為分散,不一定會出現在尖峰時刻,同時一旦發生了Blocking,造成的Blocking Prob.亦十分可觀。而這現象對於PSR開關NIC演算法極為不利,很容易造成WiMAX NIC頻繁的開關,如圖4-16,但是多連接一個無線網路減少的Blocking卻不多,大約只有在AM 1:00的效果較為明顯而已,因此可預料最後Blocking的改善不會如同情境一那麼顯著。

(二) NMS 觀點之模擬結果比較：

改從整體系統的觀點來看，更能夠客觀的了解省電架構在極端情境底下的表現。首先，現行架構的模擬結果如圖 4-17 所示，而省電架構的模擬結果則如圖 4-18 所示。

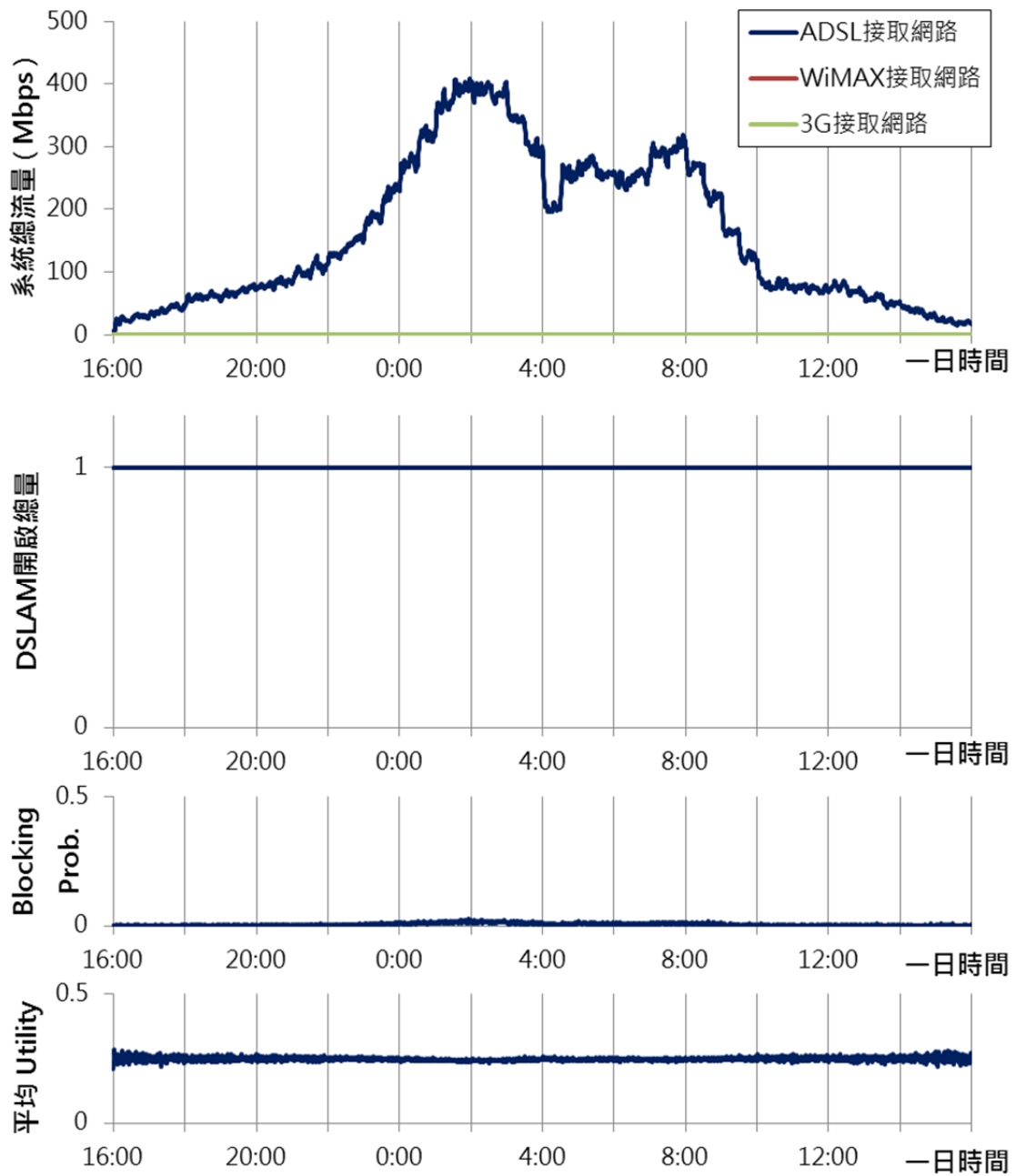


圖 4-17 現行架構(對照組)於情境三之整體模擬結果

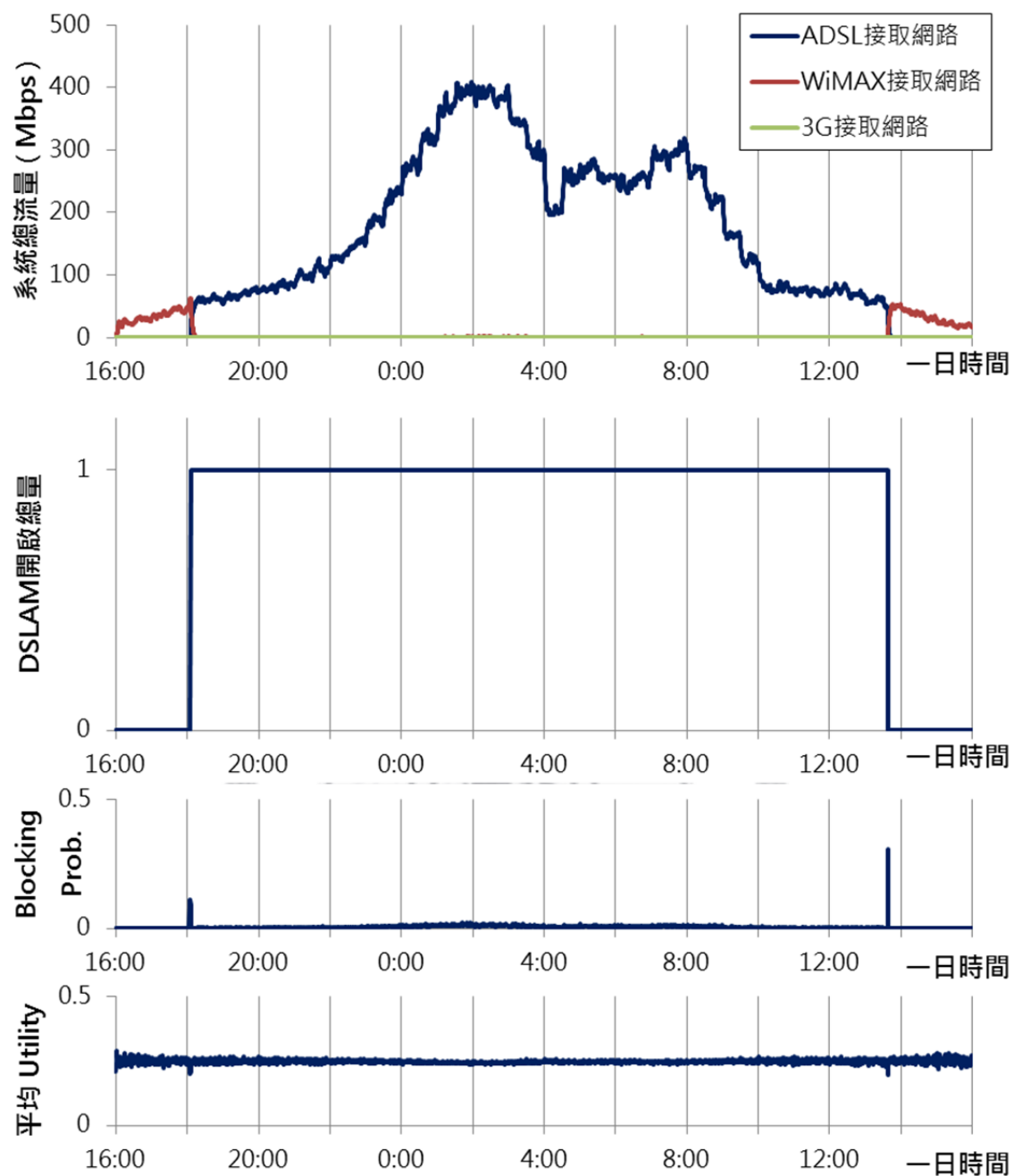


圖 4-18 省電架構(實驗組)於情境三之整體模擬結果

比較圖 4-17 與 4-18 的不同處，可發現一些有趣的現象。首先是 DSLAM 關閉了大約二成的時間，遠比想像中還來的更高。其次就是在準備開啟 DSLAM 之前因為 WiMAX 容量的不足造成些許 Blocking，而在 DSLAM 強制關閉時，也造成不少 sessions 被強制中斷(即為 Dropping，在此亦算入 Blocking)。而因此在這兩個時刻的 Blocking Prob.十分明顯，甚至在平均滿意度(Utility)的圖都能看到這現象。

但是再仔細看會發現，省電架構在 DSLAM 開啟時段的 Blocking Prob.比現行架構的略小，與第(一)部分的模擬結果類似。為了比較這兩種效應孰優孰劣，我們可以參考整體數據的加總，如表 4-9 所示。

表 4-9 情境三省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
現行架構	0.80050%	100.000%	0.000%	0.000%	1.4325 · 10 ⁶
省電架構	0.72725%	81.389%	22.252%	0.000%	1.4346 · 10 ⁶

很幸運的，省電架構整體的表現依然比現行架構來的更好。因此過渡型架構的省電比可由(4-11)~(4.13) 式計算而得。

$$\begin{aligned} \text{過渡型省電架構整體耗電功率} &= 1 \cdot 1700W \cdot r_{DSLAM} + 1008 \cdot 3W \cdot r_{DSLAM} \\ &\quad + 1008 \cdot 3W \cdot r_{WiMAX} + 1008 \cdot 5W. \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$\text{現行架構整體耗電功率} = 1 \cdot 1700W + 1008 \cdot 3W + 1008 \cdot 5W. \quad (4-12)$$

$$\text{過渡型省電架構整體省電比率} = 1 - \frac{\text{過渡型省電架構整體耗電功率}}{\text{現行架構整體耗電功率}}. \quad (4-13)$$

同理，其餘架構的省電比率則與式子(4-8)~(4-10)相同，都是 $1 - r_{DSLAM}$ ，在此並不贅述。因此，在情境三底下的省電比率可整理如表 4-10 所示。

表 4-10 情境三模擬結果省電比率一覽表

	過渡型省電架構	過渡型省電架構	全無線省電架構	全無線省電架構
	整體省電比	ISP 業者省電比	整體省電比	ISP 業者省電比
省電比率	2.113 %	18.611 %	18.611 %	18.611 %

雖然最終整體省電比率不如情境一，但是對於 ISP 業者而言，使用本論文提出的省電架構依然能省去約 2 成的電力消耗，系統整體的耗電也仍然較現行架構還來的低。足以證明本架構即使在較為極端的環境之中依然能省電，同時還能提升使用者滿意程度，可說是魚與熊掌二者兼得，具有十足可實作的潛力。



第五章 結論與展望

5.1 結論

本論文提出了一適用於有線接取網路的嶄新省電架構與機制，而為了驗證其可行性，使用台大 ADSL 連線記錄檔與多篇學術文獻創造出接近真實情況的流量來模擬。綜合前幾章的論述與最後的模擬結果，在當前有線頻寬吃緊以及電費高漲的現況下，且在同時具有 WiMAX 與 3G 訊號涵蓋的情境底下，使用本論文提出的省電架構與演算法，ISP 業者可獲得下列三項好處：

- (一) 有線接取網路的耗電量在無線接取網路頻寬充裕的條件下可節省約達一半。
- (二) 多餘的無線接取網路頻寬可舒緩尖峰時段有線接取網路的壅塞情形。
- (三) 因尖峰時段的 Blocking Probability 下降，整體使用者滿意程度微幅增加。

而站在使用者的角度來看，獲得的好處亦有二項：

- (一) 在尖峰時段的連線被拒絕機率(Blocking Prob.)下降。
- (二) 因 ISP 業者成本降低，資費可望下降。

以環保的觀點而言，本論文提出之省電架構也可將有線接取網路之整體耗電下降一成左右。假使未來 LTE 在台灣成功的廣泛佈建，使得無線頻寬更加充裕，同時相關無線網路元件成本逐年降低，則上述數值均可望再大幅增加，因而更具商業可行性。換言之，使用本論文提出之架構與演算法，可望使得「業者」、「使用者」與「環境保護」在未來三者三贏。

5.2 未來研究方向

由於本研究僅只是在初步證明同時連上多個接取網路有省電的可能性，因此尚有許多議題留待更進一步的討論。而相關的系統參數設定亦會隨著接取網路技術的變革而有所調整，例如 ADSL 正逐漸朝向以 PON 為基礎的 FTTx 或長距離的 Ethernet 演進；同時無線接取網路環境也將因 LTE 的加入而有所不同。這些都是未來接續本論文的研究者應考慮的議題。

而對於 ISP 業者而言，要完成本論文提出的省電架構，尚須增加許多設備資本支出(CapEx)，雖然合理推測節省下來的半數電費營運成本(OpEx)可輕易的填補該項支出，但本部分仍須經過業者依據自身的狀況來精算。除此之外，於 3.5 節亦提到一些在實做上會遇到的困難，例如 PSR 各部功能的整合以及 NMS 額外的功能等等，本論文雖已提供少許可供參考的解決方式，詳細的技術細節對業者依然十分有挑戰性。

而站在學術的角度，由於本論文的使用者流量模式 (User Profiles) 較為接近真實網路流量行為而非簡化後的數學模型 (例如 Poisson Arrival Process 與 Exponential Service Time)，且提出的架構尚未在數學上完整的定義，因此無法事先預測省電成效，也無法根據嚴謹的數學計算求得最佳解。目前本論文提出的演算法乃是直觀解 (heuristics)，相關參數的數值亦缺乏選取的機制或計算，雖然已具有顯著的省電成效，但架構的適應性與發展性仍然需要使用數學推導來驗證。而這些議題都十分具有學術研究的價值，期許未來能以本論文為基石繼續更進一步研究。

附錄一 參數定義與設定值

表附錄 1-1 完整參數表

參數名稱	參數意義
K	總共的接取網路種類
k	表示接取網路的種類， $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 且 $k = 1$ 代表 ADSL
M_k	接取網路 k 總共的基地台個數 (DSLAM 也視為基地台)
m	基地台編號，且根據 k 的不同 $m \in \{1, 2, \dots, M_k\}$
N	PS Router 總數
n	PS Router 編號，且 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$
$C_{k,m}^{BS}$	在接取網路 k 底下第 m 個基地台的容量
$F_{k,m}^{BS}(t)$	在時間 t 時，接取網路 k 底下第 m 個基地台的流量
$C_{k,n}^{NIC}$	PSR n 連往接取網路 k 的 NIC 最大頻寬
$F_{k,n}^{NIC}(t)$	在時間 t 時，PSR n 連往接取網路 k 的 NIC 流量
$T_{PSR_check_NIC}$	PSR 檢查 NIC 流量並做出決策的週期
P_k^{NIC}	連上接取網路 k 的 NIC 在 Active 時的耗電功率
$G_{n, Priority_List}$	PSR n 用來記錄 Routing Priority 的參數
O_k	接取網路 k 對該 PSR 之 Routing Priority
$\alpha_{Max_blocking_prob}$	PSR n 可接受之最大 Blocking Probability
l_{k,NIC_OFF}	紀錄連往接取網路 k 的 NIC 符合開關條件之次數
$L_{NIC_tolerance}$	NIC 符合開關條件之次數最大值
i	PSR 送出的 session 之類型，且 $i \in \{HTTP, FTP, YouTube\}$
j	PSR 送出的 session 之編號
$B_{n,i,j}^{Required_BW}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session 所需最低頻寬
$B_{n,i,j}^{Server_Max_BW}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session 最高下載速率
$B_{n,i,j}^{Session_Size}$	PSR n 送出的第 j 個類型 i 之 session size
$T_{NMS_check_BS}$	NMS 檢查基地台流量並做出決策的週期
α_{BS_flow}	在計算基地台 EWMA 流量時用到的 ratio
$\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)$	在時間 t 時，接取網路 k 底下第 m 個基地台經過 EWMA 後的流量
$D_{k,m}^{BS}$	在接取網路 k 底下第 m 個基地台的涵蓋區域

參數名稱	參數意義
S	將 1 天 24 小時切成 S 份統計歷史流量資訊
s	時段編號，且 $s \in \{1, 2, \dots, S\}$
U	記錄的歷史流量資訊總天數
u	天數編號，且 $u \in \{1, 2, \dots, U\}$
$F_s^{total_PSR}(u)$	代表 u 天前在 s 時段所有 PSR 送出的流量的平均
$\mu_{s, total_PSR_flow}$	在 1 日當中時段 s 時, PSR 送出的總流量 U 天平均值
$\sigma_{s, total_PSR_flow}$	在 1 日當中時段 s 時, PSR 送出的總流量 U 天標準差
$F^{total_PSR}(s)$	在時段 s 時, 所有 PSR 的平均流量總和
$V_{flow_pattern}$	標記現在的流量有無落在可接受區間， 且 $V_{flow_pattern} \in \{Normal, Abnormal\}$
$\gamma_{acceptance}$	$\{Normal\}$ 代表流量落在歷史平均加減 $\gamma_{acceptance}$ 倍標準差
L_{loose_bound}	在不嚴格執行時, 符合開關 DSLAM 演算法之最高次數
L_{strict_bound}	在嚴格執行時, 符合開關 DSLAM 演算法之最高次數
$l_{k,m,ON}$	NMS 用來紀錄特定基地台符合開啟 DSLAM 演算法之次數
$l_{m,OFF}$	NMS 用來紀錄 DSLAM m 符合關閉 DSLAM 演算法之次數
G_{closed_DSLAM}	NMS 用來紀錄已關閉 DSLAM 之集合， 且 $G_{closed_DSLAM} \subset \{1, \dots, M_1\}$
$\beta_{BS_flow_high}$	當 $\frac{\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)}{C_{k,m}^{BS}} > \beta_{BS_flow_high}$ 時, 開啟新 DSLAM
$\beta_{BS_flow_low}$	若該 DSLAM 關閉後仍可使各基地台滿足 $\frac{\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)}{C_{k,m}^{BS}} < \beta_{BS_flow_low}$ ，則關閉之

表附錄 1-2 模擬參數設定值

參數名稱	參數類型	情境一	情境二	情境三
K	常數	3	3	2
k	變數			
M_k	常數	$M_1 = 19$ $M_2 = M_3 = 1$	$M_1 = 19$ $M_2 = M_3 = 1$	$M_1 = 1$ $M_3 = 1$
m	變數			
N	常數	$19 \cdot 16 = 304$	$19 \cdot 16 = 304$	1008
n	變數			
$C_{k,m}^{BS}$	常數	$C_{1,m}^{BS} = 50\text{Mbps}$ $C_{2,m}^{BS} = 70\text{Mbps}$ $C_{3,m}^{BS} = 22\text{Mbps}$	$C_{1,m}^{BS} = 50\text{Mbps}$ $C_{2,m}^{BS} = 70\text{Mbps}$ $C_{3,m}^{BS} = 22\text{Mbps}$	$C_{1,m}^{BS} = 500\text{Mbps}$ $C_{2,m}^{BS} = 70\text{Mbps}$
$F_{k,m}^{BS}(t)$	變數			
$C_{k,n}^{NIC}$	常數	$C_{1,n}^{NIC} = 12\text{Mbps}$ $C_{2,n}^{NIC} = 70\text{Mbps}$ $C_{3,n}^{NIC} = 22\text{Mbps}$	$C_{1,n}^{NIC} = 12\text{Mbps}$ $C_{2,n}^{NIC} = 70\text{Mbps}$ $C_{3,n}^{NIC} = 22\text{Mbps}$	$C_{1,n}^{NIC} = 2\text{Mbps}$ $C_{2,n}^{NIC} = 70\text{Mbps}$
$F_{k,n}^{NIC}(t)$	變數			
$T_{PSR_check_NIC}$	常數	120 秒*	120 秒*	120 秒*
P_k^{NIC}	常數	$P_1^{NIC} = 3W$ $P_2^{NIC} = 3W$ $P_3^{NIC} = 1W$	$P_1^{NIC} = 3W$ $P_2^{NIC} = 3W$ $P_3^{NIC} = 1W$	$P_1^{NIC} = 3W$ $P_3^{NIC} = 3W$
$G_{n,Priority_List}$	變數			
O_k	變數			
$\alpha_{Max_blocking_prob}$	常數	0.03*	0.03*	0.2*
l_{k,NIC_OFF}	變數			
$L_{NIC_tolerance}$	常數	5*	5*	5*
i	變數			
j	變數			
$B_{n,i,j}^{Required_BW}$	常數	$B_{n,HTTP,j}^{Required_BW} =$ $B_{n,FTP,j}^{Required_BW} =$ 24Kbps, $B_{n,YouTube,j}^{Required_BW} =$ 100Kbps.	$B_{n,HTTP,j}^{Required_BW} =$ $B_{n,FTP,j}^{Required_BW} =$ 24Kbps, $B_{n,YouTube,j}^{Required_BW} =$ 100Kbps.	$B_{n,HTTP,j}^{Required_BW} =$ $B_{n,FTP,j}^{Required_BW} =$ 24Kbps, $B_{n,YouTube,j}^{Required_BW} =$ 100Kbps.
$B_{n,i,j}^{Server_Max_BW}$	隨機變數	詳見 2.2 節	詳見 2.2 節	詳見 2.2 節
$B_{n,i,j}^{Session_Size}$	隨機變數	詳見 2.2 節	詳見 2.2 節	詳見 2.2 節

參數名稱	參數類型	情境一	情境二	情境三
$T_{NMS_check_BS}$	常數	30 秒*	30 秒*	30 秒*
α_{BS_flow}	常數	0.7*	0.7*	0.7*
$\hat{F}_{k,m}^{BS}(t)$	變數			
$D_{k,m}^{BS}$	平面區域	如圖 4-1	如圖 4-1	如圖 4-13
S	常數	48*	48*	48*
s	變數			
U	常數	30 天*	30 天*	30 天*
u	變數			
$F_s^{total_PSR}(u)$	變數			
$\mu_{s,total_PSR_flow}$	變數			
$\sigma_{s,total_PSR_flow}$	變數			
$F^{total_PSR}(s)$	變數			
$V_{flow_pattern}$	變數			
$\gamma_{acceptance}$	常數	2*	2*	2*
L_{loose_bound}	常數	4*	4*	4*
L_{strict_bound}	常數	20*	20*	20*
$l_{k,m,ON}$	變數			
$l_{m,OFF}$	變數			
G_{closed_DSLAM}	變數			
$\beta_{BS_flow_high}$	常數	0.8*	0.8*	0.8*
$\beta_{BS_flow_low}$	常數	0.7*	0.7*	0.7*

註：標記*者乃是依據經驗法則選取

附錄二 情境二模擬結果之詳細數值

表附錄 2-1 情境二省電架構(實驗組)與現行架構(對照組)模擬結果比較表

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
2011/12/13 現行架構	3.61607%	100.000%	0.000%	0.000%	3.0645 · 10 ⁶
2011/12/13 省電架構	0.95944%	56.1349%	61.8083%	37.6033%	3.2206 · 10 ⁶
2011/12/14 現行架構	3.11161%	100.000%	0.000%	0.000%	2.8068 · 10 ⁶
2011/12/14 省電架構	0.84841%	51.4547%	62.1478%	35.6072%	2.9274 · 10 ⁶
2011/12/15 現行架構	2.89303%	100.000%	0.000%	0.000%	2.4247 · 10 ⁶
2011/12/15 省電架構	0.77141%	48.3132%	61.8713%	33.5522%	2.5221 · 10 ⁶
2011/12/16 現行架構	1.27834%	100.000%	0.000%	0.000%	2.5558 · 10 ⁶
2011/12/16 省電架構	0.20855%	52.9002%	55.7589%	35.4779%	2.6062 · 10 ⁶
2011/12/17 現行架構	1.93583%	100.000%	0.000%	0.000%	2.3524 · 10 ⁶
2011/12/17 省電架構	0.68833%	49.5614%	58.3420%	38.6568%	2.4071 · 10 ⁶
2011/12/18 現行架構	1.82578%	100.000%	0.000%	0.000%	2.3394 · 10 ⁶
2011/12/18 省電架構	0.11494%	43.6897%	67.0331%	30.8895%	2.4136 · 10 ⁶
2011/12/19 現行架構	0.58851%	100.000%	0.000%	0.000%	2.3088 · 10 ⁶
2011/12/19 省電架構	0.17491%	40.5373%	58.1839%	22.4433%	2.3262 · 10 ⁶

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
2011/12/21 現行架構	3.11549%	100.000%	0.000%	0.000%	2.7135 ·10 ⁶
2011/12/21 省電架構	0.74987%	50.8151%	60.5734%	27.3360%	2.8355 ·10 ⁶
2011/12/22 現行架構	0.70445%	100.000%	0.000%	0.000%	2.3749 ·10 ⁶
2011/12/22 省電架構	0.12869%	49.4207%	50.4989%	25.4391%	2.3999 ·10 ⁶
2011/12/23 現行架構	6.13914%	100.000%	0.000%	0.000%	3.5113 ·10 ⁶
2011/12/23 省電架構	3.97947%	66.3615%	55.6081%	37.4068%	3.6644 ·10 ⁶
2011/12/24 現行架構	2.03275%	100.000%	0.000%	0.000%	3.2903 ·10 ⁶
2011/12/24 省電架構	0.54964%	66.1093%	51.4638%	32.7609%	3.3811 ·10 ⁶
2011/12/25 現行架構	0.65170%	100.000%	0.000%	0.000%	2.8379 ·10 ⁶
2011/12/25 省電架構	0.88078%	58.5435%	46.2948%	21.8069%	2.8263 ·10 ⁶
2011/12/26 現行架構	0.08265%	100.000%	0.000%	0.000%	2.0442 ·10 ⁶
2011/12/26 省電架構	0.13597%	40.3947%	56.1065%	20.6076%	2.0424 ·10 ⁶
2011/12/27 現行架構	1.59701%	100.000%	0.000%	0.000%	2.5743 ·10 ⁶
2011/12/27 省電架構	0.25143%	46.2774%	53.3215%	31.7256%	2.6383 ·10 ⁶
2011/12/28 現行架構	10.5700%	100.000%	0.000%	0.000%	2.4249 ·10 ⁶
2011/12/28 省電架構	6.67974%	49.7496%	65.0877%	36.6182%	2.6338 ·10 ⁶
2011/12/29 現行架構	2.00242%	100.000%	0.000%	0.000%	2.5704 ·10 ⁶

	系統平均 Blocking Prob.	DSLAM 平均開啟比率	WiMAX NIC 平均開啟比率	3G NIC 平均開啟比率	使用者 總滿意度
2011/12/29 省電架構	0.51134%	48.2785%	63.7043%	36.1714%	2.6419 ·10 ⁶
2011/12/30 現行架構	0.04006%	100.000%	0.000%	0.000%	2.3970 ·10 ⁶
2011/12/30 省電架構	0.07402%	56.9828%	43.8318%	25.1119%	2.3957 ·10 ⁶
2011/12/31 現行架構	0.01393%	100.000%	0.000%	0.000%	2.4409 ·10 ⁶
2011/12/31 省電架構	0.09376%	64.5815%	36.9166%	24.9977%	2.4375 ·10 ⁶
2012/01/01 現行架構	0.05223%	100.000%	0.000%	0.000%	2.0625 ·10 ⁶
2012/01/01 省電架構	0.07135%	41.9920%	58.2653%	29.7675%	2.0618 ·10 ⁶
2012/01/02 現行架構	0.00384%	100.000%	0.000%	0.000%	1.8095 ·10 ⁶
2012/01/02 省電架構	0.02447%	41.2281%	57.6138%	26.8649%	1.8089 ·10 ⁶
2012/01/03 現行架構	0.68524%	100.000%	0.000%	0.000%	3.0161 ·10 ⁶
2012/01/03 省電架構	0.63106%	56.7160%	53.8432%	33.6856%	3.0192 ·10 ⁶
2012/01/04 現行架構	0.13834%	100.000%	0.000%	0.000%	2.5450 ·10 ⁶
2012/01/04 省電架構	0.52244%	55.0238%	48.0743%	32.8075%	2.5276 ·10 ⁶
2012/01/05 現行架構	0.12563%	100.000%	0.000%	0.000%	2.8060 ·10 ⁶
2012/01/05 省電架構	0.34490%	64.4390%	39.3535%	27.9532%	2.7951 ·10 ⁶
2012/01/06 現行架構	0.60673%	100.000%	0.000%	0.000%	3.5874 ·10 ⁶
2012/01/06 省電架構	0.15472%	76.1239%	32.0614%	21.3679%	3.6168 ·10 ⁶

參考文獻

- [1] M. Pickavet et al., "Worldwide Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking," in *Proc. Of IEEE ANTS Conference*, Bombay, India, Dec. 2008.
- [2] C. Panarello, A. Lombardo, G. Schembra, L. Chiaraviglio, and M. Mellia, "Energy saving and network performance: a trade-off approach," in *1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy '10)*, pp. 41–50, ACM, Apr. 2010.
- [3] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, S. Wright, "Power awareness in network design and routing," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2008.
- [4] S. Antonakopoulos, S. Fortune and L. Zhang, "Power-aware Routing with Rate-adaptive Network Elements," in *Proc. of IEEE Globecom 2010 Workshop on Green Communications*, Miami, Dec. 2010.
- [5] 中華民國行政院，數位匯流發展方案(2010-2015年)，2010年12月公布。
- [6] T. Starr, J. M. Cioffi, and P. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [7] ITU Recommendation G997.1, "Physical layer management for digital subscriber line (DSL) transceivers," ITU, Apr. 2009.
- [8] Agilent Technologies Inc., "White Paper - Understanding DSLAM and BRAS

Access Devices,” 2006.

[9] Z. Tsai, "An Introduction to Broadband Network and Data Communications: xDSL

協定架構圖," 台大通訊系統實驗室 2011 暑期新生訓練, Aug. 04-18, 2011.

[10] ITU. [Online]. Available: <http://www.itu.int/>.

[11] ITU-R Report M.2023, "Spectrum requirements for International Mobile

Telecommunications-2000 (IMT-2000)," May 2000.

[12] ITU-R Report M.2133, "Requirements, evaluation criteria and submission

templates for the development of IMT-Advanced," Nov. 2008.

[13] 3GPP. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/>.

[14] QUALCOMM Inc., "HSPA+ for Enhanced Mobile Broadband Whitepaper," Feb.

2009.

[15] J. Lopes, L. M. Correia, and, L. Santo, "Performance analysis of UMTS/HSPA at

the cellular level," in *Proc. of IEEE VTC 2009Spring*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.

[16] WiMAX Forum. [Online]. Available: <http://www.wimaxforum.org/>.

[17] WiMAX Forum, "About the WiMAX Forum." [Online]. Available:

<http://www.wimaxforum.org/about>.

[18] WiMAX Forum, "WiMAX and the IEEE 802.16m Air Interface Standard," Apr.

2010

[19] 國立台灣大學計算機及資訊網路中心資訊網路組, "台大 ADSL 計畫," 2003.

[Online]. Available: <http://ccnet.ntu.edu.tw/ADSL/>.

- [20] Cisco Systems Inc., "Cisco Visual Networking Index (VNI) Forecast and Methodology 2010–2015," *Cisco White Paper*, Jun. 2011.
- [21] Sandvine Inc., "Global Internet Phenomena Report," May 2011.
- [22] Arbor Networks Inc., "Trends in Internet Traffic Patterns," 2010.
- [23] "IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD), p.116," *IEEE 802.16m-08/004r5*, Jan. 2009.
- [24] *cdma2000 Evaluation Methodology*, 3GPP2 C.R1002-B, 3GPP2 Std., Rev. B, Dec. 2009.
- [25] A. Abhari and M. Soraya, "Workload Generation for YouTube," *Multimedia Tools and Applications Journal*, Jun. 2009.
- [26] P. Gill, M. Arlitt, Z. Li, and A. Mahanti, "YouTube Traffic Characterization: A View From the Edge," in *Proc. of ACM IMC*, 2007.
- [27] X. Cheng, C. Dale, and J. Liu, "Statistics and Social Network of YouTube Videos," in *Proc. of IEEE IWQoS*, 2008.
- [28] C. Liu, L. Shi, B. Liu, "Utility-Based Bandwidth Allocation for Triple-Play Services," in *Proc. of Forth European Conference ECUMN '07 on Universal Multiservice Networks*, pp. 327-336, Feb. 2007.
- [29] C. Curescu and S. Nadjm-Tehrani, "Time-aware utility-based resource allocation in

wireless networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib.*, vol. 16, pp. 624-636, 2005.

[30] S. Bauer, G. Lee, I. Chakraborty, X. Brucker, X. Yang, B. Leong, J. Wroclawski, "The personal router," in *Proc. of the MOBICOM'02*, Atlanta, GA, USA, Sep. 23–28, 2002.

[31] D. Pogue, "Wi-Fi to Go, No Cafe Needed", *New York Times*, May 6, 2009.

[32] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, and S. Wright, "Power awareness in network design and routing," in *Proc. of IEEE INFOCOM*, 2008.

[33] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, and R.S. Tucker, "Energy consumption in wired and wireless access networks," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 70-77, Jun. 2011.

[34] S. Segan, "Novatel Wireless MiFi 3G/4G Mobile Hotspot 4082," *PC Magazine*, Apr. 2011. [Online]. Available: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2382886,00.asp>.

[35] AMD Inc., "Magic Packet Technology," *AMD White Paper*, Nov. 1995.

[36] A.B. Downey, "Using Pathchar to Estimate Internet Link Characteristics," in *Proc. ACM SIGCOMM*, pp.222-223, 1999.

[37] M.A. Ergin, M. Gruteser, "Using packet probes for available bandwidth estimation: a wireless testbed experience," in *Proc. of WiNTECH*, Los Angeles, USA, 2006, pp. 95–96.