

# 國立交通大學

資訊學院 資訊學程

## 碩士論文

網路可用頻寬量測工具研究

A Study on A Network Available Bandwidth  
Measuring Tool

研究生：林志達

指導教授：王協源 教授

中華民國一百年七月

網路可用頻寬量測工具研究

A Study on A Network Available Bandwidth Measuring Tool

研究生：林志達

Student：Chih-Ta Lin

指導教授：王協源 教授

Advisor：Shie-Yuan Wang

國立交通大學

資訊學院 資訊學程



Submitted to College of Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Computer Science

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

# 網路可用頻寬量測工具研究

學生：林志達

指導教授：王協源 教授

國立交通大學 資訊學院 資訊學程 碩士班

## 摘 要

在現今網路科技快速演進且網路相關應用日趨多元的環境裡，網路可用頻寬資訊對於各種網路應用而言是相當重要的資訊。常見的網路可用頻寬量測技術可分為探測速率模型(Probe Rate Model, PRM)以及探測間隔模型(Probe Gap Model, PGM)這兩大類型。使用 PRM 模型的實作雖然較 PGM 模型實作有較高的量測準確性，但量測所需的時間較長，並且由於其量測是以形成網路壅塞來推估當時的網路可用頻寬，因此並不適合使用於真實的網路世界。相對於 PRM，PGM 模型則具有輕量、快速、準確的特性，較適合用於真實世界的網路可用頻寬量測工作。

在本論文的研究中，我們選擇了採用 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具—Spruce，設計包含不同網路拓樸、頻寬、背景流量類型、使用頻寬比例、參數等情境的模擬案例，對 Spruce 的行為特性進行深入的探討，同時藉此了解 PGM 模型的特性。並於觀察 Spruce 在不同情境下的量測表現之後，提出改善的建議，透過模擬案例實驗證實，我們的改良確實有效。

# A Study on A Network Available Bandwidth Measuring Tool

student : Chih-Ta Lin

Advisors : Dr. Shie-Yuan Wang

Department Program of Computer Science

National Chiao Tung University

## ABSTRACT

In recent years, information technology grows rapidly. More and more network applications are adopted as parts of our everyday life, including video streaming, overlay-route selection, QoS verification and P2P applications. People concern about the network available bandwidth because many of network applications need to know the information of network available bandwidth to adjust their behaviors. There are two kinds of network available bandwidth measurement tools proposed in past years: PRM(Probe Rate Model) and PGM(Probe Gap Model). PRM based tools are intrusive and cost much to get the estimation results. So PRM is generally considered not suitable for real life networks, while PGM based tools are light weight and faster that can be used in the real world.

In our thesis, we choose a PGM based network available bandwidth measuring tool—Spruce to study its behaviors and characteristics under various kinds of topologies, background traffics, bandwidth usages and scenarios to get well understanding on PGM. We also propose our improvements on Spruce and verify our improvements by NCTUns network simulator, the results show that our improvements are more accurate than the original Spruce.

## 誌 謝

在投入許多時間進行討論、研究、實驗、修正以及資料的整理與撰寫之後，終於順利的完成了這本論文。因為工作的關係，從考上研究所直到現在完成論文一轉眼竟已過了好幾個年頭。在交大這段學習與研究的過程裡，最讓我感恩並且銘記在心的當然是指導教授王協源教授的付出與鼓勵。謝謝老師體諒我工作的因素，犧牲了家庭與自己的時間讓我在許多星期三的晚上單獨和老師一對一的討論，在每一次的討論裡了解我的研究進度並且討論研究的結果，指點我可能的研究方向與議題。在每次的討論結束時，總不忘鼓勵我，要我加油堅持下去，趕快完成論文。也要感謝口試委員曾建超教授及趙禧綠教授百忙之中抽空幫我進行口試，並且給我的論文許多寶貴的建議。

除此之外，非常感謝我的家人以及女友 Ann 的支持與體諒，讓我能夠專注的進行研究，盡可能的不被其他外務及雜事所干擾，忍受我在進度不順利時偶而發作的抱怨與情緒。也謝謝研究所的同學們以及同事 Angel 與我分享論文撰寫的經驗並且提醒我留意口試申請的流程、時間以及準備口試的注意事項。感謝你們在我完成碩士學位的過程中所給予的陪伴與支持。

謹以這本論文獻給關心與支持我的師長及親朋好友們，謝謝你們。

# 目 錄

	頁次
中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌 謝.....	iii
目 錄.....	iv
表 目 錄.....	viii
圖 目 錄.....	x
一、緒 論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的與貢獻.....	3
1.2.1 研究目的.....	3
1.2.2 主要貢獻.....	4
1.3 論文內容結構與章節編排.....	4
二、相關研究.....	6
2.1 網路可用頻寬量測.....	6
2.2 NCTUns 網路模擬器.....	11
2.3 網路流量分析研究.....	13
三、PGM 工具—Spruce 的設計原理.....	16

3.1 Spruce 簡介 .....	16
3.2 Spruce 的假設與限制 .....	16
3.3 Spruce 設計架構 .....	16
3.4 Spruce 特性 .....	18
四、Spruce 量測機制的改良 .....	19
4.1 改良原有程式邏輯以提升執行效能 .....	19
4.2 對於原設計之探測封包間距計算方式的改良 .....	20
4.3 對原設計量測參數之擴充 .....	21
4.4 對於原設計量測結果評估方式之改良 .....	21
五、模擬環境與模擬結果 .....	23
5.1 研究與模擬方式 .....	23
5.2 模擬環境簡介 .....	25
5.2.1 硬體設備 .....	25
5.2.2 軟體設備 .....	25
5.2.3 工具軟體版本與用途 .....	26
5.3 模擬情境參數 .....	28
5.3.1 拓撲型式 .....	28
5.3.2 網路分類 .....	30
5.3.3 背景流量類型 .....	31

5.3.4 已使用之頻寬分類.....	32
5.3.5 背景流量路徑與量測路徑.....	33
5.4 模擬設計.....	35
5.5 模擬案例.....	43
5.5.1 模擬執行方式.....	43
5.6 模擬結果與分析.....	44
5.6.1 模擬設計 A 之結果-比較對 Spruce 原設計進行效能改良 前後之執行時間.....	44
5.6.2 模擬設計 B 之結果-確認對 Spruce 原設計進行效能改良 前後量測結果的正確性.....	47
5.6.3 模擬設計 C 之結果-比較使用 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響...49	49
5.6.4 模擬設計 D 之結果-比較使用不同 inter pair gap 分配對 量測結果的影響.....	53
5.6.5 模擬設計 E 之結果-比較對 Spruce 原設計進行量測結果 評估方式改良前後之結果差異.....	56
5.6.6 模擬設計 F 之結果-比較量測過程中可用頻寬變化對量 測結果的影響.....	72
5.6.7 模擬設計 G 之結果-研究 Spruce 在 multi hops 環境下的	



量測結果.....	75
六、結 論.....	91
七、未來工作.....	93
參考文獻.....	94



# 表 目 錄

頁次

表 1、骨幹網路上 TCP 與 UDP 比例表 .....	13
表 2、各種通訊協定比例表 .....	14
表 3、Protocol packet size 統計表 .....	14
表 4、模擬情境參數分類表 .....	23
表 5、模擬環境所使用之硬體設備 .....	25
表 6、模擬環境所使用之軟體設備 .....	25
表 7、工具軟體版本與用途 .....	27
表 8、網路分類表 .....	30
表 9、背景流量類型表 .....	31
表 10、已使用之頻寬分類表 .....	32
表 11、背景流量路徑與量測路徑表 .....	33
表 12、模擬設計 A 之設計目的與說明 .....	35
表 13、模擬設計 A 所使用之 Spruce 設定 .....	35
表 14、模擬設計 B 之設計目的與說明 .....	36
表 15、模擬設計 B 所使用之 Spruce 設定 .....	36
表 16、模擬設計 C 之設計目的與說明 .....	37
表 17、模擬設計 C 所使用之 Spruce 設定 .....	37
表 18、模擬設計 D 之設計目的與說明 .....	38
表 19、模擬設計 D 所使用之 Spruce 設定 .....	38
表 20、模擬設計 E 之設計目的與說明 .....	39
表 21、模擬設計 E 所使用之 Spruce 設定 .....	39
表 22、模擬設計 F 之設計目的與說明 .....	40
表 23、模擬設計 F 所使用之 Spruce 設定 .....	40
表 24、模擬設計 G 之設計目的與說明 .....	41
表 25、模擬設計 G 所使用之 Spruce 設定 .....	41
表 26、模擬設計表 .....	42
表 27、進行模擬之模擬案例清單 .....	43
表 28、網路分類 A—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	45
表 29、網路分類 B—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	46
表 30、網路分類 A—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	48
表 31、網路分類 B—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	49
表 32、網路分類 A—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	51
表 33、網路分類 B—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	52
表 34、網路分類 A—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	54

表 35、網路分類 B—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	55
表 36、模擬設計 E 之模擬結果匯整 .....	56
表 37、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	57
表 38、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	58
表 39、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果 .....	59
表 40、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果 .....	60
表 41、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果 .....	61
表 42、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果 .....	62
表 43、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果 .....	63
表 44、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果 .....	64
表 45、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果 .....	65
表 46、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果 .....	66
表 47、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果 .....	67
表 48、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果 .....	68
表 49、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果 .....	69
表 50、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果 .....	71
表 51、網路分類 A—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果 .....	72
表 52、網路分類 B—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果 .....	74
表 53、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	75
表 54、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	77
表 55、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果 .....	78
表 56、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果 .....	79
表 57、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果 .....	80
表 58、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果 .....	81
表 59、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果 .....	82
表 60、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果 .....	83
表 61、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果 .....	84
表 62、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果 .....	85
表 63、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果 .....	86
表 64、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果 .....	88
表 65、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果 .....	89
表 66、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果 .....	90

## 圖 目 錄

頁次

圖 1、narrow link 與 tight link .....	6
圖 2、探測間距模型(PGM)示意圖 .....	8
圖 3、NCTUns 模組化架構圖 .....	12
圖 4、研究與模擬流程圖 .....	24
圖 5、模擬實驗環境軟硬體架構圖 .....	26
圖 6、拓樸 A .....	28
圖 7、拓樸 B .....	29
圖 8、拓樸、背景流量與可用頻寬量測路徑圖-1 .....	33
圖 9、拓樸、背景流量與可用頻寬量測路徑圖-2 .....	34
圖 10、網路分類 A—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	45
圖 11、網路分類 B—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	46
圖 12、網路分類 A—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	48
圖 13、網路分類 B—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	49
圖 14、網路分類 A—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	51
圖 15、網路分類 B—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	52
圖 16、網路分類 A—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	54
圖 17、網路分類 B—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	55
圖 18、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	57
圖 19、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果圖 .....	58
圖 20、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果圖 .....	59
圖 21、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果圖 .....	60
圖 22、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果圖 .....	61
圖 23、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果圖 .....	62
圖 24、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果圖 .....	63
圖 25、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果圖 .....	64
圖 26、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果圖 .....	65
圖 27、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果圖 .....	66
圖 28、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果圖 .....	67
圖 29、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果圖 .....	68
圖 30、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果圖 ....	70
圖 31、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果圖 ....	71
圖 32、網路分類 A—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果圖	

.....	73
圖 33、網路分類 B—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果圖 .....	74
圖 34、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖.....	76
圖 35、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖.....	77
圖 36、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖.....	78
圖 37、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖.....	79
圖 38、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖.....	80
圖 39、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖.....	81
圖 40、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖.....	82
圖 41、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖.....	83
圖 42、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果圖.....	84
圖 43、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果圖.....	85
圖 44、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖.....	87
圖 45、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖.....	88
圖 46、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖.....	89
圖 47、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖.....	90



# 一、緒 論

## 1.1 研究動機

隨著科技不斷的推陳出新，資訊相關技術也逐步隨著日新月異，在知識快速成長的洪流裡，網際網路的應用已經成為社會大眾日常生活不可或缺的一部份。近年來網路的應用可說無所不在，隨著行動與手持裝置的普及化，人們對於網路的使用習慣也慢慢從定點的操作轉變成隨處可見的行動應用。網路所提供的服務類型也由早期以文字瀏覽為主的主從式應用程式，演變為點對點的應用，並且提供大量多媒體的串流或社交服務。

由於電信技術的持續進步，網路頻寬也跟著隨之提升，讓企業與家庭能夠以較合理的價格取得較大的網路頻寬，並且也使行動網路成為日常生活隨手可得的網路連接方式。在此同時，一般大眾對於娛樂與資訊的使用習慣亦隨之改變，例如由於網路頻寬的成長，使得網路電視的發展日漸盛行，許多平台的廠商紛紛以家用網路提供比起傳統有線電視系統更清晰與更高畫質的數位頻道，或是提供在手持式行動裝置上的即時影音服務等等…。

在現在網際網路用戶的網路頻寬逐漸加大，網路服務應用日漸廣泛之際，網路可用頻寬的探討成為一個相當重要的議題。對於許多在網路上所提供的網路應用服務程式而言，必須要依據目前剩餘可用頻寬的大小，考慮不同的應對與服務策略。例如網路上多媒體視訊串流的服務，用戶端可能所處的環境會有 3G、Wlan、光纖網路等不同情境，服務提供者需要能針對不同的異質網路環境產生不同位元率的數位內容，或是採用可調式的視訊編碼(Scalable Video Coding, SVC)技術 [1][2] 解決不同的頻寬傳輸需求，這些工作都必須要正確的對目前可用頻寬進行判斷後，才能執行相關的調整。

目前常見的網路可用頻寬量測技術一般分為探測間距模型(Probe Gap Model, PGM)及探測速率模型(Probe Rate Model, PRM)兩種主要類型，我們將在本論文的第二章對這兩種模型進行詳細的說明。在許多網路可用頻寬量測工具的比較結果中，採用 PRM 模型的工具雖然有較高的量測準確性，但由於其探測方式是對網路注入大量的封包，藉

由壅塞的發生來找出網路可用頻寬，對於網路的效能將會產生極大的影響，一般而言並不適合使用在真實的網路世界。而屬於 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具相對於 PRM 模型則具有對網路效能的影響較小等特性。在 PGM 模型中，Spruce[3]具有準確、輕量的優點，並且各種 PGM 模型的實作在假設與理論基礎上都與 Spruce 相同。因此本論文計畫對 Spruce 在各種不同情境下的量測結果進行分析比較，以了解 Spruce 的特性與效能，並做為後續 PGM 模型研究的參考；同時，我們亦對 Spruce 原設計提出改良，且透過模擬的方式驗證我們改良後的 Spruce 在網路可用頻寬量測確實有較佳的表現。



## 1.2 研究目的與貢獻

### 1.2.1 研究目的

在本論文的研究中，我們希望對 Spruce 這個網路可用頻寬量測工具進行完整的評估，以了解在各種不同情境：包含不同的網路環境、各種特性的背景流量、不同的網路頻寬使用程度及不同的設定配置的情況下，Spruce 對於網路可用頻寬量測結果的特性與準確性，以作為後續分析及探討 PGM 模型之網路可用頻寬量測工作的研究基礎。

本論文的研究目的是希望對於 Spruce 的各種特性與其在各種網路情境的表現進行分析，我們設計了超過 200 個案例來探討 Spruce 的網路可用頻寬量測結果，並計畫執行超過 2000 次的網路實驗來取得量測資訊。當研究網路議題的行為特性時，在真實的網路環境中進行網路實驗，往往需要耗費大量的時間與成本才能夠建置出較具規模的 lab 環境，並且需要花費可觀的時間才能完成相關的研究實驗。相對的，採用模擬真實網路環境的網路模擬器除了可以降低真實環境硬體建置的經費與複雜度之外，更可以提升實驗執行的效率並且正確的完成各種模擬案例。因此在本論文的研究中，我們計畫採用模擬的方式，使用 NCTUns[4][5] 這個網路模擬器平台進行實驗，並且將 Spruce 移植到 NCTUns 上進行模擬以評估其量測的結果。

在本論文中，我們除了觀察與研究 Spruce 所執行的網路可用頻寬量測結果外，經由對 Spruce 原始碼的追蹤以及對於 Spruce 量測結果的分析，對於分析後的相關議題我們亦在 Spruce 原設計機制進行改良，並且在不同的模擬案例中比較對於原設計機制改善前後 Spruce 的測量結果，以分析在各種不同網路情境下 Spruce 的量測表現。最後歸納分析實驗的結果，證明我們的改善確實提升了 Spruce 這個網路可用頻寬量測工具結果的準確性，並將在各種情境下 Spruce 的量測結果進行整理與分析討論。



### 1.2.2 主要貢獻

本論文的主要研究貢獻包含：

1. 設計各種模擬的情境與案例，通過完整的大規模模擬實驗，以了解 Spruce 的行為特性。
2. 經由分析與檢視原 Spruce 的設計，修改 Spruce 的實作方式，在不影響結果正確性的情況下，改善原實作的執行效率與資源佔用。在模擬器上運作時，我們的改善可縮短模擬所需的時間，提高模擬執行的效率。
3. 修改原實作對於頻寬探測的設計及對探測數據的處理邏輯，提高網路可用頻寬量測結果的準確性。

### 1.3 論文內容結構與章節編排

本論文的內容結構與章節編排說明如下：

在「第二章、相關研究」中，我們將說明與本論文相關的研究文獻，並介紹兩種網路可用頻寬量測的模式—探測間距模型(Probe Gap Model, PGM)及探測速率模型(Probe Rate Model, PRM)。在本章中，我們也將針對本論文在模擬實驗研究所使用的網路模擬器—NCTUns 進行簡介。

在「第三章、PGM 工具—Spruce 的設計原理」中，我們將先簡要介紹我們所要研究的網路可用頻寬量測工具—Spruce，接下來針對其設計的假設做進一步的說明，最後詳細介紹 Spruce 完整的設計架構以及 Spruce 的特性。

在「第四章、Spruce 量測機制的改良」中，我們將說明本論文對於原有 Spruce 實作的修改，使其能在 NCTUns 模擬器上順利運作；並將說明我們對於原有 Spruce 設計的改良，使其在不影響量測結果正確性的情況下，能有效提高執行的效能；並對 Spruce 的設計機制進行擴充，使得進行可用頻寬偵測的 packet pair 與 packet pair 之間，可採用 exponential 或 uniform 分配，以比較配置不同 inter pair gap 分配對於量測結果的影響；並進一步改良原設計中對於頻寬探測數據的處理邏輯，以使量測結果的準確度能夠進一步的提升。

在「第五章、模擬環境與模擬結果」中，我們將針對本論文研究與模擬的方式進行說明，接著說明模擬環境的規劃及使用的相關軟硬體設備；並介紹於本論文所使用的模擬環境之中，對於拓樸型式、網路分類、已使用頻寬比例、背景流量類型的設計。我們接著再依所預期研究探討的主題規劃各種模擬設計，並結合上述各項設計規劃，定義出本論文所要模擬的模擬案例。在本章節的最後，我們將說明模擬實驗執行方式，並將各個模擬案例的實驗結果予以整理紀錄，最後對模擬結果進行分析得出研究結論，並將結論整理於「第六章、結論」之中。

在「第七章、未來工作」中，我們將說明在本論文針對 Spruce 的行為特性進行了解與分析之後，未來可再進一步討論與研究的相關議題。



## 二、相關研究

### 2.1 網路可用頻寬量測

在許多網路相關的應用中，網路可用頻寬的量測普遍被視為是一個相當重要的議題，用來做為衡量網路效能的一個重要指標。網路可用頻寬量測的結果可以被廣泛的應用在許多不同的領域，例如：壅塞控制的路由選擇、多媒體的網路服務、影音串流、或點對點的資訊傳輸等應用[7][8]。

在網路路徑上，具有最小網路頻寬的鏈路我們稱為 narrow link，而具有最小可用頻寬的鏈路我們即稱為是 tight link，也就是所謂的 bottleneck link。網路可用頻寬的量測即是針對在 tight link 上剩餘可使用的頻寬進行估計，narrow link 與 tight link 的示意圖請見圖 1。

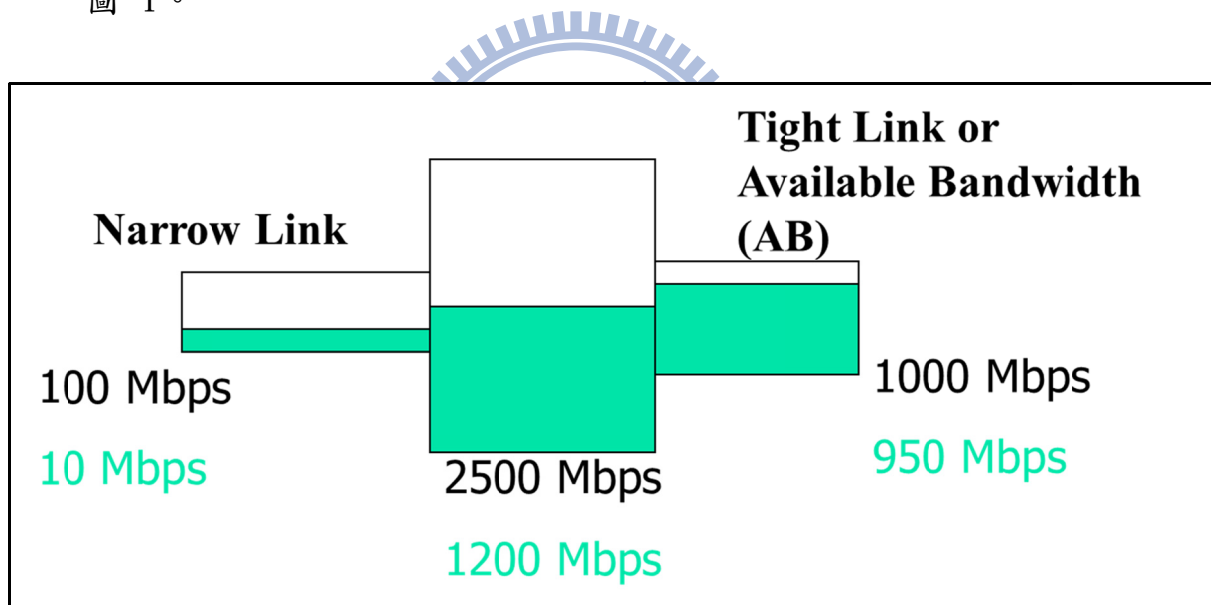


圖 1、narrow link 與 tight link

資料來源：[9]

在相關的文獻中，評估網路可用頻寬的方法通常使用直接探測的方式進行，藉由主動的發送探測封包來對網路目前的狀況進行評估，進而推算出目前的網路可用頻寬。一般利用發送探測封包來偵測網路可用頻寬的技術主要分為兩種類型[10][11]，其中探測速率模型(Probe

Rate Model, PRM), 是透過改變探測封包的傳送速率來偵測網路可用頻寬; 而另一種類型的網路可用頻寬偵測技術則是探測間距模型 (Probe Gap Model, PGM), 這種類型的技術主要是利用探測封包之間的時間變化(Packet Dispersion), 來推估可用頻寬。

PRM 探測速率模型也就是一般所說的疊代探測法 (iterative probing)。PRM 的概念是如果傳送端所送出的探測封包速率  $R_i$  小於網路可用頻寬  $A$  時, 則在接收端收到封包的速率  $R_o$  會等於  $R_i$ , 如果傳送的速率  $R_i > A$  時, 偵測的封包在傳送過程中會被暫存在網路設備的 Queue 中, 而發生延遲, 使得  $R_i > R_o$ , 藉由觀察  $R_i$  與  $R_o$  的轉折點可以找出目前的網路可用頻寬。在 PRM 模型中, 網路可用頻寬偵測是以 packet trains 的方式, 由傳送端分數次每次傳送一連串的 packets, 形成一個 packet train, 每次傳送的 packet train 都是以不同的速率送出。由接收端負責觀察傳送端送出 packet trains 速率  $R_i$  與接收端收到的 packet trains 速率  $R_o$  來評估網路可用頻寬。當接收端發現  $R_i > R_o$  時, 表示傳送端目前傳送 packet train 的速率已經大於網路可用頻寬, 此時 PRM 的接收端會通知傳送端調降  $R_i$  的速率, 然後再慢慢增加傳送速率, 以逼近的方式使送出 packet train 的速率  $R_i$  逐漸收斂到目前的網路可用頻寬。在前人的研究中, 如 Pathload[12]、TOPP[13]、Pathchirp[14]、YAZ[15] 等均是屬於 PRM 模型的網路可用頻寬偵測工具。

PGM 探測間距模型則是使用直接探測 (Direct probing) 的方式, 由傳送端以固定的速率  $R_i$  將 packet pairs 傳送到接收端, 然後接收端藉由計算傳送端送出 packet pair 時的時間間距  $\delta_{in}$  與接收端收到該組 packet pair 時的時間間距  $\delta_{out}$  計算出目前的網路可用頻寬。傳送端傳送 packet pair 的速率  $R_i$  被設定為路徑上 tight link 的頻寬, 所以  $R_i$  會大於或等於網路可用頻寬  $A$ 。PGM 假設網路路徑上只有單一的一個 bottleneck link, 且 bottleneck link 同時是 narrow link 也是 tight link; 並且自 packet pair 中的第一個封包被傳送端送出直到該 packet pair 中的第二個封包被接收端收到的這段時間裡, queue 並不會是空著的狀態。所以  $\delta_{out}$  就會是在 bottleneck 上傳送 packet pair 中第一個 packet 以及在  $\delta_{in}$  時間內抵達傳送端的背景流量 (cross traffic) 所需的時間, 此時 PGM 送出探測的 packet pair 與 cross traffic

packets 如圖 2 所示。

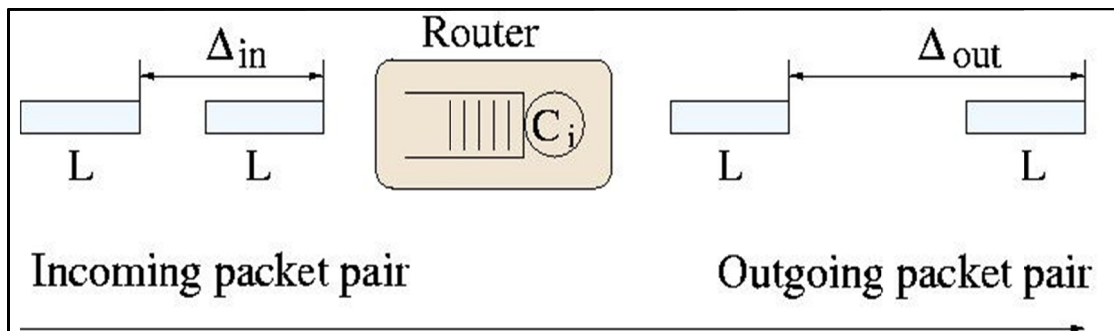


圖 2、探測間距模型(PGM)示意圖

資料來源：[17]

在 PGM 模型中，假設在 bottleneck link 上的頻寬為  $C$ ，網路可用頻寬為  $A$ ，則在 PGM 的 packet pair 探測期間，bottleneck link 傳送 cross traffic 所花的時間  $T$  如公式 1：

$$T = \delta_{out} - \delta_{in} \dots \dots \text{(公式 1)}$$

在 bottleneck link 上的頻寬使用率  $u$  與  $A$  的關係如公式 2：

$$A = C * (1 - u) \dots \dots \text{(公式 2)}$$

在  $\delta_{in}$  時間內抵達的背景流量  $X$  如公式 3：

$$X = C * u * \delta_{in} \dots \dots \text{(公式 3)}$$

由公式 1 與公式 3 可得公式 4：

$$\delta_{out} - \delta_{in} = (X / C)$$

$$\delta_{out} - \delta_{in} = u * \delta_{in}$$

$$u = (\delta_{out} - \delta_{in}) / \delta_{in} \dots \dots \text{(公式 4)}$$

由公式 2 與公式 4 可計算出網路可用頻寬  $A$  如公式 5：

$$A = C * [ 1 - (\delta_{out} - \delta_{in}) / \delta_{in} ] \dots \dots \text{(公式 5)}$$

通常在 PGM 模型中，假設偵測封包的 packet size 是  $L$  bytes，若

要讓 packet pair 中的兩個 packets 是 back to back 的傳送，則會將  $\delta_{in}$  依照公式 6 進行設定：

$$\delta_{in} = L / C \cdots \cdots (\text{公式 6})$$

採用 PGM 模型的網路可用頻寬偵測工具包括：Delphi[18]、Spruce[3]、ABwE[19]、PTR[16]等。而不論是 PRM 或是 PGM 模型都共同具有下列的假設條件：

1. 在探測路徑上的所有 router 都具有 FIFO queue。
2. 假設背景流量都是連續的流體交通模型(fluid traffic model)，在此模型下，我們把背景流量視為均勻的連續位元流，就如同水流一般。因此，若背景交通之流量為 R，packet pair 中相鄰兩探測封包抵達時間之間隔為  $\delta_{in}$  的情況下，packet pair 中兩探測封包的傳輸過程中會穿插傳送  $R * \delta_{in}$  的背景資料量。
3. 假設背景流量的平均速率改變非常緩慢，在單一探測的期間，可以將背景流量速率視為常數。

Pathload[12]、TOPP[13]都是採用 PRM 模型的網路可用頻寬量測工具，在每一回合的探測中也都使用固定流速的 packet train 進行偵測，在不同回合的探測中，Pathload 使用類似二分搜尋法的方式改變送出的 packet train 流速，以逐漸將結果收斂得到網路可用頻寬；而 TOPP 則是以線性的方式逐漸增加送出的 packet trains 的流速。由於在偵測過程中送出的探測封包量極大，因此 pathload 及 TOPP 在偵測過程中會降低整體網路的效能，並且整個探測過程需要耗費較長的時間。

pathChirp[14]則是傳送變動速率的 packet stream 來偵測網路可用頻寬，這樣的 packet stream 稱為 chirp，在其中的 packets 間的時間距是以指數分配的方式傳送。並藉由觀察 chirp 中封包延遲的狀況推斷出目前的網路可用頻寬。

Jacob Strauss[3]等人提出了採用 PGM 模型實作的網路可用頻寬量測工具 Spruce，並且將 Spruce 與 IGI 及 Pathload 進行比較，發現 Spruce 量測過程所需的時間較短、準確性最高，並且在量測過程中對

網路效能影響最小，除此之外也可以準確量測具有單一 bottleneck 的 multihop paths 之網路可用頻寬。Huiming Wang[20]等人則提出基於類似 Spruce 機制的 PGM 模型實作 TSprobe，以兩階段的探測方式量測網路可用頻寬，TSprobe 沒有 tight link 與 narrow link 必須要是相同 link 的限制，亦可在未知 bottleneck link capacity 的情況下運作，在該論文中亦將 TSprobe 與 Pathload、pathChirp、IGI 與 Spruce 所需的探測封包數量進行實驗比較，證明 TSprobe 所需的探測封包較少，且準確也相當高。

Li Lao 等人在文獻[21]中，比較 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具在 Multihop paths 上的表現，發現在 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具在 Multihop paths 情境的量測結果並不準確，並且會傾向於低估網路可用頻寬。DONG-YAN ZHANG 等人[22]則在實際的網路環境以 single hop 的拓樸對 Pathload、IGI、pathChirp 及 Spruce 進行比較，發現 pathload 的準確度最高，但由於注入的偵測封包流量太大，並不建議在真實環境使用。Emanuele 等人在文獻[23]中以真實的網路設備與電腦對目前許多網路可用頻寬量測工具進行比較，比較的結果發現採用 PRM 模型的工具如 Assolo、Pathload、YAZ 的準確度較高，並且能夠反應漸增的背景流量。

## 2.2 NCTUns 網路模擬器

在本論文中的網路模擬實驗是採用 NCTUns[4][5][24][26]網路模擬器做為模擬平台，NCTUns 網路模擬器是由國立交通大學所發展，目前 NCTUns 已經廣泛的支援了各種網路的標準與規格，例如：Ethernet、光纖網路、IEEE 802.11 a/b/e/p、GPRS、WiMAX (IEEE 802.16 d/e/j)、衛星網路 DVB-RCS 等。讓網路議題的研究者能夠使用這個平台，依照其需求自訂所需的網路模擬環境，並設計不同的模擬情境以進行模擬與研究。

NCTUns 網路模擬器是一個優秀的網路模擬平台，目前廣泛的被全世界許多國家的使用者採用，做為在學術領域或商業領域進行網路行為研究時的工具平台。NCTUns 具備下列的特性與優點：

1. 使用真實世界中的傳輸層與網路層的協定堆疊 (Protocol Stack)，能產生精確的模擬結果。
2. 真實世界的應用程式大多在不經修改的情形下可以直接運行於此模擬器上。
3. 具有高度整合性的使用者圖形化介面 (Graphical User Interface)，提供便捷的操作方式進行模擬情境的設計、執行與模擬結果檢視。

NCTUns 在架構的設計上包括了下列幾個基本的元件：(1) 修改後的 GNU/Linux 核心、(2) NCTUns 圖形化使用者介面、(3) NCTUns 模擬引擎、(4) NCTUns 協定模組(Protocol Modules)。透過對於 GNU/Linux 核心的修改，NCTUns 提供真實世界中各種利用 Socket 介面撰寫之網路應用程式在不經修改的情況下，可以直接做為模擬環境中任一網路設備上所運行的應用程式。因此 NCTUns 能夠模擬在各種網路情境下應用程式與網路的運作行為。NCTUns 的圖形化使用者介面則提供了一般使用者直接以所見即所得的方式，在 NCTUns 模擬器上進行拓樸的設計規劃，使得使用者可以在不用學習任何腳本(Script) 設計的情況下運作 NCTUns 完成網路的模擬研究。而在 NCTUns 模擬引擎的部份，則提供了對於時間、事件、排程、封包裝填等重要工作一套完整的 API，讓通訊協定的開發人員能夠操作相關的 API 快速進行開發；而通訊協定模組的設計對於任意的網路設備協定堆疊(Protocol Stack) 採用了模組化



的設計，透過此設計可以使得使用者在開發自己所需的模組後，只需要以替換或加入該模組的方式，即可使得其所設計之模組得以直接在模擬世界中運行。NCTUns 的模組化設計如圖 3 所示：

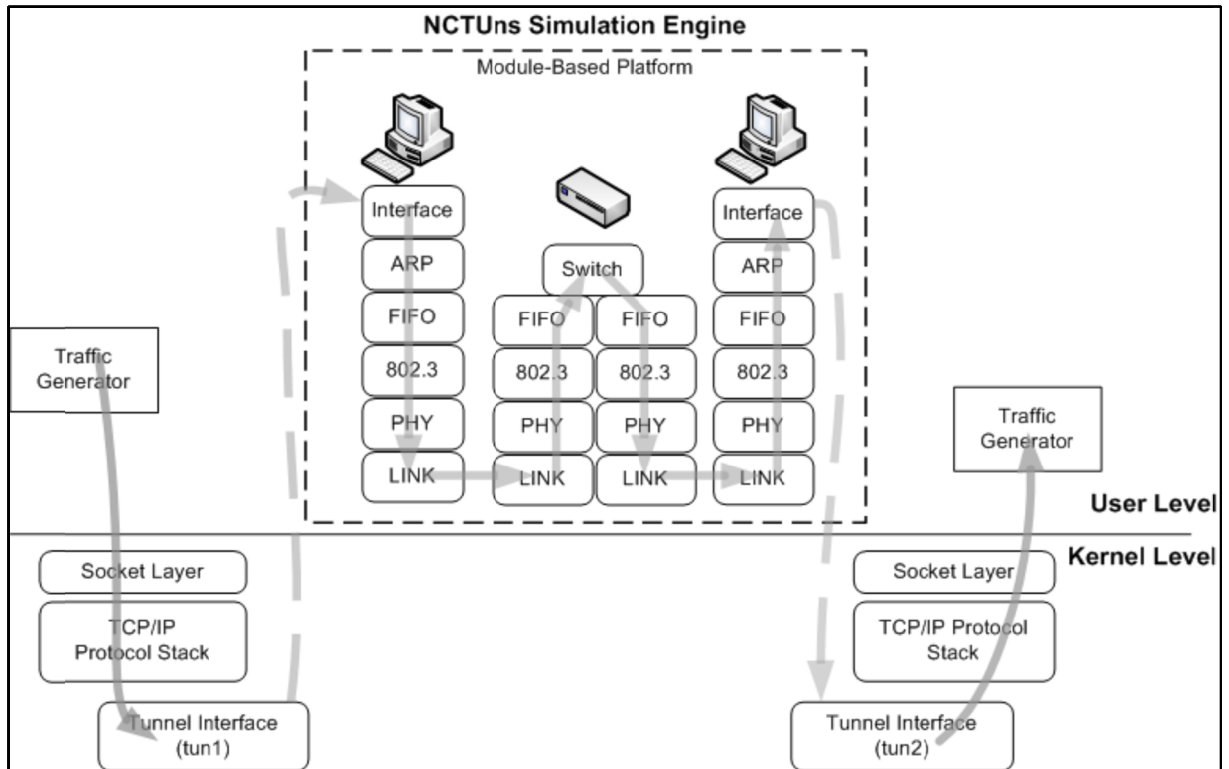


圖 3、NCTUns 模組化架構圖

資料來源：[26]

NCTUns 除了以 GUI 的方式操作之外，對於大量、批次的模擬工作，NCTUns 也提供以 Standalone[26]的模式運作，讓使用者設計好所要執行模擬的模擬案例並準備好相關的網路拓樸、背景流量以及其他執行模擬所需的設定檔之後，以 script 指令方式控制 NCTUns 進行網路模擬，對於大量的批次模擬工作具有極佳的便利性。

### 2.3 網路流量分析研究

在本論文中，我們計畫對 Spruce 進行深入的探討，包含研究在類似真實網路環境下的不同背景流量組合對於量測結果的比較分析。在文獻[27][28]中，Min Zhang 等人研究在數個骨幹網路上的 TCP 與 UDP traffic，發現在近幾年 UDP 協定所佔的比例逐年上升，不論是 UDP packet 的數量、UDP flow 的數量、以及 UDP 資料的資料量都呈現這樣的趨勢，分析的結果如表 1 所示：

表 1、骨幹網路上 TCP 與 UDP 比例表

Trace	Sample	UDP/TCP Ratio			Total IP Traffic (pkts/bytes/flows)
		pkts	bytes	flows	
<a href="#">CAIDA-OC48</a>	08-2002	0.11	0.03	0.11	(1371M/838GB/79M)
	01-2003	0.12	0.05	0.27	(463M/267GB/26M)
<a href="#">GigaSUNET</a>	04-2006	0.06	0.02	1.06	(422M/294GB/9M)
	11-2006	0.08	0.03	1.45	
<a href="#">CAIDA-OC192</a>	06-2008	0.14	0.05	1.43	(4427M/2279GB/197M)
	02-2009	0.19	0.07	2.34	(1922M/1410GB/110M)
<a href="#">OptoSUNET</a>	01-2009	0.21	0.11	3.09	(1100M/657GB/41M)

在文獻[29]中，該機關對北非、南非、南美、中東、西歐、南歐、西南歐、德國等 8 個地區進行統計與分析，發現自 2006 年開始，P2P 的流量逐年成長，主要以 P2P file sharing、多媒體串流服務等應用成長最為迅速，在 2009 年時，P2P 已是網路最主要的服務協定(見表 2)。

文獻[29]分析各種不同的網路服務之流量後，發現其平均下行的 packet size 為 789bytes，該文獻統計各種協定的封包大小分析結果如表 3。在我們的模擬案例中，對於各種 UDP 背景流量除了 Greedy UDP 以外，傳送的 packet size 均使用該文獻中的下行平均 packet size 789 bytes；在探討 UDP 與 TCP 流量混合的案例中，則以接近真實網路流量的比例組合來進行研究，其中 UDP 流量所佔全部流量的比例為 0.11。

表 2、各種通訊協定比例表

Protocol Class	Southern Africa	South America	Eastern Europe	Northern Africa	Germany	Southern Europe	Middle East	South-western Europe
P2P	65,77%	65,21%	69,95%	42,51%	52,79%	55,12%	44,77%	54,46%
Web	20,93%	18,17%	16,23%	32,65%	25,78%	25,11%	34,49%	23,29%
Streaming	5,83%	7,81%	7,34%	8,72%	7,17%	9,55%	4,64%	10,14%
VoIP	1,21%	0,84%	0,03%	1,12%	0,86%	0,67%	0,79%	1,67%
IM	0,04%	0,06%	0,00%	0,02%	0,16%	0,03%	0,50%	0,08%
Tunnel	0,16%	0,10%	-	-	-	0,09%	2,74%	-
Standard	1,31%	0,49%	-	0,89%	4,89%	0,52%	1,83%	1,23%
Gaming	-	0,04%	-	-	0,52%	0,05%	0,15%	-
Unknown	4,76%	7,29%	6,45%	14,09%	7,84%	8,86%	10,09%	9,13%

資料來源：[29]

表 3、Protocol packet size 統計表

Protocol	Down-stream Packet Size (Bytes)	Upstream Packet Size (Bytes)	Average Packet Size (Bytes)	Protocol	Down-stream Packet Size (Bytes)	Upstream Packet Size (Bytes)	Average Packet Size (Bytes)
All	789	281	556	Pando	931	359	688
Ares	718	454	589	POP	1032	72	672
AVI	1415	108	1015	PPLive	1067	325	691
BitTorrent	771	370	587	PPStream	602	387	496
DirectConnect	672	266	479	QQ	440	109	308
DNS	155	64	107	QQLive	56	1034	417
eDonkey	793	413	610	QuickTime	1474	48	1015
File hosting	1468	54	1014	RDP	149	94	124
Flash	1454	50	974	Realmedia	1441	51	966
Freenet	228	136	182	RTP	825	125	723

FTP	1303	148	902	RTSP	1211	54	824
Gnutella	636	241	452	SIP	156	144	150
GRE	405	218	324	Skype	214	196	205
H323	79	101	89	SMTP	103	169	138
HalfLife2	188	86	138	SopCast	602	214	423
HTTP	1153	187	758	Soulseek	759	536	654
ICMP	61	55	58	SSH	667	83	410
IMAP	656	221	374	SSL	740	229	512
iMesh	459	471	465	Steam	1438	48	1013
IPSEC	432	166	297	Telnet	202	62	129
IRC	299	58	177	Thunder	623	320	476
Manolito	1008	343	852	Tor	848	360	649
MMS	1207	48	788	TVAnts	677	194	455
MPEG	1393	51	940	TVUPlayer	516	131	346
MSN	348	278	312	UUSee	776	96	471
NTP	76	76	76	VNC	113	190	150
OGG	1159	53	802	Windows Media	1355	51	886
OpenVPN	635	494	560	World of Warcraft	248	56	161
ORB	179	57	103	XMPP	357	96	224
Oscar	59	70	65	Yahoo	181	201	189

資料來源：[29]

### 三、PGM 工具—Spruce 的設計原理

#### 3.1 Spruce 簡介

Spruce 是 J. Strauss[3] 等人採用 PGM 模型所提出的網路可用頻寬量測工具，在 Spruce 的設計中，偵測網路可用頻寬所送出的 packet pair 是由兩個傳送時間差為固定間距(intra pair gap)的 packets 組成；而在所有 Spruce 傳送的 packet pairs 之間，packet pair 與 packet pair 的間距(inter pair gap)配置方式則是採用 exponential 分配。Spruce 具有偵測快速、偵測時注入網路的封包數量較少、偵測結果正確、對網路可用頻寬變化反應迅速以及偵測結果相對誤差較少的優點。

#### 3.2 Spruce 的假設與限制

Spruce 如同其他採用的 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具，都具有以下的假設與限制：

1. 假設在探測路徑上只有單一的 bottleneck link，且與 tight link 及 narrow link 是相同的 link，並且該 link 的頻寬  $C$  已知。
2. 在探測路徑上的所有 router 都具有 FIFO queue，且在 packet pair 中的第一個封包被傳送端送出直到 packet pair 中的第二個封包被送達接收端的這段期間，queue 不會被清空。
3. 假設背景流量都是連續的流體交通模型(fluid traffic model)，在此模型下，我們把背景流量視為均勻的連續位元流，就如同水流一般。因此，若背景交通之流量為  $R$ ，packet pair 中相鄰兩探測封包傳送時間之間隔為  $\delta_{in}$  的情況下，packet pair 中兩探測封包的傳輸過程中會穿插傳送  $R * \delta_{in}$  的背景資料量。
4. 假設背景流量的平均速率改變非常緩慢，在單一探測的期間，可以將背景流量速率視為常數。

#### 3.3 Spruce 設計架構

Spruce 的設計上假設 bottleneck link 上的頻寬  $C$  是已知的。在 Spruce 的傳送端，Spruce 會先設定一個 intra pair gap  $\delta_{in}$ ，這是

傳送端送出的 packet pair 中，第一個 packet 與第二個 packet 之間距。在 Spruce 的接收端則會記錄收到 packet pair 中兩個 packets 的間距  $\delta_{out}$ ，然後將  $C$ 、 $\delta_{in}$ 、 $\delta_{out}$  代入公式 5，可以計算出本組 packet pair 所探測出的網路可用頻寬  $A$ 。

在 Spruce 的傳送端，預設傳送的 packet size 是 1500 bytes，扣除 28 bytes 的 UDP 及 IP header 後，程式實際送出的資料是 1472 bytes。Spruce 所設定的  $\delta_{in}$  是 bottleneck link 傳送 1500 bytes data packet 所需要花的時間。這樣的設計可以使得在 packet pair 中第一個 packet 送出直到 packet pair 中第二個 packet 送達接收端的期間，queue 不會是空的。接收端在收到探測的 packet pair 並計算  $\delta_{out}$  之後，將數值代入公式 5 計算出該組 packet pair 所量測出的網路可用頻寬  $A$ ，持續這樣的過程共  $K$  次， $K$  預設為傳送 100 組 packet pairs 進行探測，然後將各組 packet pairs 的量測值計算簡單算術平均後做為量測結果。

在 Spruce 的設計中，兩組 packet pairs 之間的 inter pair gap 是以 exponential 分配的方式規劃，這個分配的平均值是遠大於 packet pair 中兩個 packet 的 intra pair gap 的。這樣的設計可以確保 Spruce 的探測封包不會影響到原本網路的效能。Spruce 在探測過程中會傳送一系列的 packet pairs 進行網路頻寬偵測，在 packet pairs 中的 packets 都是大小為 1500 bytes 的 UDP 封包。在開始傳送之前，傳送端會先計算 packet pair 之間的 inter pair gap，來確保探測封包的速率被調整為 240Kb/s 或是 bottleneck link 頻寬的 5%，取兩者中較小的值做為探測封包傳送的速率。例如，在一個 bottleneck 是 1.5Mb/s 的路徑上，inter pair gap 會被設定為 320ms，相當於探測封包的流速是 75Kb/s。

在傳送端進行傳送探測封包的過程中，Spruce 會使用 polling loop 不停的讀取系統時間，並判斷是否該要送出下一個探測的 packet，在傳送探測封包的過程中，Spruce 程式不會讓出處理器的時間，直到 packet pair 已被送出之後，Spruce 才會交出處理器資源。如果在 Spruce 傳送 packet pair 的第一個封包與第二個封包之間，作業系統 reschedule 使得 Spruce 讓出處理器時間，則當 Spruce 重新取得處理

器使用權後，Spruce 會放棄傳送該 packet pair 中的第二個封包，並且開始傳送下一組 packet pair。

在 Spruce 的接收端收到傳送端送出的 UDP 探測封包時，Spruce 會使用 SO\_TIMESTAMP 這個 socket option，記錄下在收到每個封包時的 kernel timestamps，然後 Spruce 可以比較 packet pair 中的第一個封包與第二個封包的 timestamp，算出這組 packet pair 的  $\delta_{out}$ 。最後將  $C$ 、 $\delta_{in}$ 、 $\delta_{out}$  代入公式 5 計算出該組 packet pair 所測量出的網路可用頻寬。

### 3.4 Spruce 特性

前面我們對 Spruce 的假設與設計做了詳細的說明，歸納 Spruce 這個網路可用頻寬量測工具的特性如下：

1. Spruce 在各個 packet pair 之間的時間配置是採用 exponential 分配，而不是使用 packet trains 或是固定 inter pair gap 的方式進行偵測。
2. Spruce 在 packet pair 內各 packet 間之 intra pair gap 經過仔細的設計，以確保 bottleneck queue 在 packet pair 內的封包進行探測的期間不會是空的。
3. Spruce 在設計時將網路可用頻寬量測的工作與鏈路頻寬量測的工作切割，專注在進行網路可用頻寬量測之上。
4. Spruce 在探測期間並不會送出造成 narrow link 發生壅塞的探測流量。

## 四、Spruce 量測機制的改良

在將 Spruce 移轉到 Fedora Core 12 並使 Spruce 在 NCTUns 模擬器順利運作的過程裡，我們觀察 Spruce 的執行並配合 trace Spruce 的原始碼，發現 Spruce 的原量測機制設計中，有幾個部份需要進行修正與改良，分別說明如下：

### 4.1 改良原有程式邏輯以提升執行效能

在 Spruce 的論文與其程式的設計實作中，處理 packet pair 中第一個 packet 與第二個 packet 之間的 intra pair gap 是使用強佔處理器資源的方式設計，這是為了使第二個 packet 被傳送的時間距離第一個 packet 傳送的時間能夠盡可能的接近  $\delta$  in，但這樣的設計方式一方面造成了處理器資源被佔用，在探測的過程中會影響到其他程式的運行，另一方面，在 NCTUns 的模擬平台上，程式運作的機制是由模擬器 fork 出新的執行緒來執行模擬環境中各節點上的應用程式，Spruce 這樣的設計會使模擬器的運作效能相當遲緩。

我們修正了 Spruce 在處理 intra pair gap 的機制，將原本使用 loop 方式強行佔住處理器資源的程式碼片段進行改寫，使程式在 packet pair 中第二個 packet 等待被傳送的時間內會暫時讓出處理器資源，並使第二個封包送出的時間能盡可能的接近原始的設計。

除此之外，目前程式在處理 inter pair gap 的機制是先進行 inter pair gap 的計算，然後依照所要傳送的 packet pairs 數量開啟一個陣列，並將預定傳送 packet pairs 的時間寫入陣列之中。在兩組 packet pairs 之間等待傳送的時間仍是使用 loop 的方式佔住處理器資源等待。我們將此部份的實做改為在每次送完一組 packet pair 之後，才計算傳送距離下一組 packet pair 的傳送間隔  $d$ ，然後讓程式在 packet pair 與 packet pair 傳送間隔的時間將處理器資源讓出，這樣改良後的處理機制對於整體系統的運作效能以及與其他應用程式的協同工作會有較好的效率。

在經過我們上述所執行的效能改良之後，經由進行模擬實驗並分析模擬執行的效能與結果，我們確認效能改良後的 Spruce 實作在執行模



擬的效能確實有所提升，並且這樣的修改不會影響到量測結果的正確性。

#### 4.2 對於原設計之探測封包間距計算方式的改良

Spruce 的實作希望 packet pair 中的兩個封包是 back to back 的被傳送，假設 packet pair 中的 packet size 是  $L$ ，Spruce 在定義 intra packet gap ( $\delta in$ ) 時，是套用公式 6 的計算來求得所要使用的  $\delta in$  間隔大小。在比對 Spruce 傳送端與接收端的程式之後，我們發現 Spruce 在傳送端是如同公式 6 以傳送的 packet size  $L$  與 bottleneck 的頻寬  $C$  去計算出  $\delta in$ ；而在接收端是以  $L / \delta in$  去反推出 bottleneck link 的頻寬  $C$ 。在原設計的實作中，傳送端使用不含 UDP 及 IP header 的 packet size 為 1472 bytes 計算出  $\delta in$ ，但在接收端卻使用包含 UDP 及 IP header 的 packet size 1500 bytes 去反推 bottleneck link 頻寬  $C$ ，因此計算出的可用頻寬結果將被放大  $(1500/1472)=1.9\%$ 。我們修正原設計中收與送兩端在計算時使用的 packet size，都一致的使用 1500 bytes 來進行計算。

在 Spruce 原設計中，程式送出的 UDP 封包大小是 1472 bytes，加計 UDP header 與 IP header 之後合計是 1500 bytes，但我們認為 Spruce 程式在使用公式 6 計算  $\delta in = L / C$  時，應以真正在 link 上傳送的 packet size 來計算。因此除了計算 UDP 以及 IP header 之外，應該還要加計 Ethernet header 的大小才是真正在 link 上傳送的資料量。在將 Ethernet header 納入計算之後， $\delta in$  的設定數值也將隨之改變。我們的實作在 intra packet gap 的決定上加入考慮 Ethernet header 長度的選項，並比較是否計入 Ethernet header 對量測結果的影響。

經由進行模擬實驗並分析模擬執行的量測結果，我們確認改良探測封包間距考慮 Ethernet header 後的 Spruce 實作在執行模擬的量測結果正確性確實有所提升。

#### 4.3 對原設計量測參數之擴充

如同前一章所述，在 Spruce 的原設計中，packet pair 與 packet pair 之間的 inter pair gap 配置是採用 exponential 分配，我們想探討 inter pair gap 使用 exponential 分配或是其他分配對於量測結果的影響。

在我們的實作中，對於配置 inter pair gap 的邏輯我們加入了 uniform 分配的選項，並透過模擬實驗分析 Spruce 在各種情境下採用不同 inter pair gap 的對於量測結果正確性的影響。

#### 4.4 對於原設計量測結果評估方式之改良

Spruce 原設計的量測機制是依序送出  $K$  組(預設  $K=100$ )的 packet pairs 進行網路可用頻寬量測，接收端在每次收到一組 packet pair 之後便將該組 packet pair 抵達接收端時的間距  $\delta_{out}$  代入公式 5，得到該組 packet pair 所量測得到的網路可用頻寬值。然後將所有 packet pairs 測出有效的量測值計算簡單算術平均數做為量測結果。接收端只有當每組 packet pair 的兩個 packets 都成功的接收到才會將該組結果視為有效的量測值並納入運算，如果 packet pair 中的任一 packet 沒有被接收端收到的話，Spruce 會忽略掉該組 packet pair 中所收到的 packet，不納入量測結果的計算。

我們觀察各種不同條件下 Spruce 所送出  $K$  組探測 packet pairs 的量測結果之後發現，在某些測試情境之下，Spruce 的  $K$  組頻寬偵測 packet pairs 會有部份量測值是負數。若將這樣的量測值代入公式 5 來評估，則表示接收端收到的  $\delta_{out} > 2$  倍傳送端的  $\delta_{in}$ ；若以公式 4 來看，這樣的量測值表示網路頻寬的使用率  $> 100\%$ ，我們認為如果將這樣的量測值直接納入結果的統計並不合理，並且可能是 Spruce 傾向於低估網路可用頻寬[21]的原因之一。在我們的實作中，若某組 packet pair 所量測出之網路頻寬使用率  $> 100\%$ ，我們會認定為在該組 packet pair 量測當時，網路頻寬已 100% 使用，並將該組 packet pair 量測的網路可用頻寬結果視為 0。

在實際的網路世界中，背景流量可能是叢集式的網路流量，與 Spruce 假設的流體交通模型這種均勻且連續的流量有所不同。我們發

現在某些頻寬使用率較高的情況下，Spruce 所量測出的網路可用頻寬果會較當時網路狀況的實際數值超出許多，通常會高出 20-40%。在實際觀察 Spruce 接收端收到的 packet pairs 後發現，在網路頻寬使用率較高的情況下，接收端有時無法完整的收到傳送端所送出的 packet pair 中的兩個 packets，未完整送達接收端的 packet pairs 會被認定為是無效的探測，而使得在評估量測結果時所使用的 packet pairs 組數較預期的樣本數少；並且在網路頻寬使用率較高的情況下，成功送達接收端的這些 packet pairs 的個別測量結果通常有高估網路可用頻寬的傾向。經由觀察 Spruce 量測的結果，我們認為當傳送端所送出的 packet pairs 有 30%以上無法完整的送到接收端時，當時的網路頻寬使用率通常已達到 90%以上。在這樣的情況下，我們認為應該認定為當時的網路可用頻寬已幾乎全部使用，而不是如原 Spruce 的設計以部份 packet pairs 的量測值來評估得出當時的網路使用率。以避免過於高估當時的網路可用頻寬。



## 五、模擬環境與模擬結果

### 5.1 研究與模擬方式

在本論文的研究中，我們想要深入探討 Spruce 這個網路可用頻寬量測工具在各種不同情境與參數設定的情況下，對於網路可用頻寬量測結果之準確性的影響；並比較原有之 Spruce 機制與在我們改良後的設計對於模擬效能與量測結果的改善情形。

我們首先對於不同的模擬情境參數進行分類如表 4，將各種不同的網路分類搭配想要研究的模擬設計，並設定不同的背景流量與已使用之頻寬，定義出各種的模擬案例。以定義出的模擬案例執行模擬並計算各個模擬案例結果的平均值與標準差後，將模擬結果進行整理、分析與歸納。

表 4、模擬情境參數分類表

情境參數	說明
網路分類	將我們模擬所使用之網路拓樸及所搭配的不同鏈路頻寬組合進行分類。
模擬設計	針對所要探討的主題進行分類，以控制 Spruce 不同變因子的方式進行研究分析，例如模擬設計 A 是要針對 Spruce 在我們改良前後對於量測效能的比較。
背景流量	對於模擬所使用的背景流量組合進行分類，包含 UDP 及 TCP 流量，以及兩者的混合。
已使用頻寬	對不同的頻寬使用率進行分類，做為在設計模擬案例時使用。同時已使用頻寬的分類也包含在 Spruce 探測過程中可用頻寬不是常數，會有所變化的情形。

我們進行研究與模擬的流程如下圖所示：

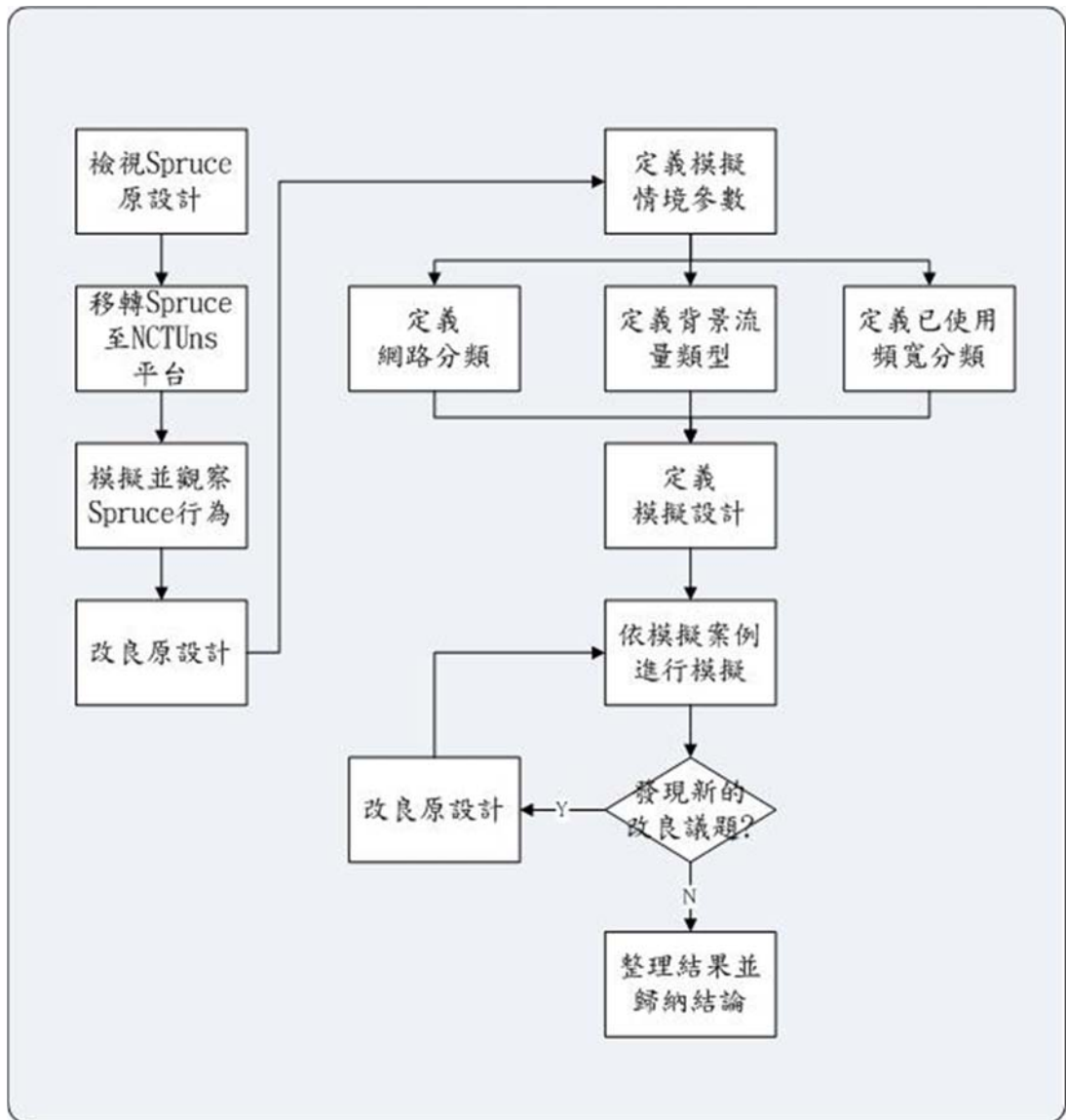


圖 4、研究與模擬流程圖

## 5.2 模擬環境簡介

本論文所進行的各項模擬實驗是採用 Fedora Core 12 搭配 NCTUns 模擬器，NCTUns 所使用的 Fedora Core 12 作業系統是以虛擬機器的方式架構在 MS Windows 平台上，進行各種網路頻寬偵測行為的模擬研究。本論文模擬實驗環境的軟硬體架構圖如圖 5 所示，模擬環境所使用之軟硬體設備請參見 5.2.1、5.2.2。

### 5.2.1 硬體設備

本論文的模擬實驗所使用之硬體實體機器規格與虛擬機器之硬體規格說明如表 5：

表 5、模擬環境所使用之硬體設備

實體/虛擬機器	項目	規格
實體機器	CPU	Intel Core i7 2600
實體機器	記憶體	8GB
實體機器	硬碟空間	2TB
虛擬機器	CPU	Intel Core i7 2600
虛擬機器	記憶體	1.5GB
虛擬機器	硬碟空間	20GB

### 5.2.2 軟體設備

本論文所進行之網路模擬實驗是以虛擬機器的方式安裝 Fedora Core 12 供 NCTUns 網路模擬器在其上運行。NCTUns 所運行之軟體環境與實體機器之軟體環境說明如表 6：

表 6、模擬環境所使用之軟體設備

實體/虛擬環境	項目	版本
實體環境	作業系統	Windows Server 2008 R2 企業版
實體環境	虛擬機器程式	VMWare Workstation V7.1.1
虛擬環境	作業系統	Fedora Core 12

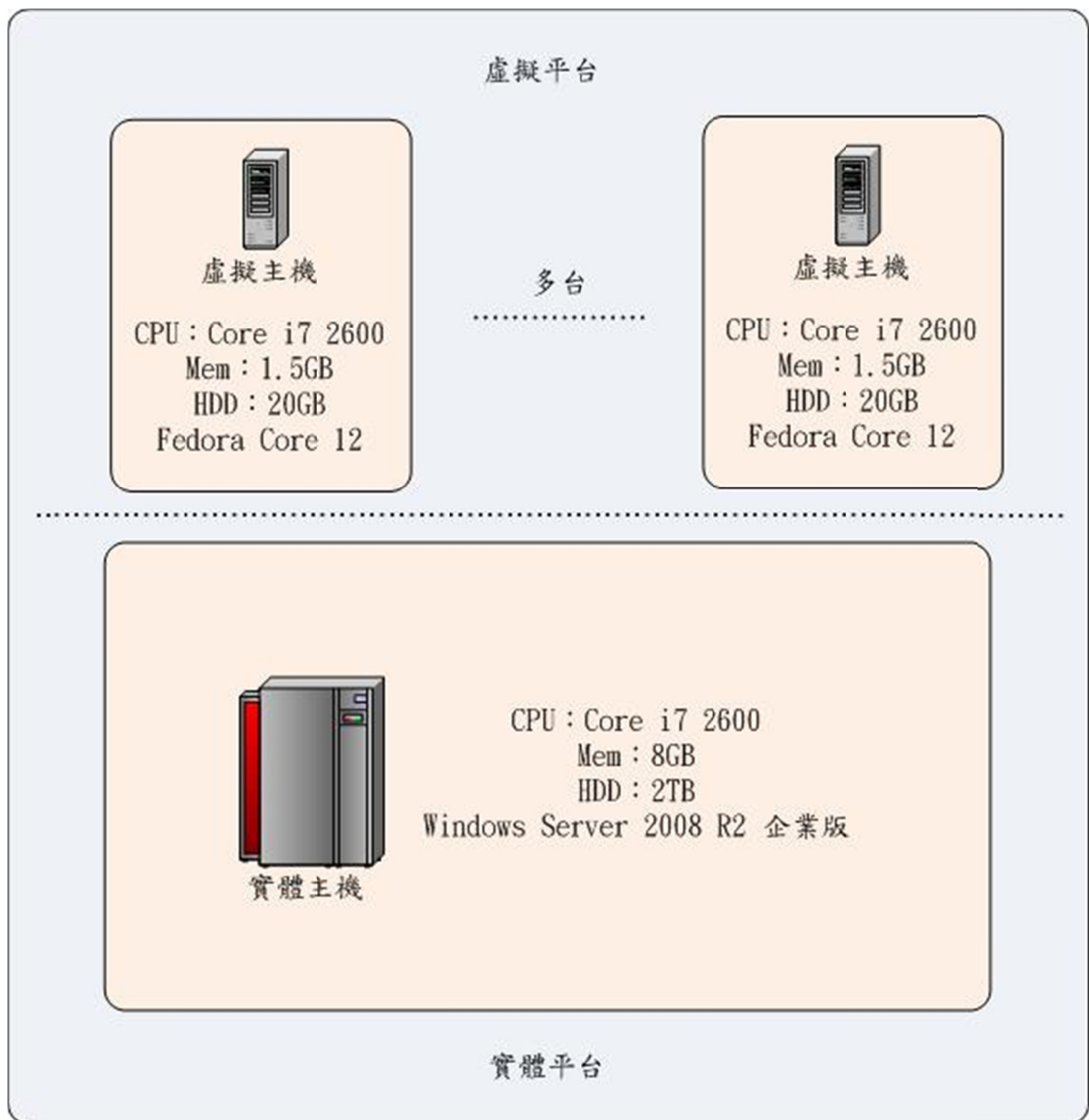


圖 5、模擬實驗環境軟硬體架構圖

### 5.2.3 工具軟體版本與用途

在本論文中，由於模擬案例與總模擬次數較多，使用人工執行方式過於費時且不具可行性，因此我們以程式的方式產生所需的模擬設定檔案再經人工檢核，並以批次方式使用 NCTUns 的 standalone 模式執行模擬工作與蒐集模擬結果。本論文所使用的工具軟體版本與用途說明如表 7：

表 7、工具軟體版本與用途

工具軟體及版本	用途說明
MS Visual Studio 2010	1. 製作各種情境之流量產生程式的設定檔 2. 改良 Spruce 之程式撰寫工具
gcc	Fedora 上編譯 Spruce 之編譯程式
Shell script	1、產生模擬平台之流量設定檔 2、批次執行模擬工作 3、匯整所有模擬結果
MS Excel 2010	整理與分析模擬結果，並繪製圖表
Visio 2007	繪製流程圖





### 5.3 模擬情境參數

在定義本論文所要執行模擬之模擬案例前，我們先將各種不同的模擬情境參數進行分類，在設定模擬案例時，將依所要探討之各個議題的模擬設計搭配各種模擬情境參數，定義出不同的模擬案例。在本節中，我們將介紹我們使用的網路拓樸型式，然後對網路分類、背景流量類型、已使用頻寬之分類進行說明，並說明在我們模擬實驗中的各種背景流量路徑與量測路徑。

#### 5.3.1 拓樸型式

在本論文中，我們預計採用 single hop 與 multi hops 兩種不同的網路拓樸型式，以下將分別說明我們在模擬過程中所使用的拓樸：

##### 1. 拓樸 A

拓樸 A 的型式如圖 6，是由 2 個路由器及 4 個節點所組成的 single hop 網路拓樸，在本拓樸中，route 1 與 router 2 之間的 link 是 bottleneck link。

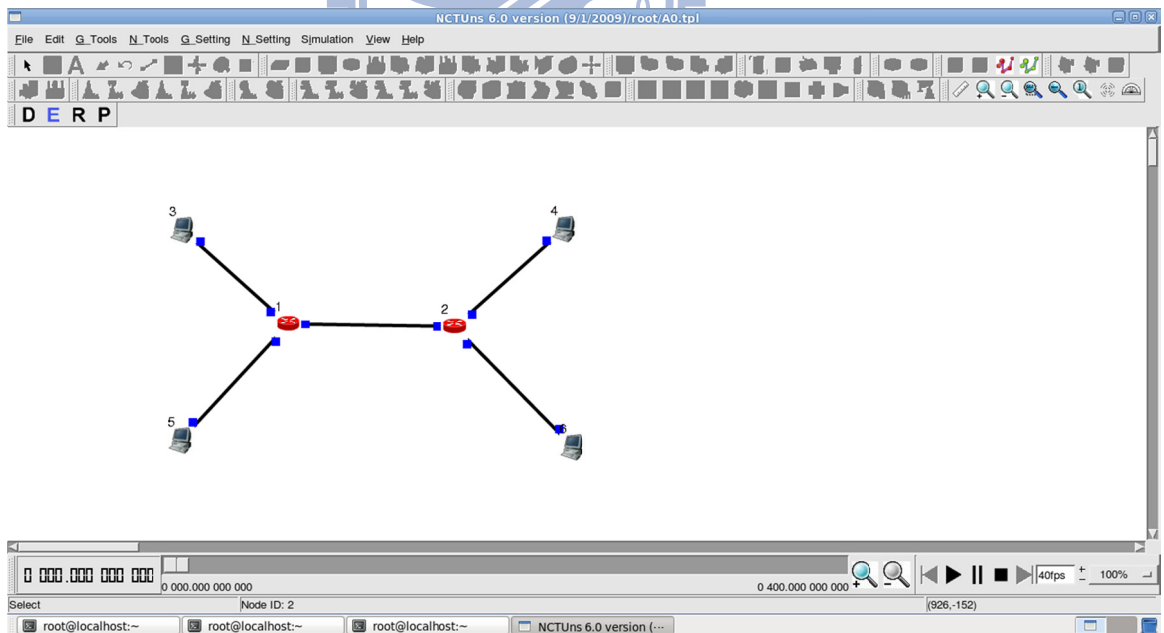


圖 6、拓樸 A

## 2. 拓樸 B

拓樸 B 是拓樸 A 的延伸，我們預計使用這個 multi hops 的網路拓樸型式來探討在多個 link 都有背景流量時，使用網路可用頻寬量測工具進行量測的結果。拓樸 B 的型式請參見圖 7。

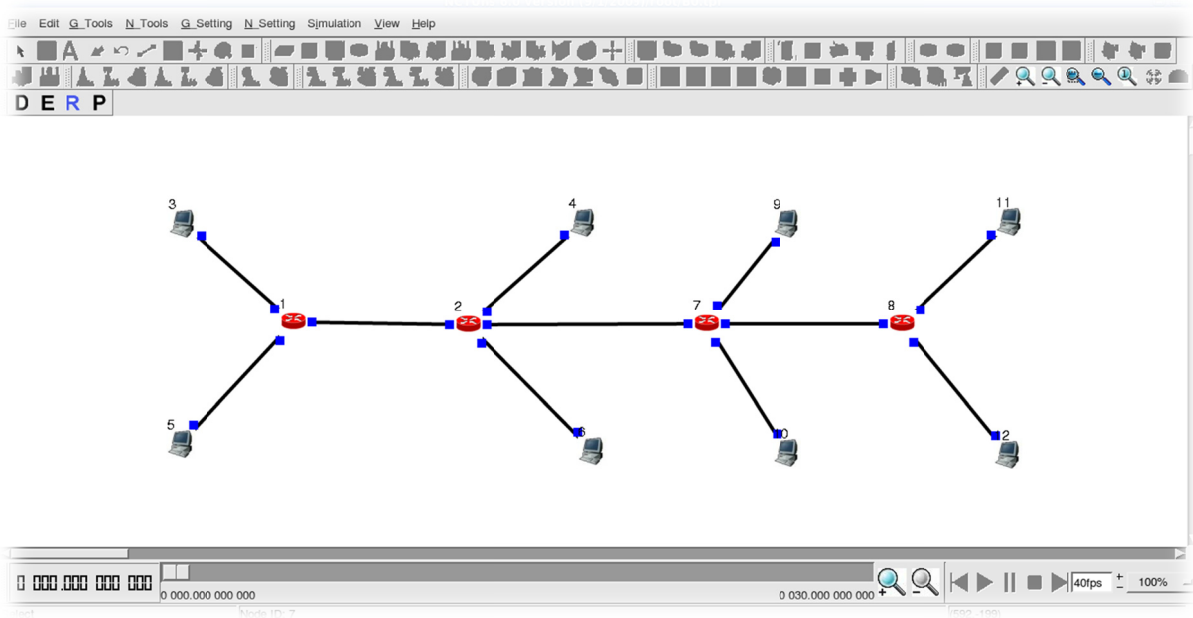


圖 7、拓樸 B



### 5.3.2 網路分類

在本論文中，我們將在前述不同的網路拓樸與不同的鏈路頻寬組合，分組成為模擬時所會使用的網路分類，做為在模擬環境中進行網路可用頻寬量測時使用。在本論文所定義的模擬案例中，我們將會使用的網路分類說明如表 8：

表 8、網路分類表

網路分類	拓樸型式	鏈路頻寬	網路可用頻寬量測方向
A	拓樸 A	1<->2 100Mbps 其他：雙向 1Gbps	6->5
B	拓樸 A	1<->2 10Mbps 其他：雙向 1Gbps	6->5
C	拓樸 B	1<->2、2<->7、7<->8 100Mbps 其他：雙向 1Gbps	12->5
D	拓樸 B	1<->2、2<->7、7<->8 10Mbps 其他：雙向 1Gbps	12->5
E	拓樸 B	1<->2、7<->8 100Mbps 2<->7 10Mbps 其他：雙向 1Gbps	12->5

### 5.3.3 背景流量類型

在本論文所研究的模擬案例中，我們也計畫探討不同網路背景流量類型對於量測結果的比較。我們所使用的背景流量包含 TCP 與 UDP，並探討 UDP 中不同 packet 傳送間隔分配與 packet size 分配對於網路可用頻寬量測結果的影響。在文獻[29]的結果中，統計八大區域平均下行的 packet size 是 789 bytes，我們所採用的 packet size 分配也將以 789 bytes 為平均值。此外，我們所使用的背景流量類型也將包含 self-similar UDP 以及 TCP 與 UDP 混合的流量。參考文獻[27][28]的資料，我們設定在所模擬的 TCP 與 UDP 混合背景流量中，UDP 所佔的比例是背景流量的 11%。在本論文中，我們所定義的背景流量類型請參見表 9。

表 9、背景流量類型表

背景流量類型	通訊協定	Packet 傳送間隔分配	Packet size 分配
A	UDP	constant	constant
B	UDP	uniform	uniform
C	UDP	uniform	exponential
D	UDP	exponential	uniform
E	UDP	exponential	exponential
F	UDP(self-similar)	--	--
G	UDP(greedy)	greedy	exponential
H	TCP(greedy)	--	--
I	UDP(self-similar) 佔流量 11% ，搭配 TCP(greedy)	--	--

#### 5.3.4 已使用之頻寬分類

在本論文的模擬情境中，我們對於 bottleneck link 上已使用的頻寬比例進行分類與編號，在我們所設計的模擬案例裡，我們將對各個模擬設計在各種不同已使用頻寬比例的情境下，執行網路可用頻寬偵測所得到的量測結果進行分析，本論文中所定義的已使用頻寬之分類說明如表 10：

表 10、已使用之頻寬分類表

已使用之頻寬分類	說明	定義
A	全部頻寬未使用	使用率 0 %
B	幾乎全部頻寬未使用	使用率 10 %
C	已使用少量頻寬	使用率 25 %
D	已使用一半頻寬	使用率 50 %
E	已使用大量頻寬	使用率 75 %
F	幾乎已使用全部頻寬	使用率 90 %
G	已使用全部頻寬	使用率 100 %
H	已使用頻寬隨時間不同變化	模擬過程： 0-3 秒使用率 25% 3-6 秒使用率 75% 6 秒之後使用率 50%

### 5.3.5 背景流量路徑與量測路徑

在本論文的模擬環境中，我們對不同的網路分類配置不同的背景流量路徑以及網路可用頻寬量測路徑，背景流量路徑與量測路徑如表 11 所述，網路分類與背景流量路徑、量測路徑說明如圖 8 及圖 9：

表 11、背景流量路徑與量測路徑表

網路分類	背景流量路徑	量測路徑
A、B	4->3	6->5
C、D、E	4->3、11->9、10->6	12->5

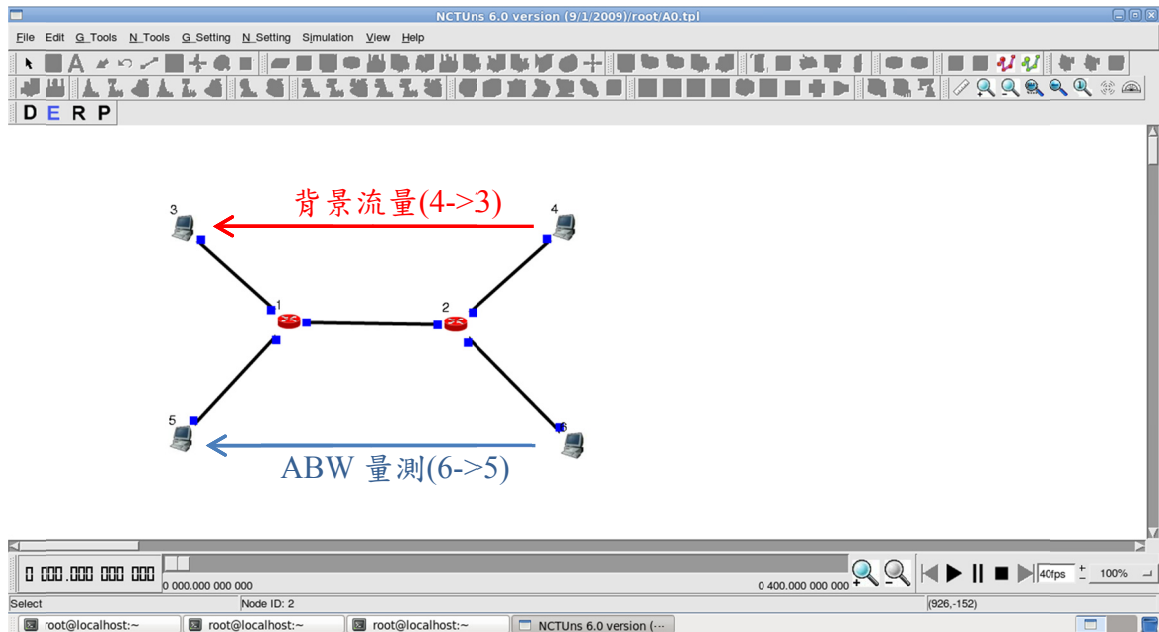


圖 8、拓樸、背景流量與可用頻寬量測路徑圖-1

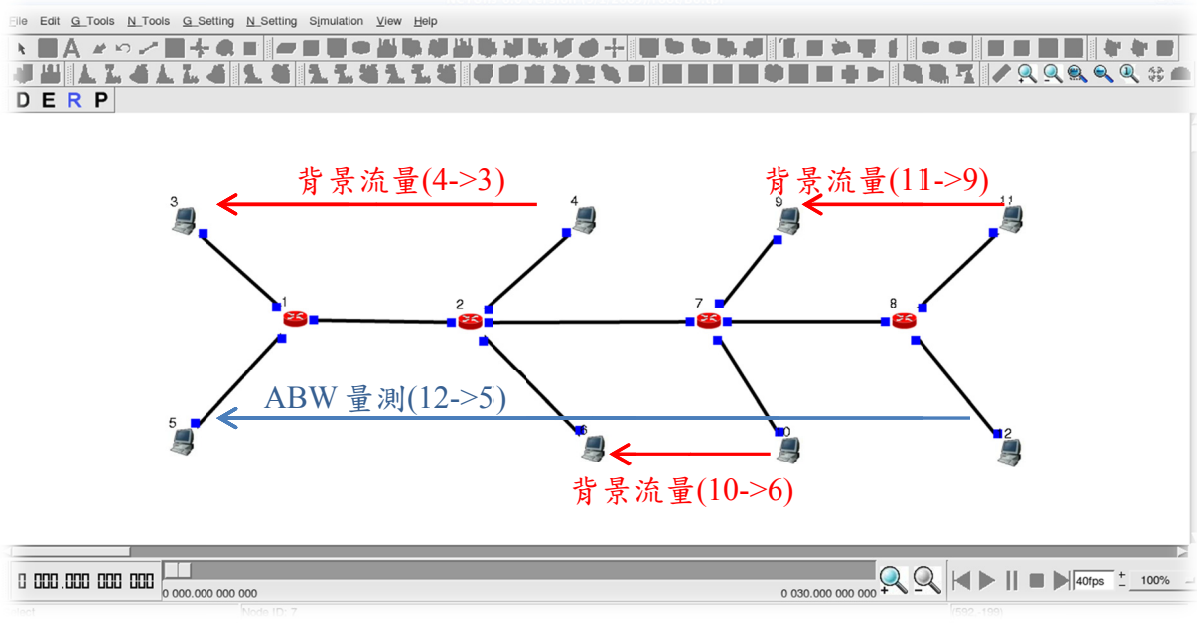
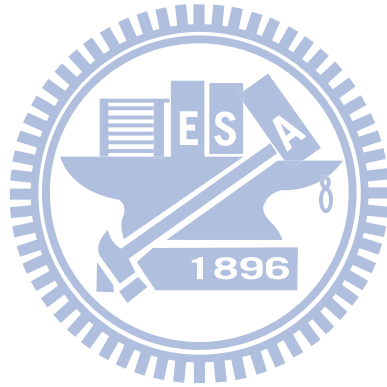


圖 9、拓樸、背景流量與可用頻寬量測路徑圖-2



#### 5.4 模擬設計

在本論文的規畫中，我們將想要探討的數個主題分別定義成不同的模擬設計，以比較 Spruce 原設計與我們改良後實作的結果。在每個模擬設計中，Spruce 的程式將分別設定為組別 0 及組別 1 兩組，以這兩組不同設定的模擬結果進行比較與分析。各模擬設計的設計目的、說明、以及在該設計中所使用之 Spruce 設定分別說明如下：

##### 1. 模擬設計 A

模擬設計 A 是為了比較對 Spruce 原設計進行效能改良前後之執行時間，確認效能改良成效。關於模擬設計 A 的設計目的與說明請見表 12；模擬設計 A 所使用之 Spruce 設定請見表 13：

表 12、模擬設計 A 之設計目的與說明

模擬設計編號	A
設計目的	比較對 Spruce 原設計進行效能改良前後之模擬執行所需時間，確認效能改良成效。
模擬設計說明	為了確認我們對 Spruce 所進行的效能改良確實有效，我們將原 Spruce 的設計與改良後的實作在各種不同的情境下進行模擬，以確認效能改良的有效性以及改善程度

表 13、模擬設計 A 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓				
1	✓	✓			



## 2. 模擬設計 B

模擬設計 B 是在模擬設計 A 確認了我們對 Spruce 效能改良的成效之後，進一步確認對 Spruce 原設計進行效能改良前後量測結果的正確性。關於模擬設計 B 的設計目的與說明請見表 14；模擬設計 B 所使用之 Spruce 設定請見表 15：

表 14、模擬設計 B 之設計目的與說明

模擬設計編號	B
設計目的	確認對 Spruce 原設計進行效能改良前後量測結果的正確性。
模擬設計說明	在確認我們對原 Spruce 所進行的效能改良確實有效後，我們還要對效能改良前後的量測結果差異進行比較，確認效能改良後量結果與原設計的差異程度。

表 15、模擬設計 B 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓				
1	✓	✓			

### 3. 模擬設計 C

我們認為當在使用公式 6 決定探測的 packet pair 中之 intra pair gap  $\delta_{in}$  時，packet size  $L$  應該是真正在 link 上傳輸的資料大小，所以該要以考慮 Ethernet header 之後的 packet size 代入公式 6 來決定  $\delta_{in}$ 。模擬設計 C 的設計目的就是比較 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響。關於模擬設計 C 的設計目的與說明請見表 16；模擬設計 C 所使用之 Spruce 設定請見表 17：

表 16、模擬設計 C 之設計目的與說明

模擬設計編號	C
設計目的	比較 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響
模擬設計說明	我們想要了解在考慮了 Ethernet header 之後，由於使用了不同的 $\delta_{in}$ 大小，對於使用原 Spruce 之 intra pair gap 設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 在量測結果的差異

表 17、模擬設計 C 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta_{in}$ 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓	✓			
1	✓	✓	✓		

#### 4. 模擬設計 D

模擬設計 D 的設計目的是比較使用不同 inter pair gap 分配對量測結果的影響。關於模擬設計 D 的設計目的與說明請見表 18；模擬設計 D 所使用之 Spruce 設定請見表 19：

表 18、模擬設計 D 之設計目的與說明

模擬設計編號	D
設計目的	比較使用不同 inter pair gap 分配對量測結果的影響
模擬設計說明	原 Spruce 設計 inter pair gap 是配置為 exponential 分配，我們想要探討如果改用相同平均值的 uniform 分配在各種不同情境下量測的結果差異

表 19、模擬設計 D 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓	✓	✓		
1	✓	✓	✓	✓	

## 5. 模擬設計 E

模擬設計 E 的設計目的是為了比較對 Spruce 原設計進行量測結果評估方式改良前後之結果差異。關於模擬設計 E 的設計目的與說明請見表 20；模擬設計 E 所使用之 Spruce 設定請見表 21：

表 20、模擬設計 E 之設計目的與說明

模擬設計編號	E
設計目的	比較對 Spruce 原設計進行量測結果評估方式改良前後之結果差異
模擬設計說明	在觀察原 Spruce 設計執行的結果後，發現對於量測結果的評估有不合理之處。在本模擬設計中，我們將比較在各種情境下，原 Spruce 設計與我們對結果的評估方式改良後的差異

表 21、模擬設計 E 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓	✓	✓		
1	✓	✓	✓		✓

## 6. 模擬設計 F

模擬設計 F 的設計目的是為了比較量測過程中，可用頻寬若發生變化對量測結果的影響。關於模擬設計 F 的設計目的與說明請見表 22；模擬設計 F 所使用之 Spruce 設定請見表 23：

表 22、模擬設計 F 之設計目的與說明

模擬設計編號	F
設計目的	比較量測過程中可用頻寬變化對量測結果的影響
模擬設計說明	我們想要針對量測過程中，若可用頻寬發生變化的情形對於量測結果的影響進行探討

表 23、模擬設計 F 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓				
1	✓	✓	✓		✓

## 7. 模擬設計 G

模擬設計 G 的設計目的是研究 Spruce 在 multi hops 環境下的量測結果。關於模擬設計 G 的設計目的與說明請見表 24；模擬設計 G 所使用之 Spruce 設定請見表 27：

表 24、模擬設計 G 之設計目的與說明

模擬設計編號	G
設計目的	研究 Spruce 在 multi hops 環境下的量測結果
模擬設計說明	我們想要探討在 multi hops 的環境下，各種不同背景流量與背景流量組成對於量測結果的影響

表 25、模擬設計 G 所使用之 Spruce 設定

組別	Spruce 原設計	效能改良	計算 $\delta$ in 時考慮 Ethernet header	使用之 inter pair gap 分配	使用改良後之量測結果評估
0	✓				
1	✓	✓	✓		✓

在本小節的最後，我們將上述本論文中各個模擬設計之設計目的整理如表 26：

表 26、模擬設計表

模擬設計	設計目的
A	比較對 Spruce 原設計進行效能改良前後之模擬執行所需時間，確認效能改良之成效
B	確認對 Spruce 原設計進行效能改良前後量測結果的正確性
C	比較使用 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響
D	比較使用不同 inter pair gap 分配對量測結果的影響
E	比較對 Spruce 原設計進行量測結果評估方式改良前後之結果差異
F	比較量測過程中可用頻寬變化對量測結果的影響
G	研究 Spruce 在 multi hops 環境下的量測結果

## 5.5 模擬案例

在本論文的研究中，我們將針對 Spruce 設計各種模擬案例進行大規模的研究，我們將前述之模擬情境參數與模擬設計結合，定義出我們所要進行模擬的 273 個模擬案例。在本論文中，我們所要進行模擬的模擬案例清單詳見表 27：

表 27、進行模擬之模擬案例清單

使用之 網路分類	採用之 模擬設計	使用之 背景流量類型	已使用之 頻寬分類
A、B	A-D	A	A-H
A、B	E	A-F	A-G
A、B	E	G、H、I	G
A、B	F	A-E	H
C、D	G	A、B、E	A-H
C、D	G	F	A-G
C、D	G	X(4→3 用 A 10→6 用 B 11→9 用 E)	A-H
E	G	A、B、E	A-H
E	G	F	A-G

### 5.5.1 模擬執行方式

在本論文的研究中，我們計畫對每個模擬案例比較 Spruce 原設計以及我們改良之後的實作所量測的結果。對於每個模擬案例，我們分別模擬執行 Spruce 原設計及我們改良後的實作各 5 次，再將 5 次量測的結果計算算術平均與標準差，然後整理模擬的結果進行分析。

在每次的模擬中，我們執行模擬的時間為 30 秒。在模擬開始後 0.5 秒我們開始加入背景流量；在模擬開始後 3 秒啟動 Spruce 進行網路可用頻寬量測，再記錄量測的結果進行統計與分析。



## 5.6 模擬結果與分析

在本節中，我們將依照各個模擬設計整理相對應之模擬案例的執行結果，將結果以圖表的方式呈現，並且將分析模擬結果了解在不同情境下 Spruce 的量測表現。

### 5.6.1 模擬設計 A 之結果-比較對 Spruce 原設計進行效能改良前後之執行時間

模擬設計 A 的設計目的是希望比較對 Spruce 原設計進行效能改良前後之模擬執行所需時間，確認效能改良之成效。當我們在使用 NCTUns 模擬平台進行網路實驗時，執行網路行為模擬所需的時間有可能比在真實世界實際執行測試所需的時間短，也可能會比在真實世界實際執行測試所需的時間要長。例如在 NCTUns 平台上執行 30 秒的網路模擬，若在模擬情境中網路流量較少時，模擬所需的時間可縮短至數秒內就完成；相對的，若在模擬情境中，網路的流量非常繁忙，則模擬的時間或許要數分鐘才能完成。模擬所需的執行時間取決於模擬的網路情境所造成之 traffic 流量大小，以及在模擬器上所執行的應用程式之運作行為。

在本論文使用網路分類 A 的模擬案例中，綜合討論各種頻寬使用率的情境，平均來說每次執行 30 秒的 Spruce 網路可用頻寬模擬(其中實際 Spruce 執行時間約為 10 秒)，我們對 Spruce 進行效能改良後的實作可節省 51.77 秒的模擬執行時間；同樣的，使用網路分類 B 的模擬案例平均也可節省 46.34 秒的模擬執行時間。證實我們對 Spruce 的效能改良實作確實有效。

我們將模擬設計 A 的模擬結果整理成圖表，請參見表 28、表 29、圖 10、圖 11。

表 28、網路分類 A—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	A	模擬設計	A	背景流量類 型	A
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1) 組別 0 執行時間 (sec)	組別 0 執行時間標 準差	(2) 組別 1 執行時間 (sec)	組別 1 執行時間標 準差	差異 (1)-(2)
A	100000	53.2	0.4472	3.6	0.5477	49.6
B	90000	65.8	0.8367	15.6	0.5477	50.2
C	75000	84.8	1.3038	34	1.4142	50.8
D	50000	113.6	1.5166	62	0	51.6
E	25000	144.4	1.1402	90.6	0.5477	53.8
F	10000	162	0	107.2	1.0954	54.8
G	0	166.6	2.881	115	1.5811	51.6
H	50000	451.4	14,9265	86.6	0.8944	364.8
平均		155.23		64.33		90.90
平均(不計 H)		112.91		61.14		51.77

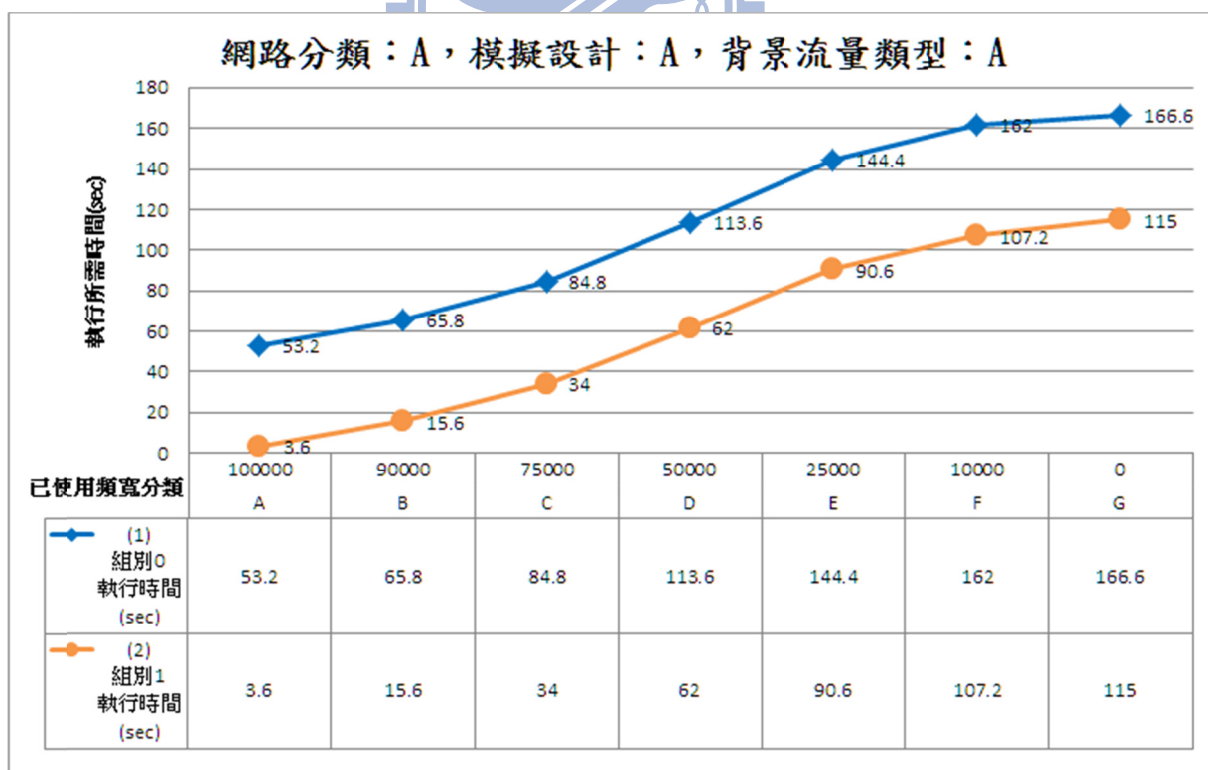


圖 10、網路分類 A—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 29、網路分類 B—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	B	模擬設計	A	背景流量類 型	A
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1) 組別 0 執行時間 (sec)	組別 0 執行時間標 準差	(2) 組別 1 執行時間 (sec)	組別 1 執行時間標 準差	差異 (1)-(2)
A	10000	49.8	0.4472	3.8	0.4472	46
B	9000	51.6	0.8944	5	0	46.6
C	7500	52.6	0.5477	6.8	0.8367	45.8
D	5000	55.6	0.8944	9.6	0.5477	46
E	2500	58.4	0.8944	12.4	0.8944	46
F	1000	61	0.7071	14	0.7071	47
G	0	61.6	1.9494	14.6	0.5477	47
H	5000	384.8	5.6303	15.2	0.4472	369.6
平均		96.93		10.18		86.75
平均(不計 H)		55.80		9.46		46.34

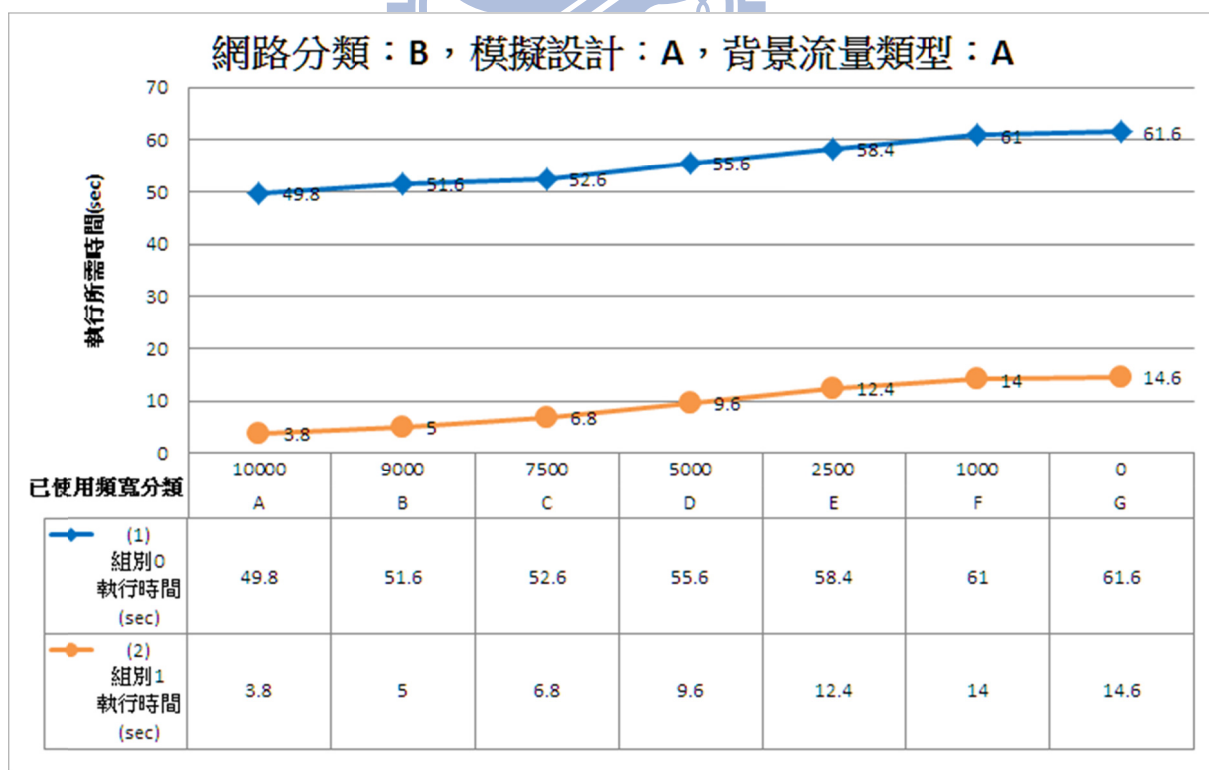


圖 11、網路分類 B—模擬設計 A—背景流量類型 A 之模擬結果圖

### 5.6.2 模擬設計 B 之結果-確認對 Spruce 原設計進行效能改良前後量測結果的正確性

模擬設計 B 的設計目的是確認對 Spruce 原設計進行效能改良前後量測結果的正確性。在模擬設計 A 中，我們已證實對於 Spruce 的效能改良確實有效，接著我們希望確認效能改良後 Spruce 的量測結果依然正確。

經過模擬實驗後，實驗結果顯示，在使用網路分類 A 的模擬案例中，使用效能改良後的實作所量測的網路可用頻寬結果正確性較效能改良前的原實作提高了 2.28%；而在使用網路分類 B 的模擬案例中，網路可用頻寬量測結果的正確性也提高了 1.49%。

我們觀察模擬設計 B 的結果中發現，在已使用之頻寬比例較高之案例裡，使用 Spruce 所得到的量測結果與實際的網路可用頻寬有明顯的差距，我們將在模擬設計 E 討論並試著解決這個問題。而在已使用頻寬分類為 H 這樣在量測過程頻寬會變動的案例中，Spruce 也無法準確的量測出網路可用頻寬。可用頻寬在量測過程中會發生變動的情形我們將在模擬設計 F 中做進一步的研究。

模擬設計 B 的模擬結果請見表 30、表 31、圖 12 及圖 13。模擬設計 B 的實驗結果證實我們在對原 Spruce 設計進行效能改良後，對於網路可用頻寬的量測準確性也有正面的效益。

表 30、網路分類 A—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	B	背景流量類型	A	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	91540.8	247.2927	100000	91700.8	431.0716	160.00
B	90000	90333.46	80968.2	407.5742	90333.46	79461	361.243	-1507.20
C	75000	75815.86	63125	417.9934	75815.86	70218.6	317.7189	7093.60
D	50000	51446.37	36694.2	551.0818	51446.37	37430.8	765.0371	736.60
E	25000	27448.15	10918	419.3459	27448.15	11212.2	506.299	294.20
F	10000	12333.21	0	0	12334.24	0	0	-1.03
G	0	10054.23	29276	16467.04	10040.11	13135.4	17834.02	16126.48
H	50000	48323.08	29294.6	1262.816	48223.93	24497.8	3434.949	-4697.64
結果：			不含 H 平均差異		3271.81		平均差異	2275.63
			不含 H 差異%		3.27%		差異%	2.28%

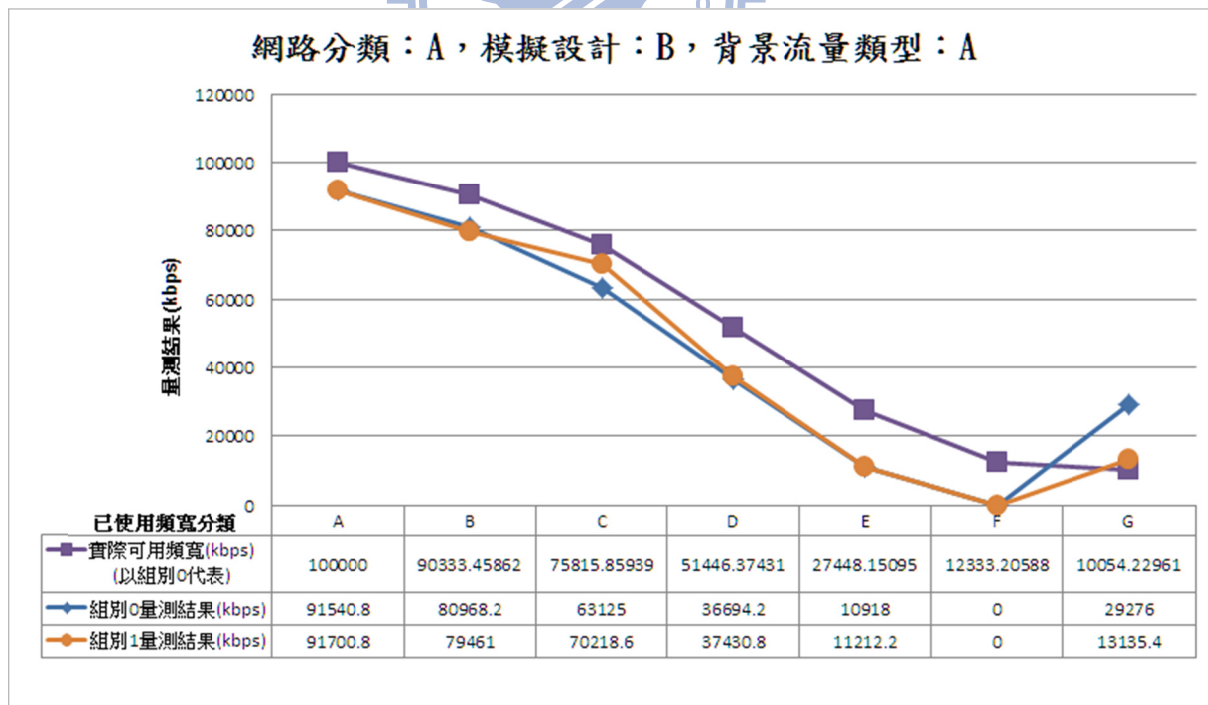


圖 12、網路分類 A—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 31、網路分類 B—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	B	背景流量類型	A	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9182.8	23.2207	10000	9171.2	26.0135	-11.60
B	9000	9034.264	8077.8	22.9826	9034.264	8144.4	85.9494	66.60
C	7500	7585.373	6806.2	40.1148	7585.373	7164.4	32.145	358.20
D	5000	5170.746	3828.4	55.3109	5170.746	3865.4	96.4432	37.00
E	2500	2753.25	1412	50.2991	2753.25	1569.4	121.5825	157.40
F	1000	1307.917	0	0	1308.147	0	0	-0.23
G	0	1071.389	3960.2	616.7404	1041.895	2980.8	1785.944	949.91
H	5000	4840.227	3269	172.2324	4840.227	2900.4	37.6736	-368.60
結果：			不含 H 平均差異		222.47		平均差異	148.58
			不含 H 差異%		2.22%		差異%	1.49%

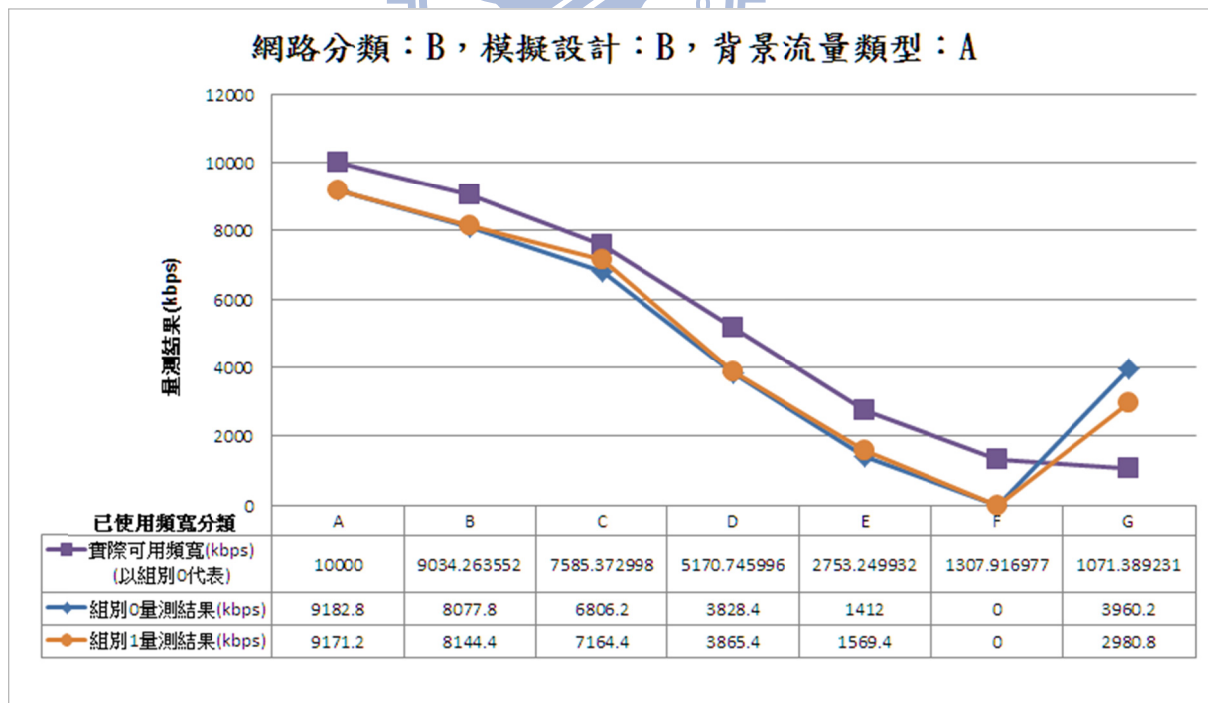


圖 13、網路分類 B—模擬設計 B—背景流量類型 A 之模擬結果圖

### 5.6.3 模擬設計 C 之結果-比較使用 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet

header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響

模擬設計 C 的設計目的是希望比較使用 Spruce 原設計與使用考慮 Ethernet header 之 intra pair gap 的實作對量測結果的影響。我們認為在套用公式 6 計算 intra pair gap 時，應該以真正在 link 上傳遞的資料量大小來計算較為合理，因此應該要將 Ethernet header 的大小一併計入用來計算 intra pair gap 的 packet size 中。

我們整理模擬設計 C 經模擬實驗後的結果，發現使用網路分類 A 的案例中，將 Ethernet header 納入計算的實作較原設計的量測準確性提高了 2.12%；使用網路分類 B 的案例中量測準確性則是提高了 2.52%。同樣的，對於已使用頻寬較大及量測過程中可用頻寬會變動的案例，由於存在較大的量測誤差，我們將分別在模擬設計 E 及 F 中進行探討，在計算準確性比較時暫不計入。

模擬設計 C 的模擬結果請見表 32、表 33、圖 14 及圖 15。模擬設計 C 的實驗結果證實當在計算 packet pair 內兩個 packets 的 intra pair gap 時，將 Ethernet header 納入計算，對於網路可用頻寬的量測準確性將會有所提昇。



表 32、網路分類 A—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	A	模擬設計	C	背景流量類型	A	C (kbps)	100000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	91433.8	229.0299	100000	95509.4	191.7037	4075.60
B	90000	90333.46	79783	836.6502	90333.46	81280.4	329.4166	1497.40
C	75000	75815.86	70480	429.1783	75815.86	71928.4	392.8738	1448.40
D	50000	51446.37	36725.6	600.4509	51446.37	40585.2	785.688	3859.60
E	25000	27448.15	11112.2	956.0129	27448.15	10814.6	737.8359	-297.60
F	10000	12334.35	0	0	12334.35	0	0	0.00
G	0	10042.64	41231.2	2489.744	10063.98	31710.2	17764.94	9542.35
H	50000	48224.27	29050.6	3742.55	48224.16	32893.2	1364.733	3842.71
	結果：		A-E 平均差異		2116.68		平均差異	2996.06
			A-E 平均差異%		2.12%		差異%	3.00%

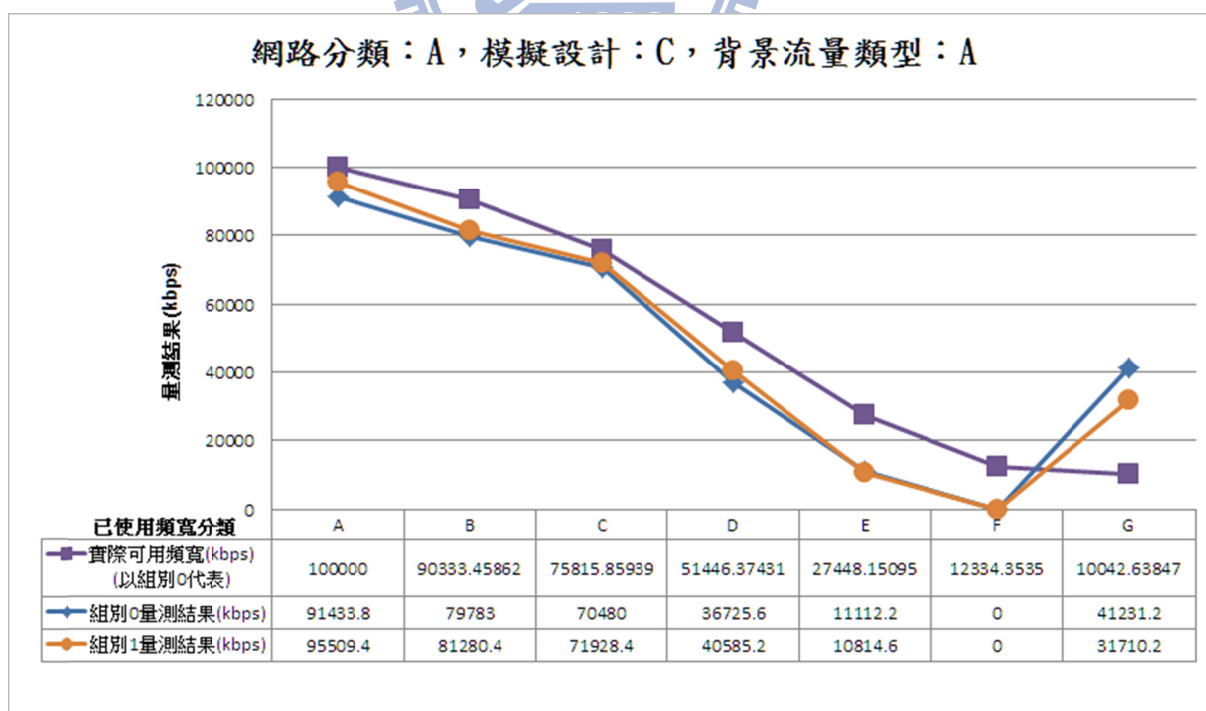


圖 14、網路分類 A—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果圖



表 33、網路分類 B—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	C	背景流量類型	A	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9166	17.7904	10000	9543.2	52.6991	377.20
B	9000	9034.264	8091.4	30.3035	9034.264	8076	40.1871	-15.40
C	7500	7585.373	6344.4	23.0608	7585.373	6600.6	39.8723	256.20
D	5000	5170.746	3866.4	109.7898	5170.746	4210	26.6833	343.60
E	2500	2753.25	1360	105.1261	2753.25	1658.6	58.4448	298.60
F	1000	1308.261	0	0	1308.261	0	0	0.00
G	0	1073.914	3384.6	352.8984	1071.848	4010.8	216.6072	-628.27
H	5000	4840.227	2912	49.29	4840.227	3100.8	39.8585	188.80
結果：		A-E 平均差異			252.04		平均差異	102.59
		A-E 平均差異%			2.52%		差異%	1.03%

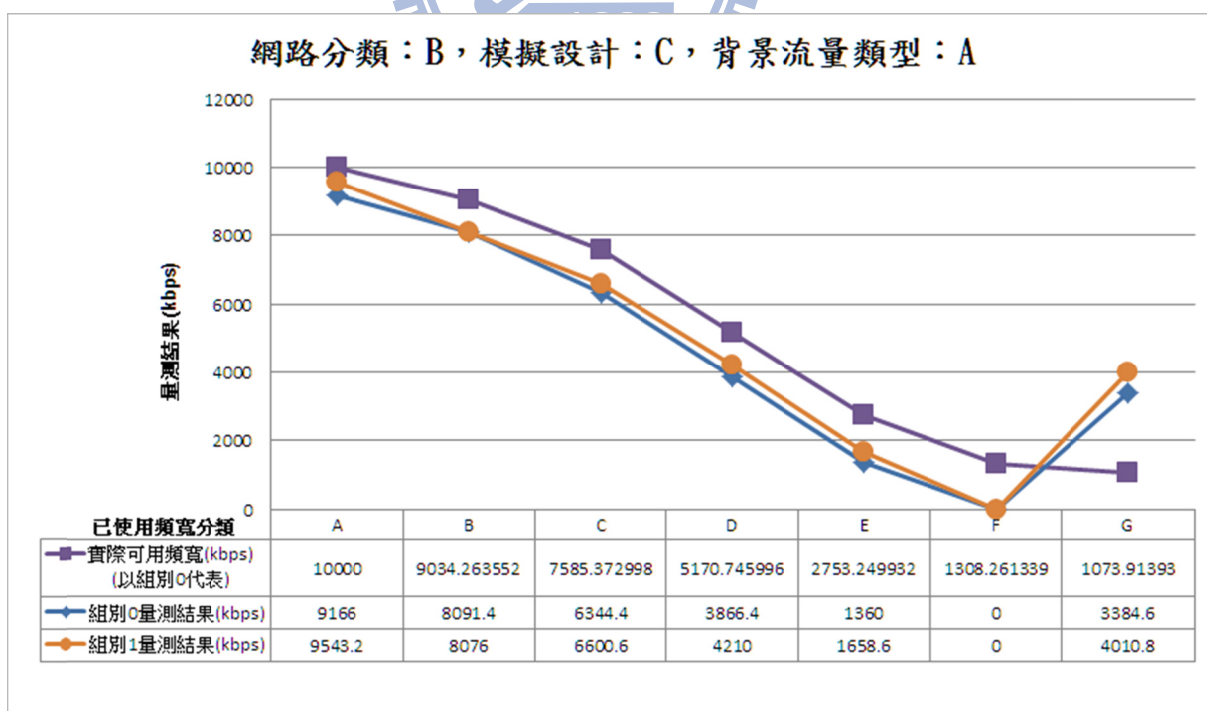


圖 15、網路分類 B—模擬設計 C—背景流量類型 A 之模擬結果圖

#### 5.6.4 模擬設計 D 之結果-比較使用不同 inter pair gap 分配對量測結果的影響

模擬設計 D 的設計目的是比較使用不同 inter pair gap 分配對量測結果的影響。在原設計中，inter pair gap 的配置是使用 exponention 分配，我們想了解若使用 uniform 分配來配置 inter pair gap 對於量測結果的影響。

我們整理模擬設計 D 經模擬實驗後的結果，發現使用網路分類 A 的案例中，採用 uniform 分配配置 inter pair gap 的實作較原設計的量測準確性提高了 1.25%；使用網路分類 B 的案例中量測準確性則是提高了 2.32%。同樣的，對於已使用頻寬較大及量測過程中可用頻寬會變動的案例，由於存在較大的量測誤差，我們將分別在模擬設計 E 及 F 中進行探討，在計算準確性比較時暫不計入。

模擬設計 D 的模擬結果請見表 34、表 35、圖 16 及圖 17。模擬設計 D 的實驗結果發現，當我們將 Spruce 原設計配置 inter pair gap 的 exponential 分配改為相同中心的 uniform 分配後，對於網路可用頻寬的量測準確性將會較使用 exponential 分配時更高。



表 34、網路分類 A—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	A	模擬設計	D	背景流量類型	A	C (kbps)	100000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	95542.4	246.4737	100000	95722.6	336.7659	180.20
B	90000	90333.46	80982.2	491.0562	90333.46	84433.6	185.6833	3451.40
C	75000	75815.86	71774.6	445.5882	75815.86	71766.2	287.7528	-8.40
D	50000	51446.37	40304.8	117.4061	51446.37	41298.6	432.6567	993.80
E	25000	27448.15	11530	481.7821	27448.15	13155.8	811.0254	1625.80
F	10000	12334.35	0	0	12333.21	0	0	1.15
G	0	10041.95	24369	22209.64	10050.1	40828.4	3879.862	-16451.25
H	50000	48223.93	31493.8	924.6249	48223.93	25809.8	789.5921	-5684.00
	結果：		A-E 平均差異		1248.56		平均差異	-1986.41
			A-E 平均差異%		1.25%		差異%	-1.99%

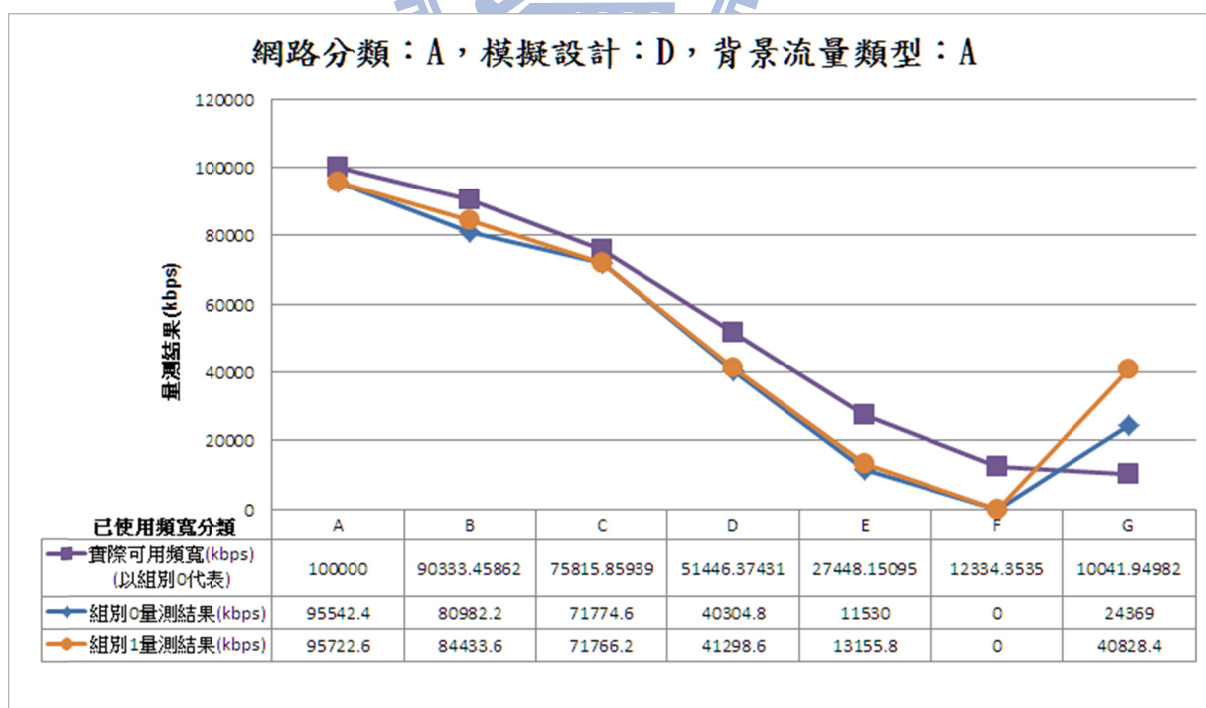


圖 16、網路分類 A—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 35、網路分類 B—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	B	模擬設計	D	背景流量類型	A	C (kbps)	10000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9554.4	23.2873	10000	9554.2	41.9607	-0.20
B	9000	9034.264	8049.2	34.5861	9034.264	8479.2	33.6407	430.00
C	7500	7585.373	6579.8	40.2517	7585.373	7093.4	64.2207	513.60
D	5000	5170.746	4200.8	62.5596	5170.746	4123	91.2168	-77.80
E	2500	2753.25	1664.8	52.2226	2753.25	1957	63.1862	292.20
F	1000	1308.491	0	0	1306.081	0	0	2.41
G	0	1061.175	3970	251.9315	1082.636	4041.8	294.0207	-50.34
H	5000	4840.227	3108.6	36.9229	4840.227	3362	207.5921	253.40
	結果：		A-E 平均差異		231.56		平均差異	170.41
			A-E 平均差異%		2.32%		差異%	1.70%

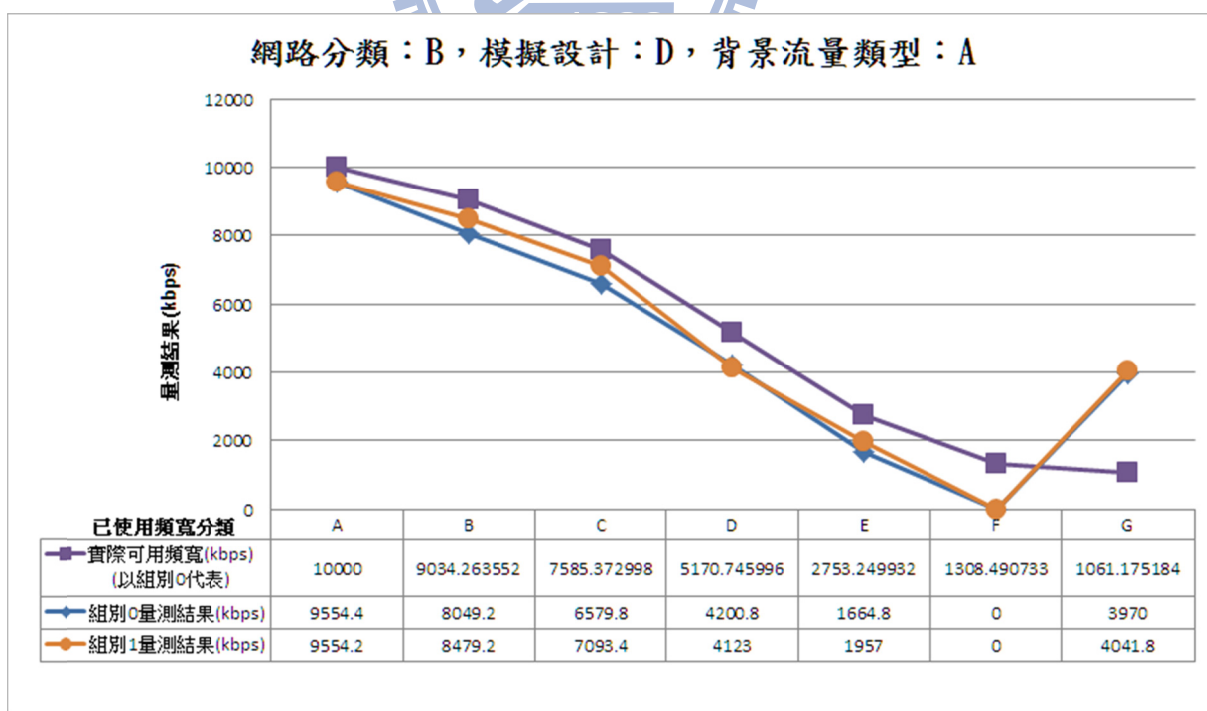


圖 17、網路分類 B—模擬設計 D—背景流量類型 A 之模擬結果圖

### 5.6.5 模擬設計 E 之結果-比較對 Spruce 原設計進行量測結果評估方式改良前後之結果差異

模擬設計 E 的設計目的是比較對 Spruce 原設計進行量測結果評估方式改良前後之結果差異。我們改良 Spruce 原設計，若 packet pair 量測出的頻寬使用率 $>100\%$ ，則我們將該組 packet pair 的網路可用頻寬量測結果視為當時頻寬已完全被使用，並將該組 packet pair 的量測結果視為 0；在評估量測結果時，若有 30%的 packet pairs 沒有被完整的送到接收端，則我們認為當時的網路可用頻寬已幾乎全部使用，而不是如原 Spruce 的設計以部份 packet pairs 的量測值來評估得出當時的網路使用率。以避免過於高估當時的網路可用頻寬。

我們將模擬設計 E 的模擬結果整理於表 36 至表 50 以及圖 18 至圖 31。我們在模擬設計 E 的實驗結果證實，我們對 Spruce 原設計所進行的量測結果評估方式改良，對於網路可用頻寬的量測正確性將會較原設計更為準確。並且在頻寬使用率較高的模擬案例中，我們改良後的實作也能夠較準確的量測出當時的剩餘網路可用頻寬。

表 36、模擬設計 E 之模擬結果匯整

使用之網路分類	背景流量類型	背景流量類型 A-F 平均差異	平均差異
A	A	3.34%	5.72%
B	A	2.69%	4.96%
A	B	2.80%	1.40%
B	B	3.19%	1.25%
A	C	2.16%	3.51%
B	C	2.77%	4.05%
A	D	0.99%	0.68%
B	D	0.63%	0.30%
A	E	3.87%	4.79%
B	E	2.89%	4.42%
A	F	2.06%	1.16%
B	F	3.31%	2.92%

表 37、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	A	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	95570.2	261.2742	100000	95180	349.7084	-390.20
B	90000	90333.46	81270.8	567.6264	90333.46	80694.8	329.3565	-576.00
C	75000	75815.86	71817.2	424.3568	75815.86	71661	538.9842	-156.20
D	50000	51446.37	40437.4	499.2152	51446.37	41187	1001.639	749.60
E	25000	27448.15	10402.8	324.7849	27448.15	20129.2	457.9363	9726.40
F	10000	12334.35	0	0	12334.35	10662.2	523.7969	10662.20
G	0	10046.43	40130.4	1876.575	10054.34	0	0	20029.63
結果：			A-F 平均差異		3335.97		平均差異	5720.78
			A-F 平均差異%		3.34%		差異%	5.72%

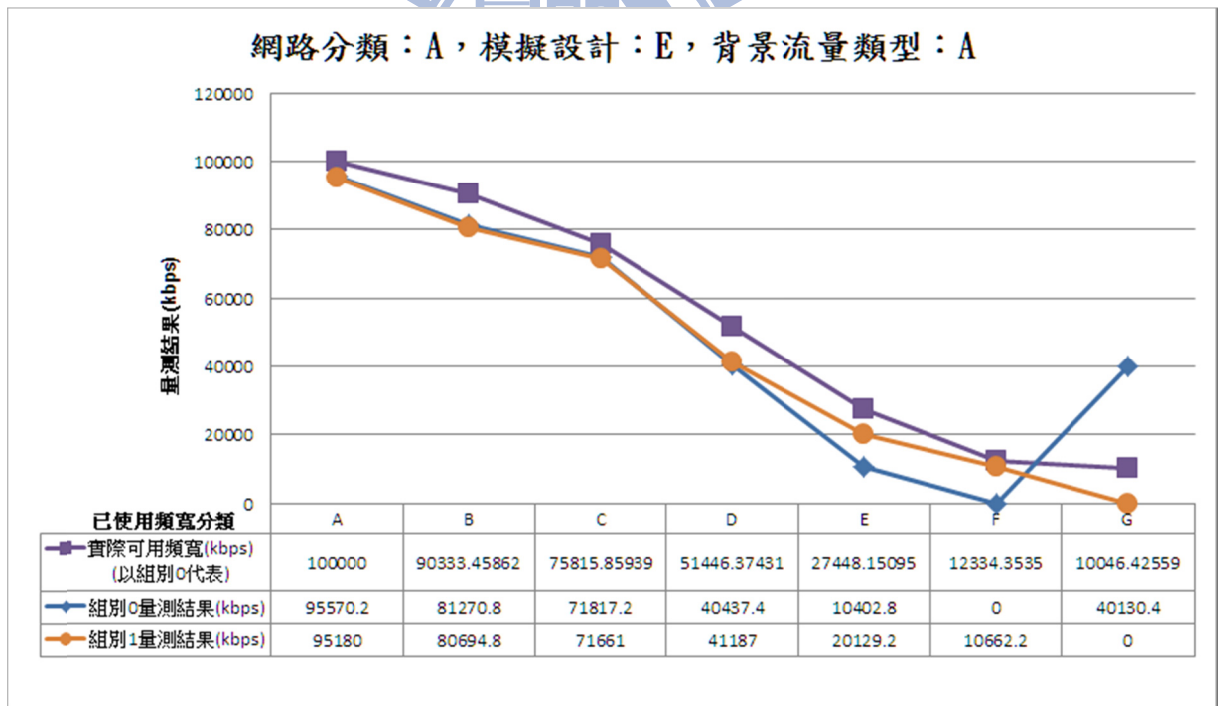


圖 18、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 38、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	A	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	9529.8	21.0286	10000	9553	29.7405	23.20
B	9000	9034.264	8053	35.0214	9034.264	8030.8	17.9778	-22.20
C	7500	7585.373	6589	61.8425	7585.373	6585.2	43.2516	-3.80
D	5000	5170.746	4164.8	34.5065	5170.746	4163.8	130.8041	-1.00
E	2500	2753.25	1702	66.8169	2753.25	2389.6	43.844	687.60
F	1000	1308.491	47.4	105.9896	1308.261	976.8	111.5603	929.63
G	0	1082.062	4012.4	161.4072	1069.782	0	0	1860.56
結果：			A-F 平均差異		268.90		平均差異	496.28
			A-F 平均差異%		2.69%		差異%	4.96%

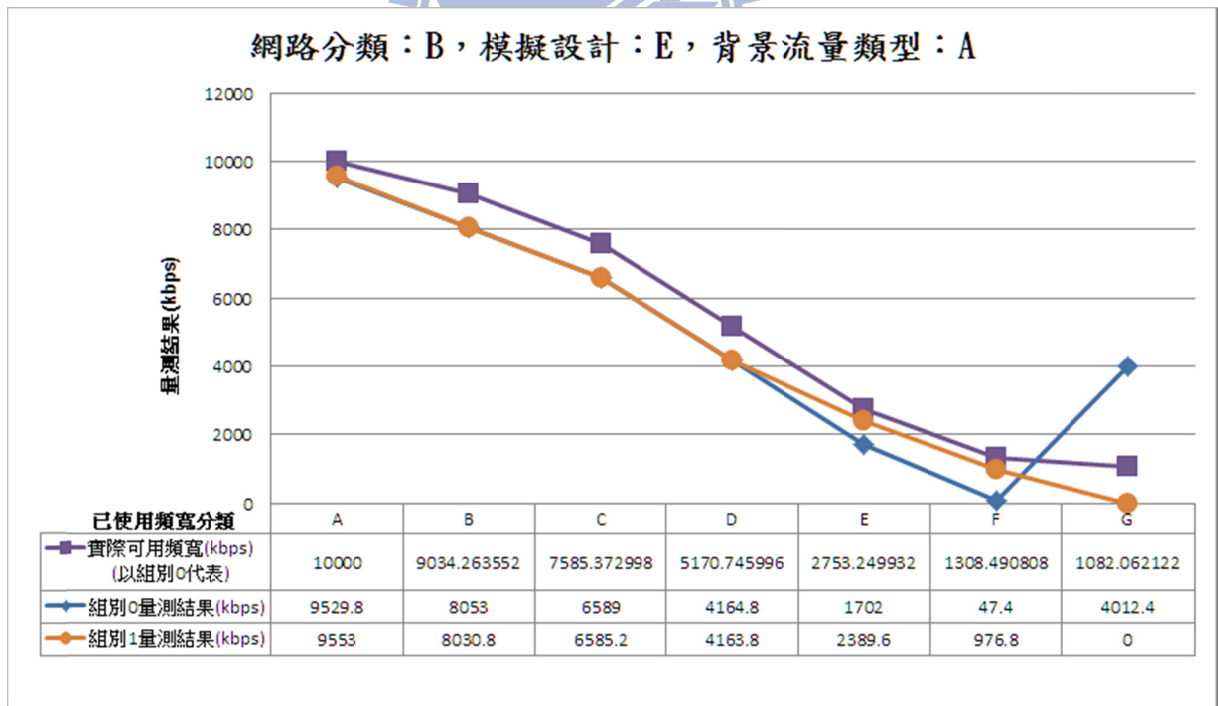


圖 19、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 39、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	B	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
A	100000	100000	95624.6	238.0972	100000	95314.6	223.5739	-310.00
B	90000	90362.79	83801.8	488.744	90362.79	83718.4	351.4261	-83.40
C	75000	75856.86	75856	280.2659	75856.86	75412.8	763.4676	-443.20
D	50000	51583.53	45906.6	572.0977	51583.53	48321.6	426.7638	2415.00
E	25000	27293.81	15830	2726.544	27294.37	26343	1006.828	10512.44
F	10000	12648.37	151.2	338.0935	12648.72	20424.6	1207.288	4721.28
G	0	10116.41	7008.6	3573.756	10123.53	0	6204.395	-7015.72
結果：			A-F 平均差異		2802.02		平均差異	1399.48
			A-F 平均差異%		2.80%		差異%	1.40%

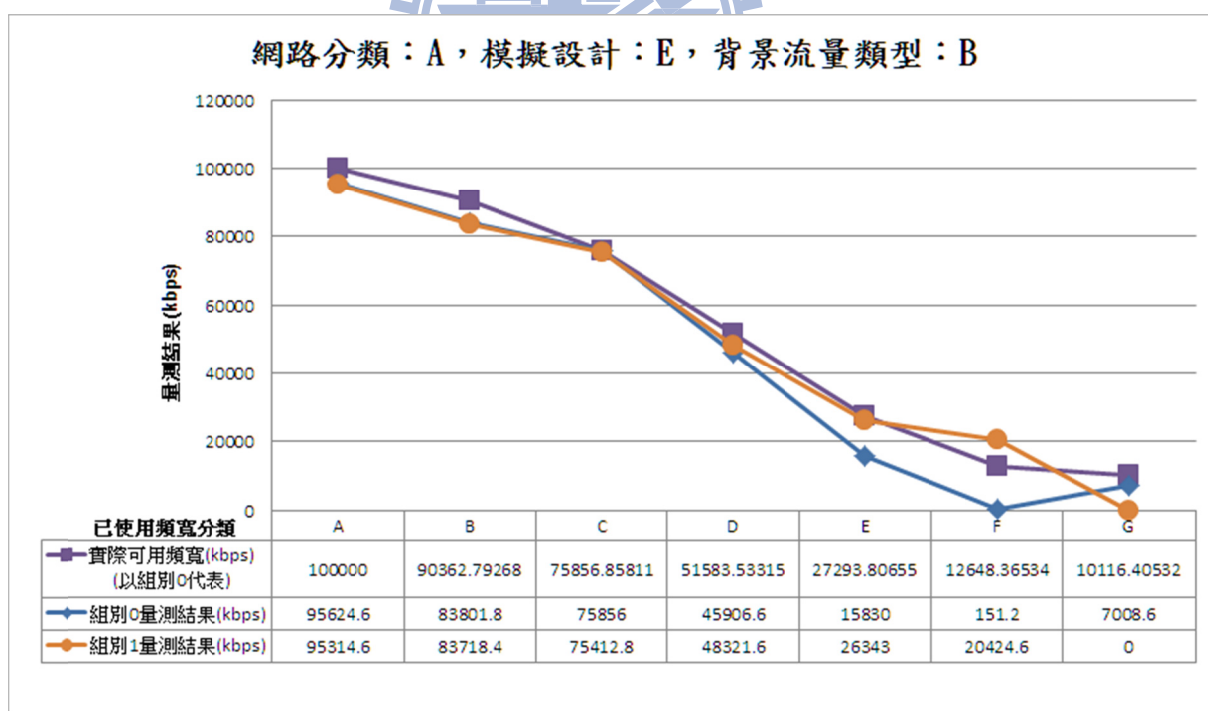


圖 20、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果圖



表 40、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	B	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	9522.2	27.8962	10000	9557.4	20.9237	35.20
B	9000	9005.643	8183	26.1916	9005.643	8196.8	23.4883	13.80
C	7500	7556.997	7212.2	53.6861	7556.997	7253	24.7487	40.80
D	5000	5160.376	3857	112.8694	5160.376	4191	88.1589	334.00
E	2500	2804.027	1889.6	50.8213	2804.027	2833.8	17.0353	884.65
F	1000	1346.44	229.6	210.0507	1346.951	1860.4	127.3	603.39
G	0	1114.394	1184.2	501.6759	1104.176	0	349.4627	-1034.37
結果：			A-F 平均差異		318.64		平均差異	125.35
			A-F 平均差異%		3.19%		差異%	1.25%

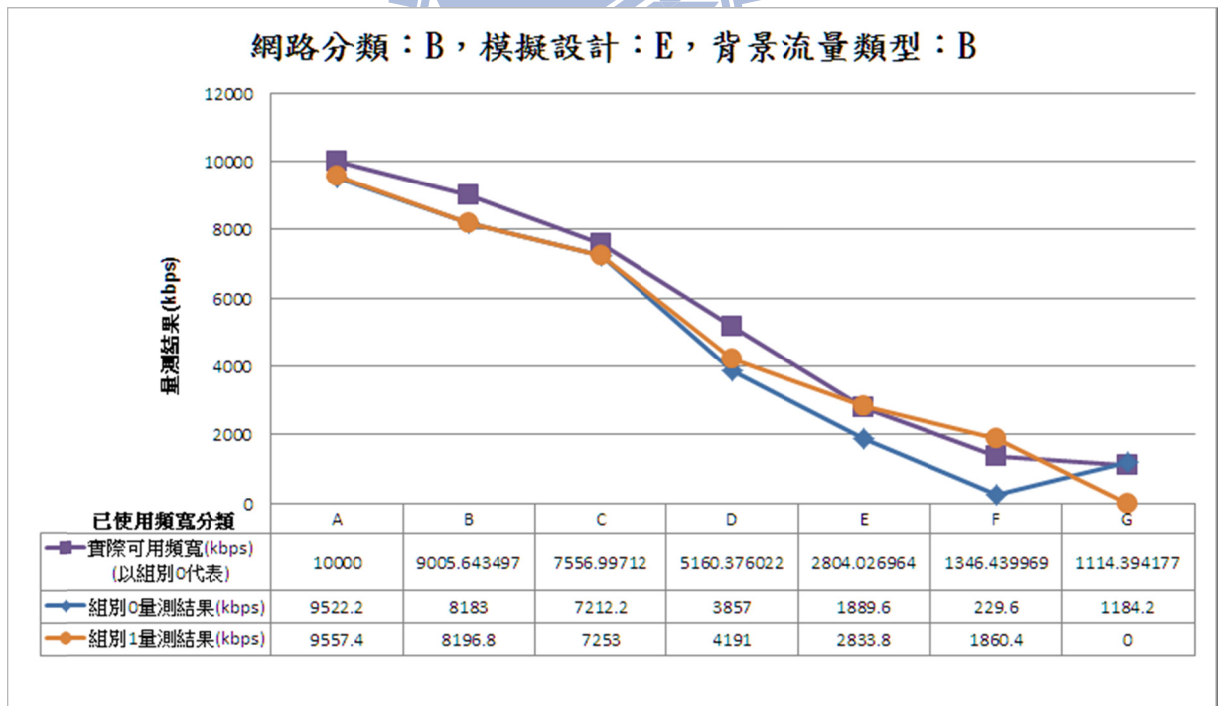


圖 21、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 B 之模擬結果圖

表 41、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	C	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
A	100000	100000	95586.8	251.298	100000	95401.2	235.5402	-185.60
B	90000	92579.73	88685.6	322.7511	92579.73	88564.2	258.2067	-121.40
C	75000	81561.31	76057.4	329.3149	81561.31	75978.8	288.0759	-78.60
D	50000	63075.71	55117.6	111.9634	63075.79	55604.6	754.0622	486.92
E	25000	44582.05	32342.2	966.4666	44582.05	38624.8	823.4845	6282.60
F	10000	33375.36	22917.8	420.4446	33375.36	29476.2	473.6631	6558.40
G	0	25938.43	10940.2	2938.365	25938.43	22545.4	1256.035	11605.20
結果：			A-F 平均差異		2157.05		平均差異	3506.79
			A-F 平均差異%		2.16%		差異%	3.51%

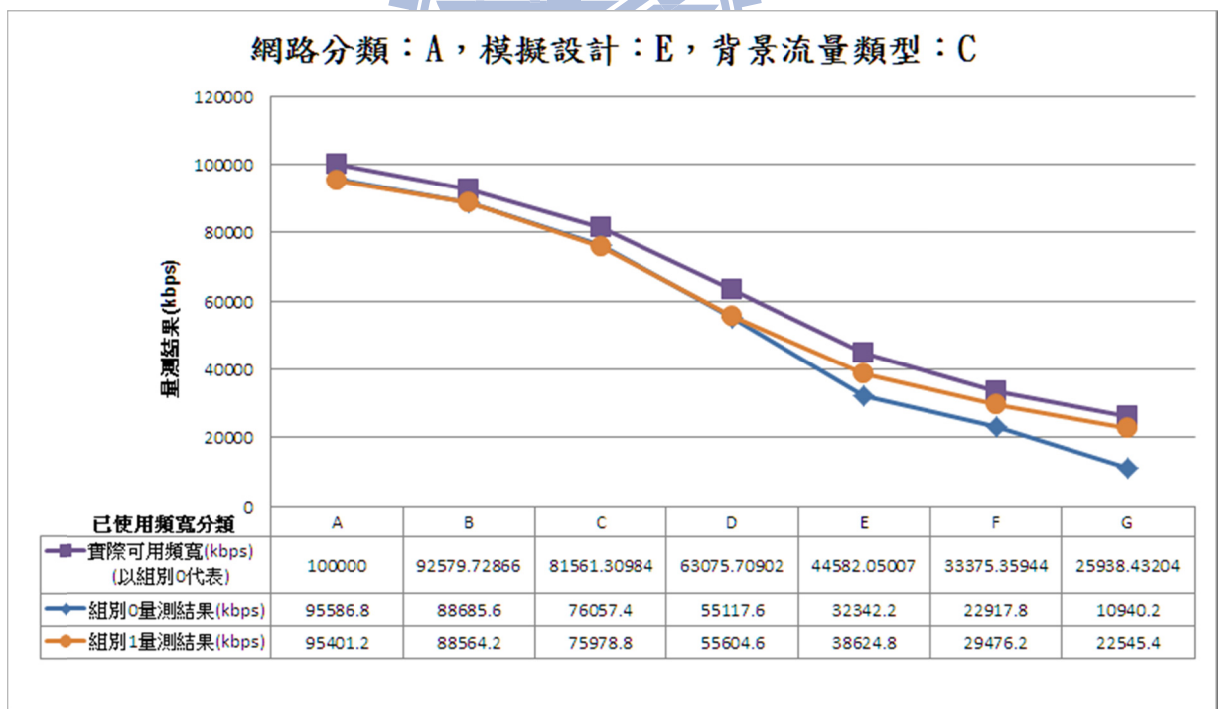


圖 22、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果圖

表 42、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	C	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9573.4	20.5985	10000	9543.8	24.5092	-29.60
B	9000	9260.596	8504	12.51	9260.596	8512.8	30.1281	8.80
C	7500	8138.023	7277.6	36.0181	8138.023	7273	52.9386	-4.60
D	5000	6281.239	5323.2	46.2785	6281.238	5595	23.6008	271.80
E	2500	4441.808	3901.8	54.0944	4441.808	4364.4	28.9189	462.60
F	1000	3321.875	2060.8	162.8287	3322.19	3013.4	112.1931	952.28
G	0	2579.778	1321.2	89.4494	2579.755	2492.4	27.2452	1171.22
結果：			A-F 平均差異		276.88		平均差異	404.64
			A-F 平均差異%		2.77%		差異%	4.05%

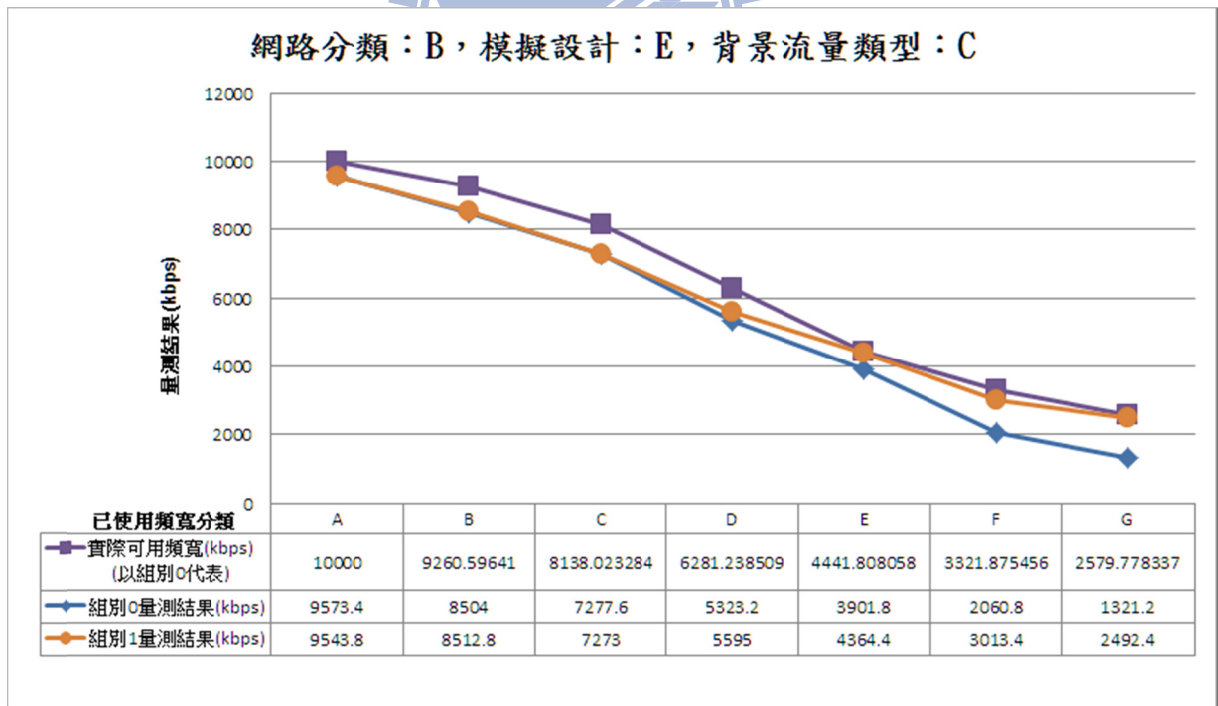


圖 23、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 C 之模擬結果圖

表 43、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	D	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	95457.2	179.3327	100000	95498.2	276.1235	41.00
B	90000	89485.91	82202.4	373.9081	89485.91	82173	307.8758	-29.40
C	75000	73591.11	72471.6	708.9695	73591.11	72717.8	684.9947	246.20
D	50000	47048.25	36651.2	1586.917	47048.25	42025.4	370.0072	5374.20
E	25000	20364.2	7795.6	846.428	20364.09	23695.2	763.5452	9237.50
F	10000	10112.78	8946.4	2087.092	10117.72	0	5881.473	-8951.34
G	0	10040.26	18932.6	8327.327	10056.62	0	0	-1164.28
結果：			A-F 平均差異		986.36		平均差異	679.13
			A-F 平均差異%		0.99%		差異%	0.68%

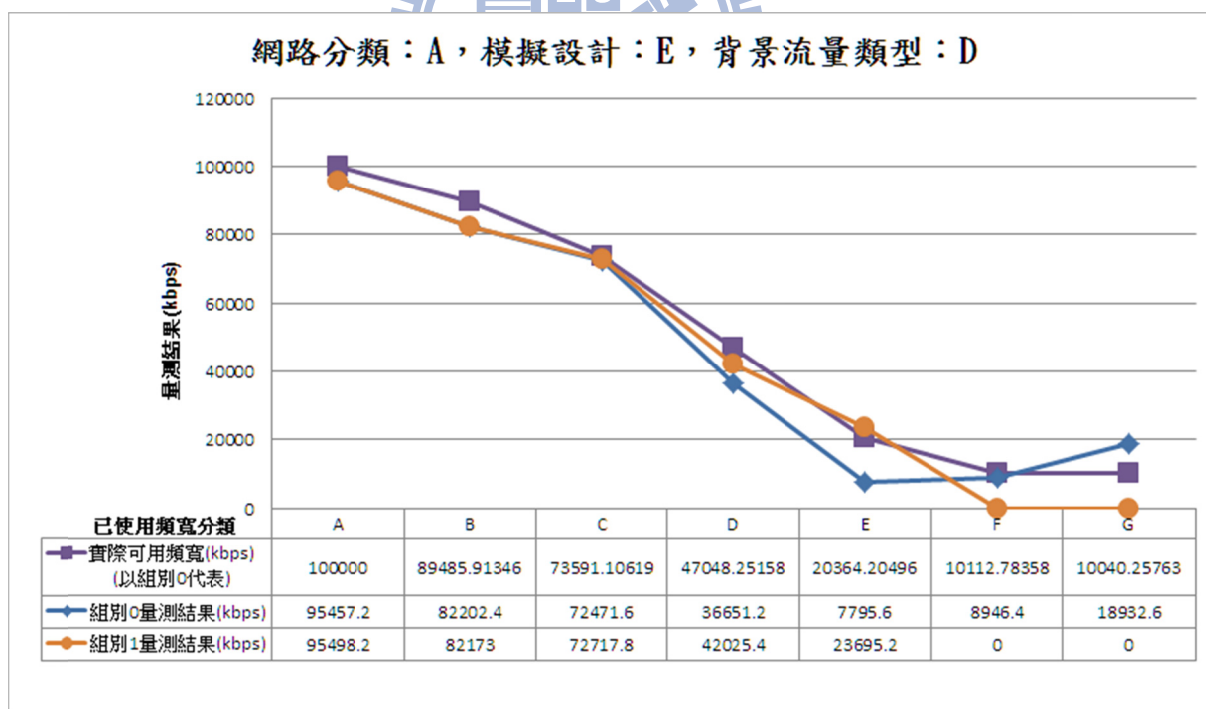


圖 24、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果圖

表 44、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	D	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9545	25.02	10000	9536.2	34.7736	-8.80
B	9000	8955.57	8585.4	48.1851	8955.57	8555	24.4643	-30.40
C	7500	7391.66	6705.2	41.8055	7391.66	6716.2	66.3415	11.00
D	5000	4751.201	2684.6	121.6195	4751.201	3510.4	58.2435	825.80
E	2500	2124.987	1234.8	52.1987	2125.308	2575.2	90.8444	440.29
F	1000	1134.577	862.4	894.818	1131.322	0	355.8768	-859.14
G	0	1104.018	2022.6	301.3607	1089.378	0	0	-170.80
結果：			A-F 平均差異		63.12		平均差異	29.71
			A-F 平均差異%		0.63%		差異%	0.30%

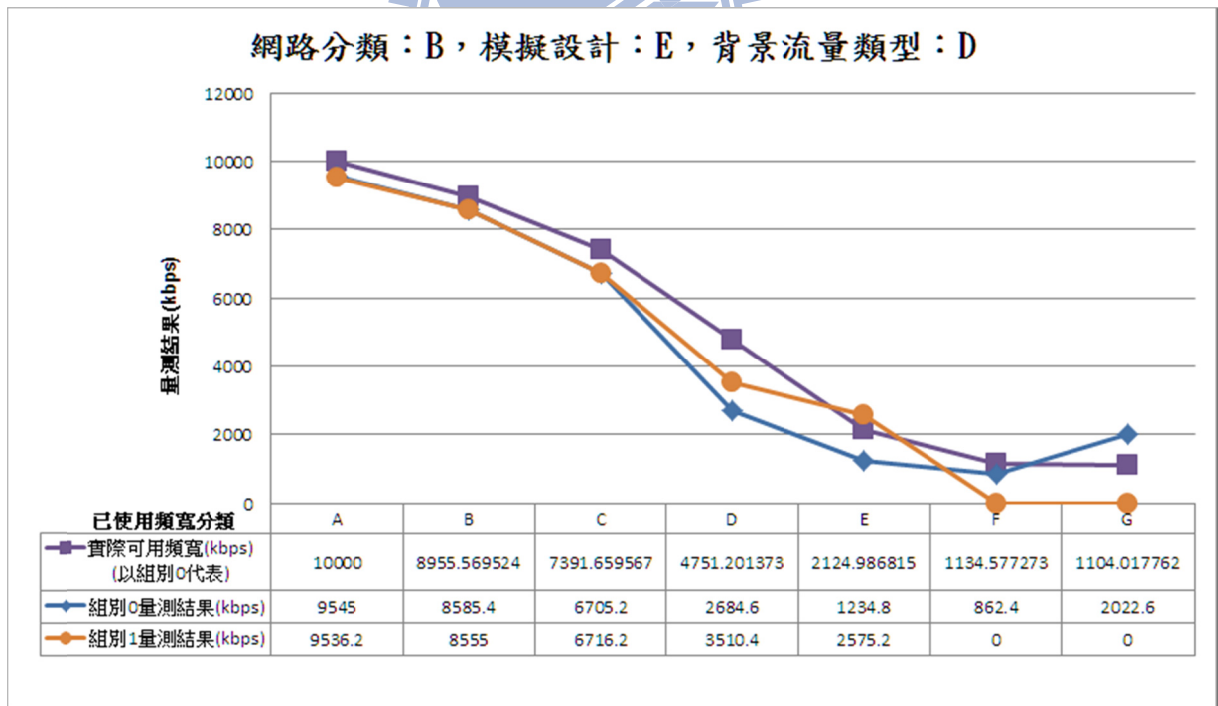


圖 25、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 D 之模擬結果圖

表 45、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	E	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	95353.8	133.0327	100000	95285	319.502	-68.80
B	90000	91988.44	88518.2	242.4288	91988.44	88623	304.3715	104.80
C	75000	79890.45	77420.8	321.6608	79890.45	77424.2	185.2585	3.40
D	50000	59763.64	51754.8	823.7106	59763.64	52501.2	783.326	746.40
E	25000	39600.48	29200.4	844.2614	39600.48	38633.2	402.6397	9432.80
F	10000	27365.82	13193	569.6806	27365.82	26211.6	572.9553	13018.60
G	0	19182.03	6599.4	1611.826	19182.03	21462.8	431.9065	10301.86
結果：			A-F 平均差異		3872.87		平均差異	4791.29
			A-F 平均差異%		3.87%		差異%	4.79%

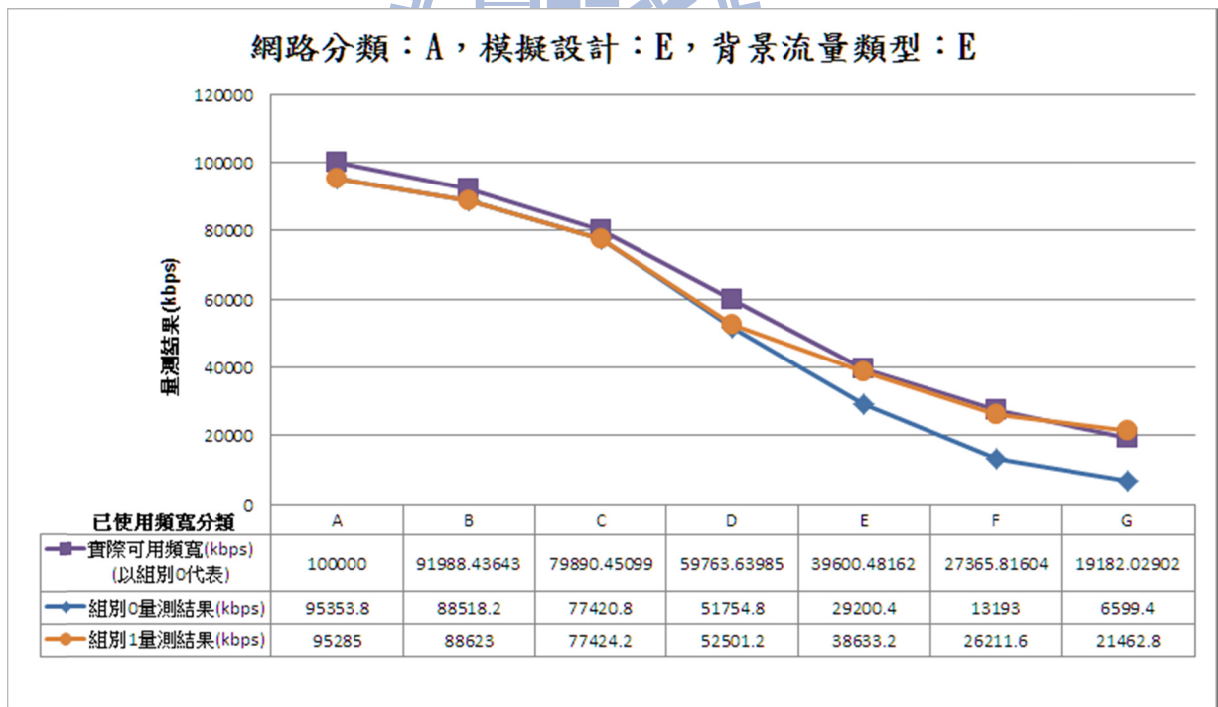


圖 26、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果圖

表 46、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	E	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9557.2	38.9191	10000	9565.2	40.8987	8.00
B	9000	9212.749	8889.8	48.9765	9212.749	8901.8	9.5237	12.00
C	7500	8030.499	7551.6	59.2647	8030.499	7553.2	41.0816	1.60
D	5000	5974.993	5152.8	26.4424	5974.993	5458.6	36.977	305.80
E	2500	3981.544	2979.2	38.1274	3981.544	3507	48.3167	527.80
F	1000	2760.825	1594.2	297.103	2760.825	2470.2	97.5126	876.00
G	0	1988.055	606.2	115.9944	1988.055	1970.2	98.8494	1364.00
結果：			A-F 平均差異		288.53		平均差異	442.17
			A-F 平均差異%		2.89%		差異%	4.42%

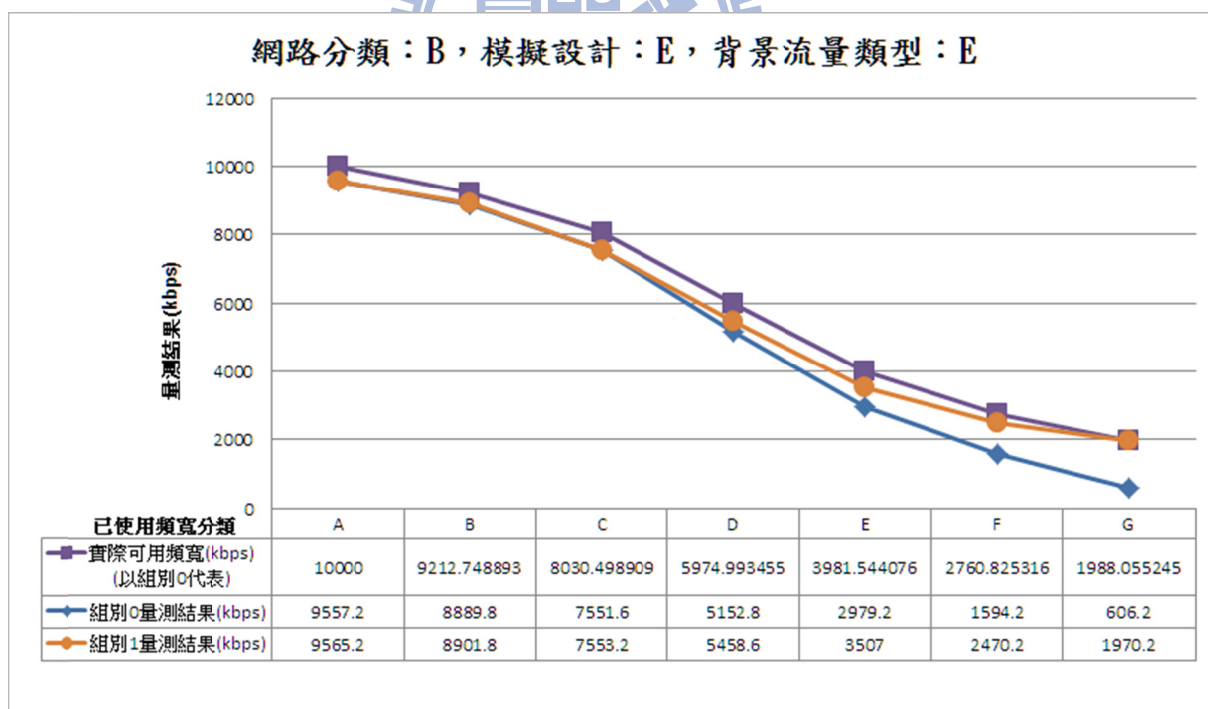


圖 27、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 E 之模擬結果圖

表 47、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果

網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	F	C (kbps)	100000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	95501.4	202.0416	100000	95362	269.7601	-139.40
B	90000	90102.21	80796.6	1151.078	90102.21	80768.6	1160.028	-28.00
C	75000	75110.52	65780	427.6301	75110.52	65818	353.4275	38.00
D	50000	49863.18	37544	567.1618	49863.18	37785	354.6033	241.00
E	25000	24502.87	16105.4	945.9465	24503.05	23141	1555.672	7035.42
F	10000	12457.79	2955.6	2737.254	12476.55	8176	7459.106	5201.63
G	0	10613.53	4267	6524.544	10653.1	45	61.6279	-4261.57
結果：			A-F 平均差異		2058.11		平均差異	1155.30
			A-F 平均差異%		2.06%		差異%	1.16%

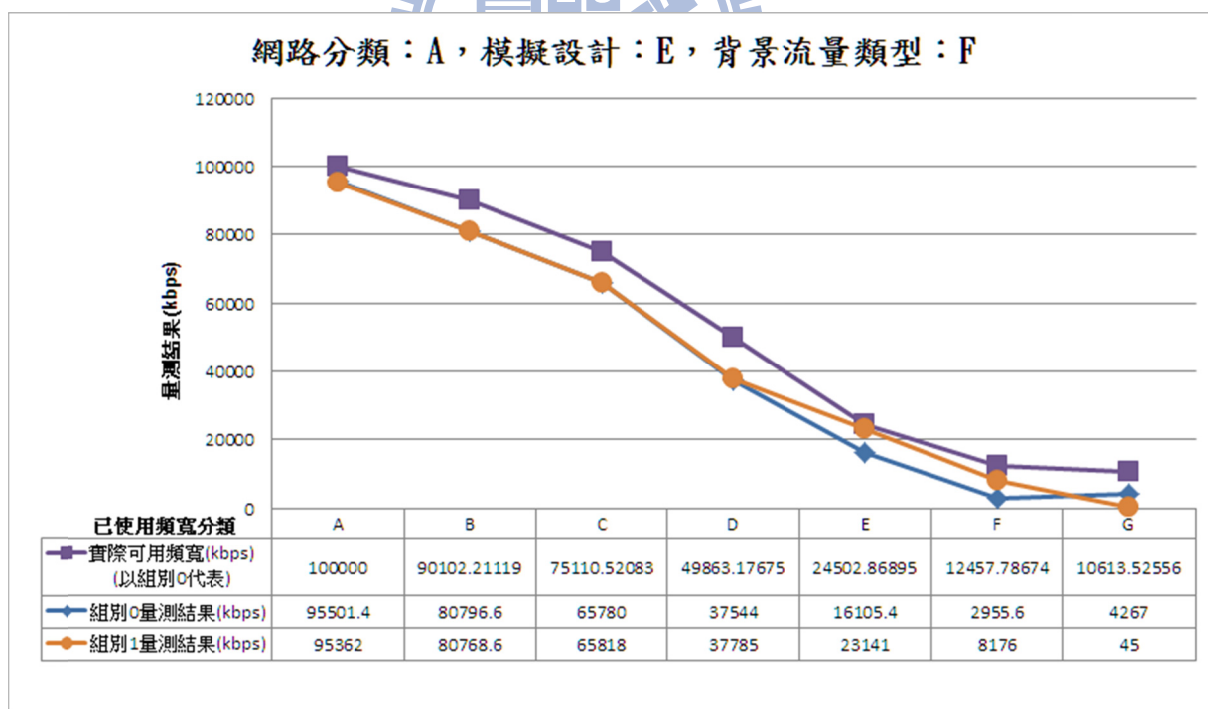


圖 28、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果圖



表 48、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果

網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	F	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9550	33	10000	9541.4	25.5206	-8.60
B	9000	8994.457	8175	24.4336	8994.457	8205	49.29	30.00
C	7500	7549.328	7031	18.7083	7549.328	7071.2	24.5601	40.20
D	5000	5068.804	4340.6	11.4149	5068.805	4258	41.7253	-82.60
E	2500	2403.303	665.4	62.4724	2402.653	1978	28.2666	1313.25
F	1000	1335.374	373.8	211.9179	1338.082	1604.6	232.4463	695.06
G	0	1169.75	887.4	700.5493	1147.458	922.8	841.7444	57.69
結果：			A-F 平均差異		331.22		平均差異	292.14
			A-F 平均差異%		3.31%		差異%	2.92%

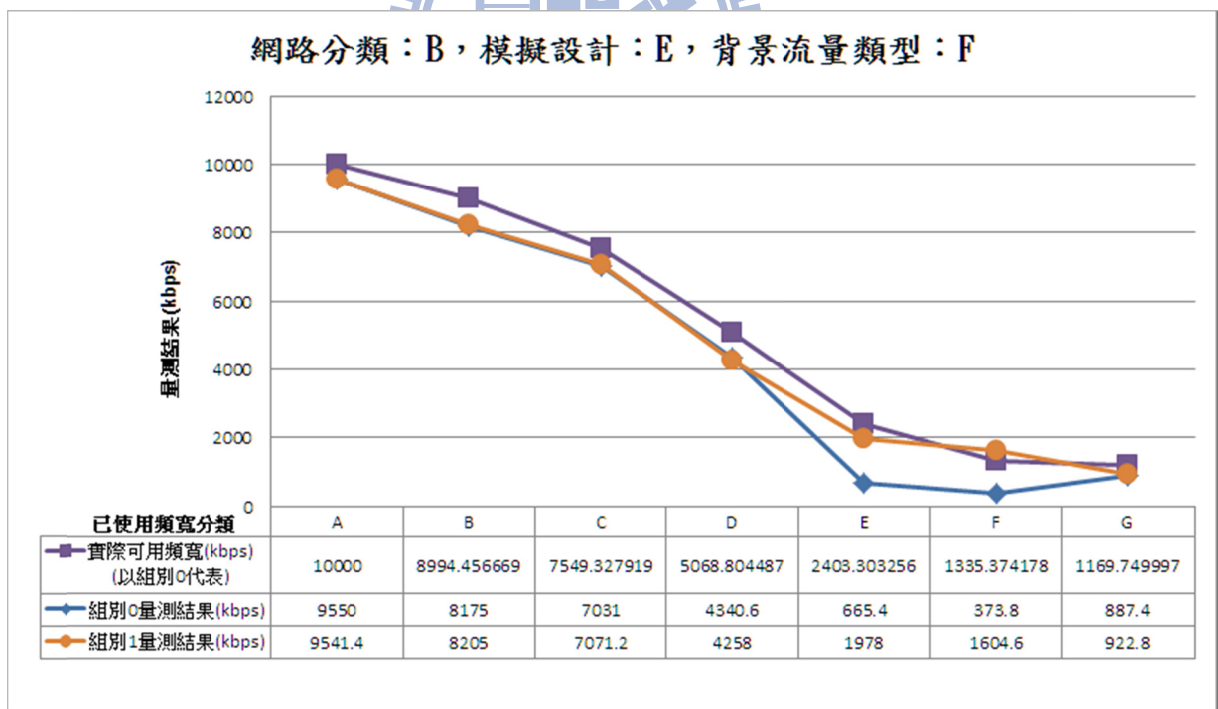


圖 29、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 F 之模擬結果圖

在模擬設計 E 中，我們也將背景流量使用 Greedy UDP、Greedy TCP 以及 UDP 與 TCP 混合流量的模擬案例加入模擬。模擬實驗所得到的 Spruce 量測結果整理如表 49、表 50 及圖 30、圖 31。

觀察量測結果發現，在 Greedy UDP 的背景流量下，Spruce 無法正確的進行網路可用頻寬量測，量測結果會錯誤的認定當時可用頻寬尚有 60-95%；而在 Greedy TCP 或 UDP 混合 TCP 的背景流量，不論當時實際加載的背景流量大小為何，Spruce 原設計所量測出的可用頻寬都只有 10-15%；而我們改良對量測結果評估方式後的實作所測出的網路可用頻寬則大約在當時 TCP 流量的一半左右，我們認為由於 TCP 具有流量控制的特性，因此我們改良後的實作所得到的結果應該較原設計的结果合理。

表 49、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果

	網路分類	A	模擬設計	E	背景流量類型	G、H、I	C (kbps)	100000
已使用頻寬分類 / 背景流量類型	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)  減  (3)-(4)
G / G	0	7666.525	62146.4	34724.95	7660.958	66475.6	37169.09	-4334.77
G / H	0	9324.239	16999.2	8821.821	9324.45	46863.2	6977.222	-29863.79
G / I	0	58282.65	11744.2	8715.725	58284.72	40061	2532.881	28314.73

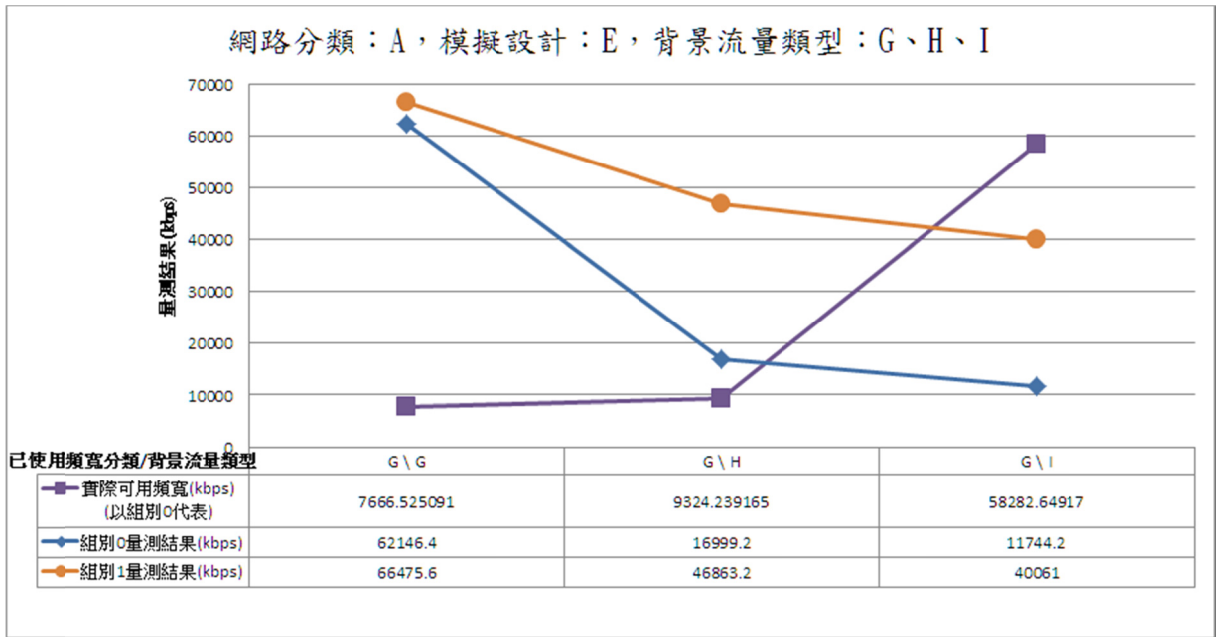


圖 30、網路分類 A—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果圖

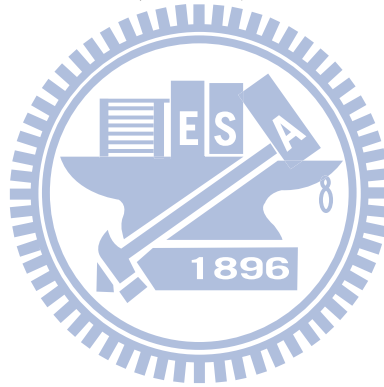


表 50、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果

	網路分類	B	模擬設計	E	背景流量類型	G、H、I	C (kbps)	10000
已使用頻寬分類 / 背景流量類型	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
G / G	0	931.4095	9221.2	293.8566	931.6236	9330.4	151.5678	-108.99
G / H	0	1085.796	1148.4	716.566	1086.217	4810.6	482.5456	-3661.78
G / I	0	5902.443	1466.6	201.919	5900.921	4692.8	384.2977	3227.72

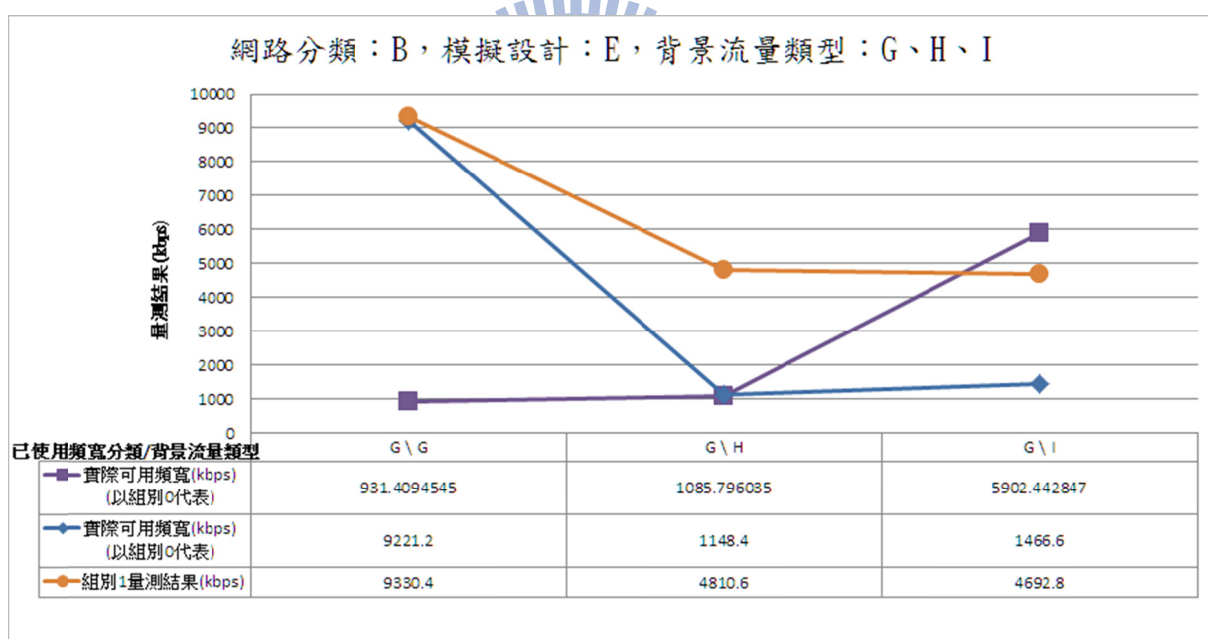


圖 31、網路分類 B—模擬設計 E—背景流量類型 G、H、I 之模擬結果圖

### 5.6.6 模擬設計 F 之結果-比較量測過程中可用頻寬變化對量測結果的影響

模擬設計 F 的設計目的是希望探討在量測過程中可用頻寬變化對於量測結果的影響。我們的模擬設計使用各種不同的背景流量類型，討論量測過程中平均頻寬使用率為 50%，但可用頻寬在量測期間會發生變動的情境。在量測開始的前三秒，我們加載 25% 頻寬使用率的背景流量，三到六秒則提高背景流量至頻寬使用率的 75%，六秒之後則維持在頻寬使用率的 50%，藉由這樣的設計來了解頻寬變動對於量測結果的影響。

我們將模擬設計 F 的實驗結果整理如表 51、表 52、圖 32 及圖 33。在使用網路分類 A 的模擬案例中，相較於原 Spruce 設計，使用我們改良後的 Spruce 實作對於網路可用頻寬量測結果的正確性提升了 7.42%；同樣的，在使用網路分類 B 的模擬案例中，使用我們改良後的 Spruce 實作所得到的量測結果正確性也提高了 8.27%。在前述模擬案例 E 中，我們改良後的實作在背景流量為已使用頻寬約 50% 時，量測結果的誤差大約在 3-12%，但在模擬設計 F 中，量測結果的誤差通常在 11-18% 之間，顯然在量測過程中頻寬發生變動的情形會降低 spruce 量測結果的準確性。

表 51、網路分類 A—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果

	網路分類	A	模擬設計	F	背景流量類型	A、B、C、D、E	C (kbps)	100000
背景流量	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	50000	48224.16	27474.2	4336.734	48224.27	30750.8	1088.299	3276.49
B	50000	48282.51	19632.2	3990.515	48282.71	37002.4	2236.403	17370.01
C	50000	60539.52	43914.2	896.8897	60539.5	42708	362.3796	-1206.18
D	50000	43430.82	17658.6	844.3917	43430.87	29133.2	2665.961	11474.55
E	50000	56984.4	36314.4	627.463	56984.4	42489.8	1456.839	6175.40
						結果：	平均差異	7418.05
							差異%	7.42%

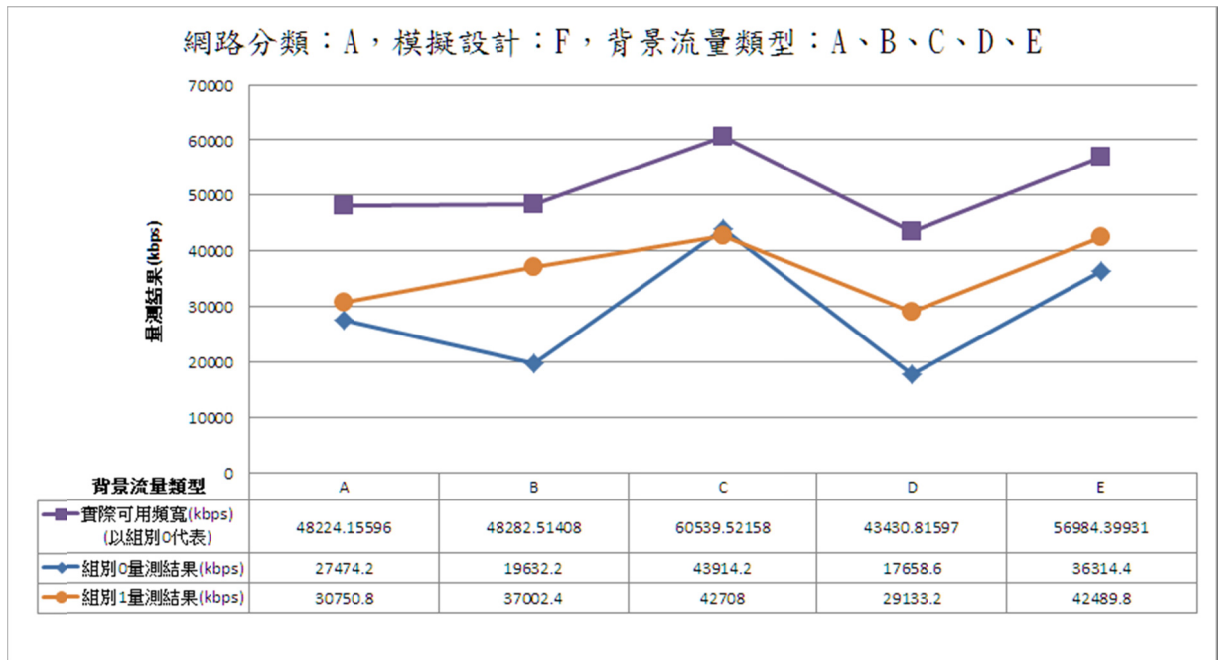


圖 32、網路分類 A—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果圖



表 52、網路分類 B—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果

	網路分類	B	模擬設計	F	背景流量類型	A、B、C、D、E	C (kbps)	10000
背景流量	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	5000	4840.227	2849	55.0318	4840.227	3581.8	90.555	732.80
B	5000	4822.748	2475.4	70.5216	4822.748	3801	10.4881	1325.60
C	5000	6034.37	3784	61.8425	6034.37	4617	26.7114	833.00
D	5000	4390.634	2062.8	84.9747	4390.634	2759.4	44.7694	696.60
E	5000	5716.857	3768.6	75.4076	5716.857	4315.4	56.9631	546.80
						結果：	平均差異	826.96
							差異%	8.27%

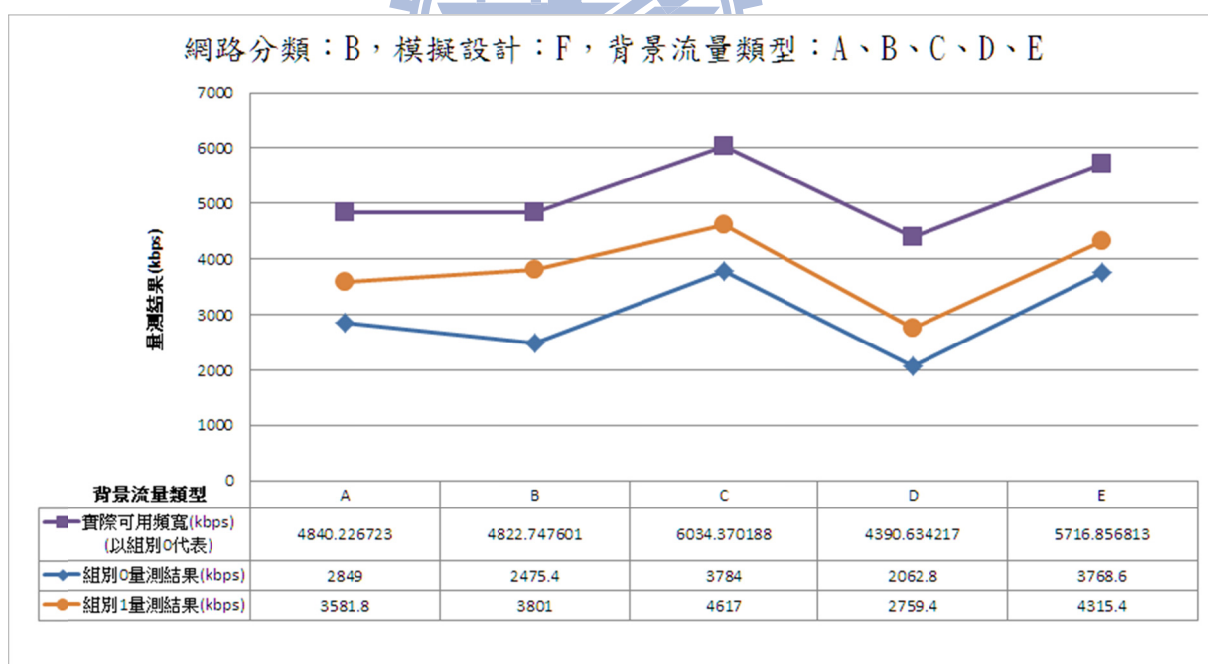


圖 33、網路分類 B—模擬設計 F—背景流量類型 A、B、C、D、E 之模擬結果圖

### 5.6.7 模擬設計 G 之結果-研究 Spruce 在 multi hops 環境下的量測結果

模擬設計 G 的設計目的是想要研究 Spruce 在 multi hops 環境下的量測表現。我們首先設計了網路分類 C 及 D 這兩種類型的案例，在這兩個網路分類中，router 與 router 間的鏈路頻寬都是相同的，並且在各 router 的 link 上，我們加載相同大小的背景流量。因此所有 router 與 router 之間的 link 都是 bottleneck link。

我們將模擬設計 G 中，使用網路分類 C 及 D 的模擬結果整理於表 53 至表 62 及圖 34 至圖 43。在模擬設計 G 中，經由模擬實驗我們發現，使用網路分類 C 及 D 的模擬案例在沒有背景流量的情況下，尚能量測出當時的網路可用頻寬；但隨著背景流量逐漸加大，量測的準確度快速的下降。當背景流量達到頻寬的 50%時，量測出的結果數值已非常小或為 0。由此可知 Spruce 並不具備處理 multi hop 上多重 bottleneck 的能力。

表 53、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	C	模擬設計	G	背景流量類型	A	C (kbps)	10000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	88956.6	428.678	100000	92701.2	381.039	3744.60
B	90000	90333.46	56769.2	977.2603	90333.46	64261.4	773.7321	7492.20
C	75000	75815.86	9372.8	1215.94	75815.86	20434.2	2492.431	11061.40
D	50000	51446.37	0	0	51446.37	611.4	221.0878	611.40
E	25000	27448.15	0	0	27448.15	0	0	0.00
F	10000	12334.24	0	0	12333.21	0	0	1.03
G	0	10010.5	336.4	8.5029	10008.9	336	8.9163	1.21
H	50000	48224.04	0	0	48223.93	221.2	332.2156	221.31



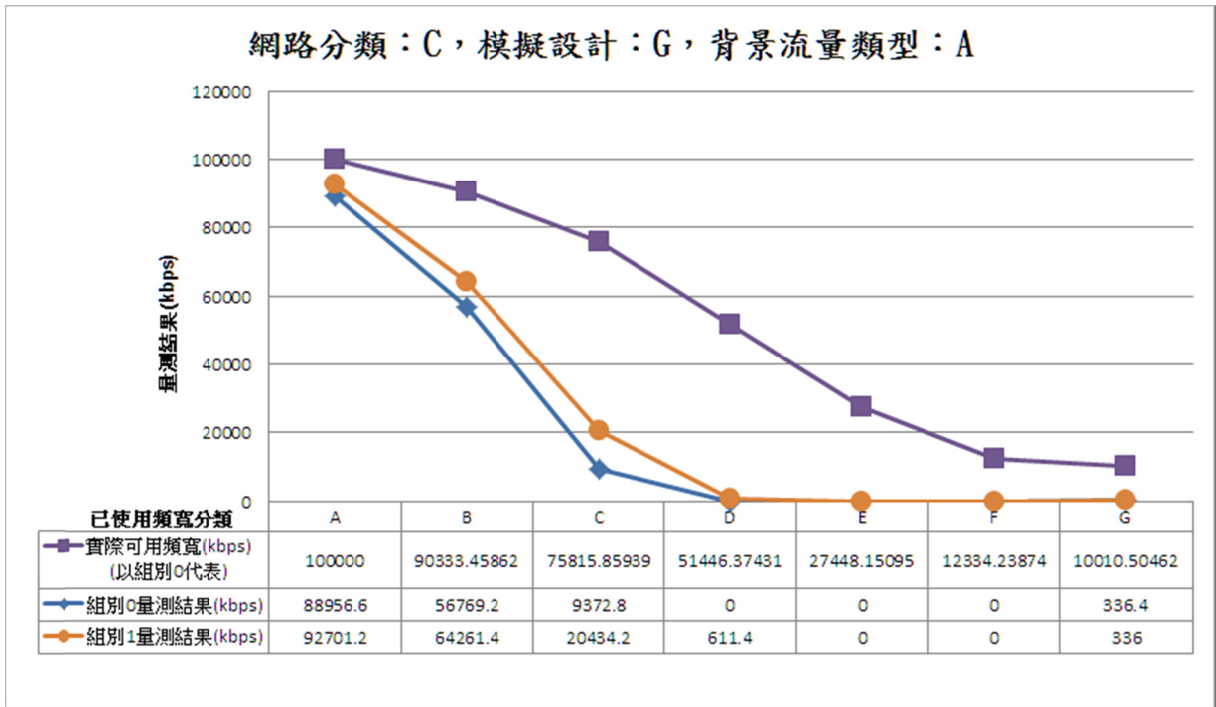


圖 34、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖



表 54、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果

網路分類	D	模擬設計	G	背景流量類型	A	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	8903.4	30.8513	10000	9284	17.9025	380.60
B	9000	9034.264	6091.6	108.4126	9034.264	7057.8	111.735	966.20
C	7500	7585.373	1148	204.338	7585.373	1934.8	160.9618	786.80
D	5000	5170.746	0	0	5170.746	168.6	43.4891	168.60
E	2500	2753.25	0	0	2753.25	0	0	0.00
F	1000	1308.376	0	0	1306.081	0	0	2.30
G	0	1000.351	44.6	0.8944	1000.81	44.8	0.4472	-0.26
H	5000	4840.227	0	0	4840.227	114.2	118.2844	114.20

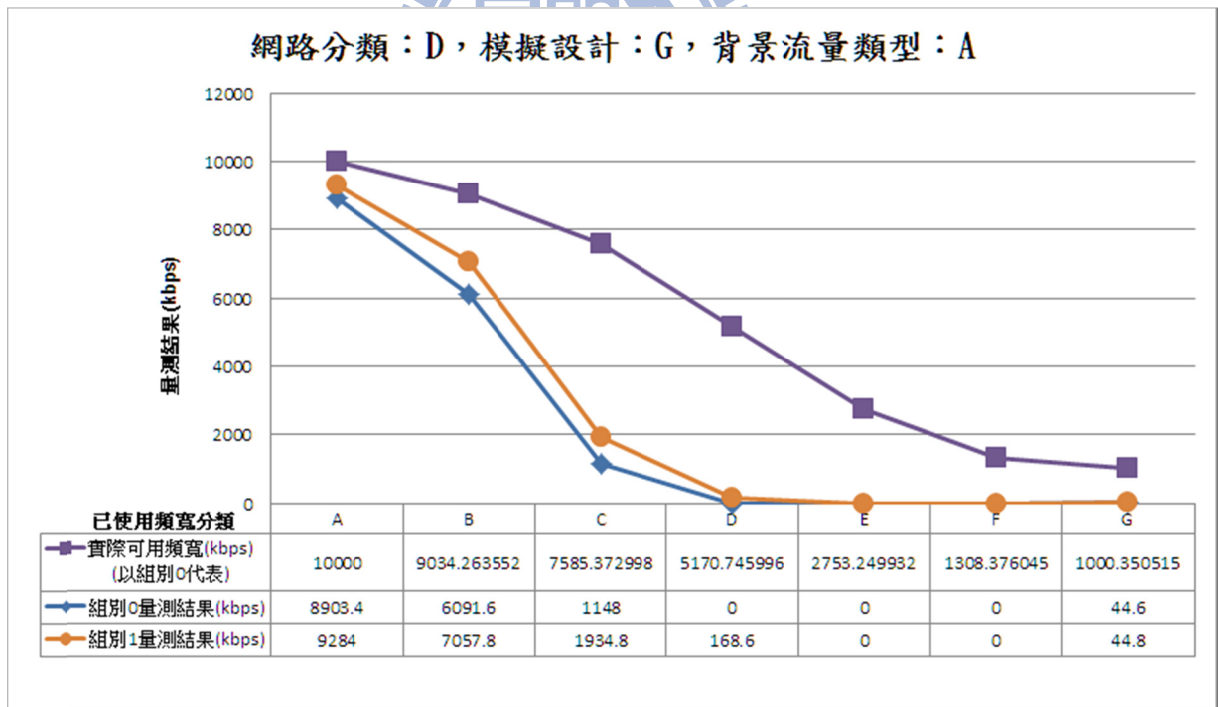


圖 35、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖

表 55、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果

網路分類	C	模擬設計	G	背景流量類型	B	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	100000	100000	88364.6	467.9063	100000	92606	418.2368	4241.40
B	90000	90362.79	65461.6	674.3147	90362.79	66300.2	801.988	838.60
C	75000	75856.86	30039.4	985.5837	75856.86	37355.2	1795.233	7315.80
D	50000	51583.53	0	0	51583.53	13416.6	1108.14	13416.60
E	25000	27294.2	0	0	27294.17	737.8	544.4825	737.82
F	10000	12648.02	0	0	12646.16	588.6	379.6634	590.46
G	0	10097.01	0	0	10109.63	0	0	-12.62
H	50000	48282.51	0	0	48282.51	6702.2	816.5566	6702.20

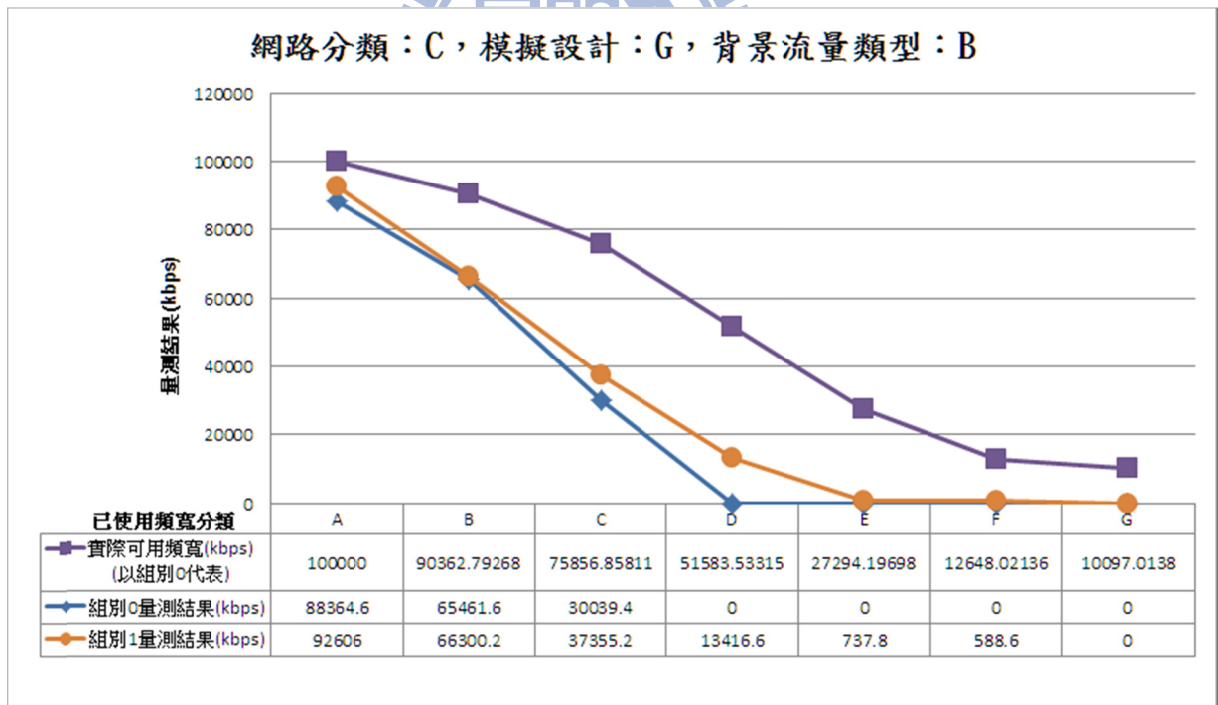


圖 36、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖

表 56、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果

網路分類	D	模擬設計	G	背景流量類型	B	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	8876.8	49.7665	10000	9284.4	37.2465	407.60
B	9000	9005.643	6057.4	76.8167	9005.643	6356.8	55.0926	299.40
C	7500	7556.997	3233.6	137.023	7556.997	3143.4	57.0114	-90.20
D	5000	5160.376	0	0	5160.376	1322.8	90.8086	1322.80
E	2500	2804.027	0	0	2804.027	141.6	17.5585	141.60
F	1000	1344.267	0	0	1330.261	32.6	23.3302	46.61
G	0	1059.959	17.8	24.3762	1066.431	8.8	19.6774	-15.47
H	5000	4822.748	0	0	4822.748	870.8	73.9676	870.80

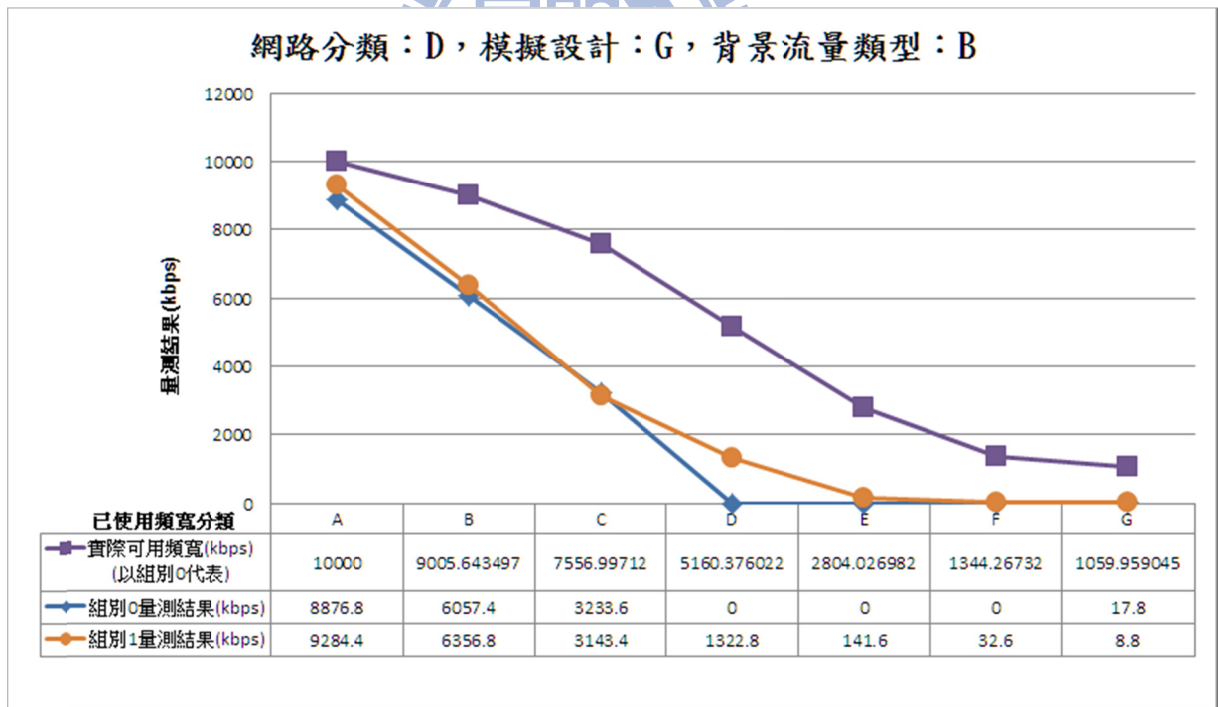


圖 37、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖

表 57、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果

網路分類	C	模擬設計	G	背景流量類型	E	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
A	100000	100000	88818.8	350.2666	100000	92967	86.1046	4148.20
B	90000	91988.44	65273.6	1053.947	91988.44	70110.8	982.3771	4837.20
C	75000	79890.45	45916.4	1358.133	79890.45	47489.6	513.0578	1573.20
D	50000	59763.64	0	0	59763.64	19374.4	641.0611	19374.40
E	25000	39600.48	0	0	39600.48	5001	465.591	5001.00
F	10000	27365.82	0	0	27365.82	1582.4	482.0963	1582.40
G	0	19182.03	0	0	19181.96	404.6	121.026	404.67
H	50000	56984.4	0	0	56984.4	11685.6	660.9654	11685.60

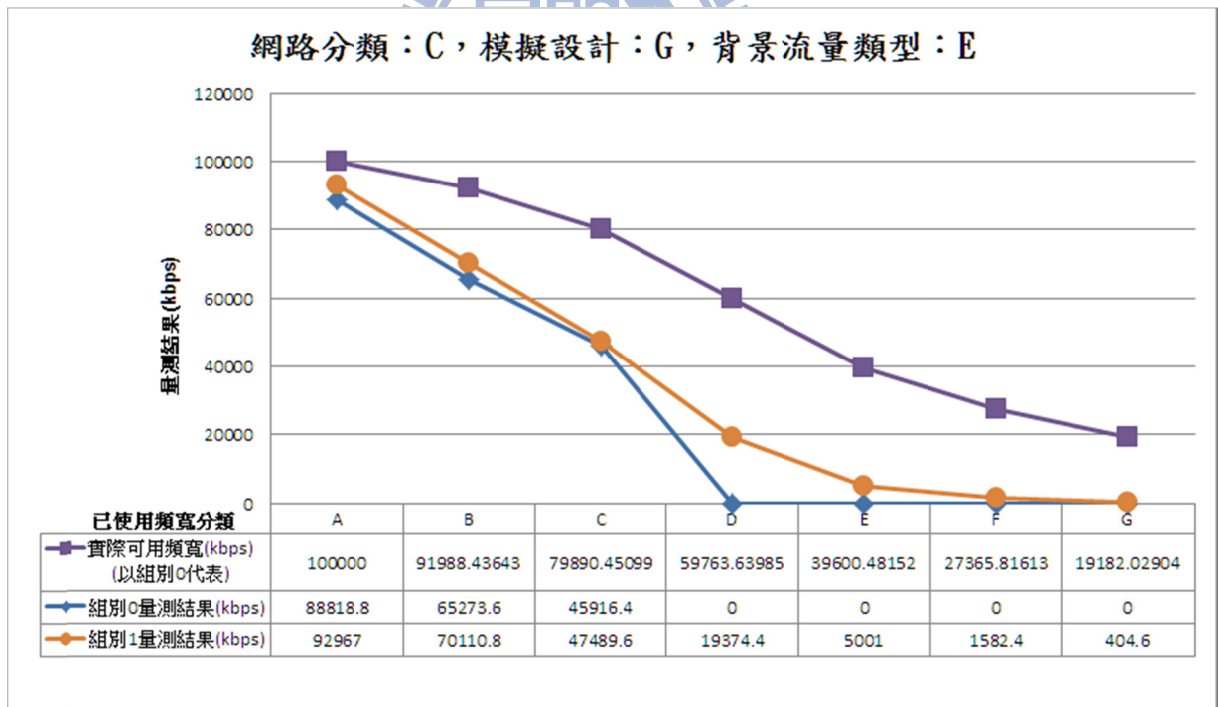


圖 38、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖

表 58、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果

網路分類	D	模擬設計	G	背景流量類型	E	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	8884	39.5664	10000	9265.8	24.4479	381.80
B	9000	9212.749	6338.2	109.534	9212.749	6976.8	131.4104	638.60
C	7500	8030.499	4022.4	114.1722	8030.499	4762.6	22.3226	740.20
D	5000	5974.993	386.8	58.2168	5974.993	2251.4	88.0074	1864.60
E	2500	3981.544	0	0	3981.544	349.4	43.3394	349.40
F	1000	2760.825	0	0	2760.825	217	26.3344	217.00
G	0	1988.055	0	0	1988.055	40.2	21.4056	40.20
H	5000	5716.857	0	0	5716.857	1110.2	56.5924	1110.20

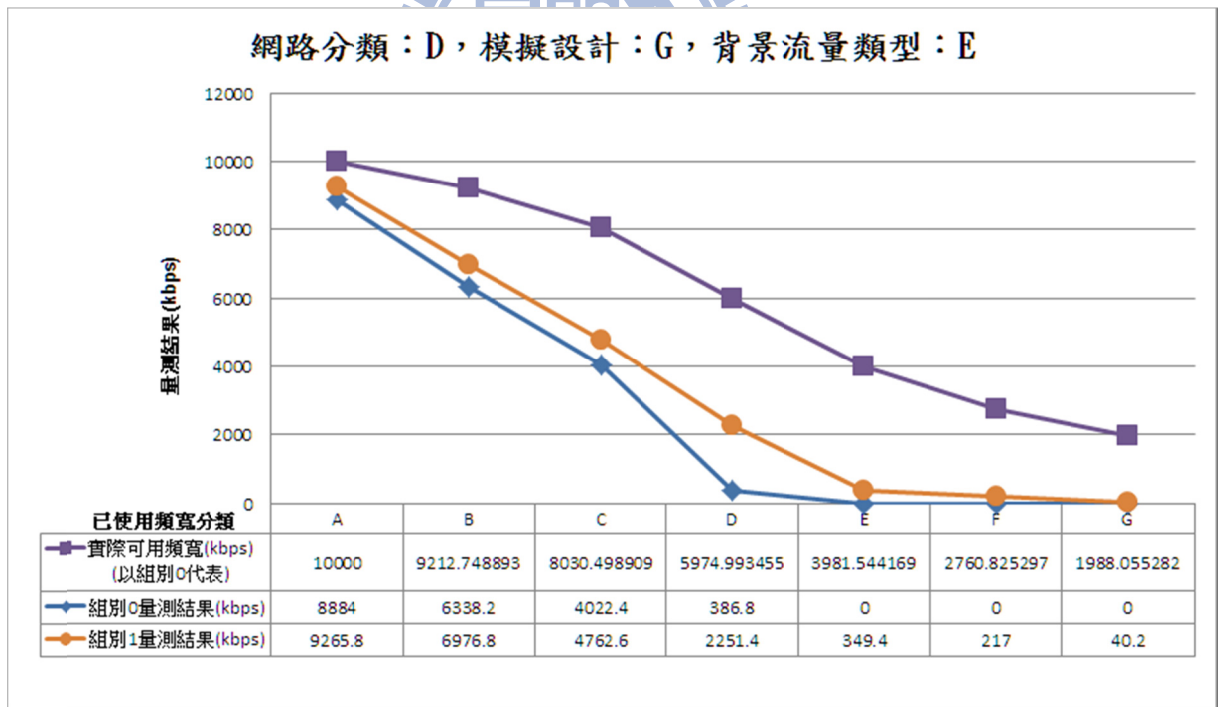


圖 39、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖

表 59、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果

	網路分類	C	模擬設計	G	背景流量類型	F	C (kbps)	10000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	100000	100000	88928.8	568.1128	100000	92842.2	410.1466	3913.40
B	90000	90102.21	61417.8	668.8981	90102.21	69363	1343.474	7945.20
C	75000	75110.52	14438.8	872.2114	75110.52	24386	922.5023	9947.20
D	50000	49863.18	0	0	49863.18	3798.6	666.1335	3798.60
E	25000	24501.4	0	0	24499.2	1300.4	418.6601	1302.60
F	10000	12433.78	235.6	131.9633	12424.49	293.6	5.0794	67.29
G	0	10598.72	311	3.1623	10609.21	242.2	135.7045	-79.29

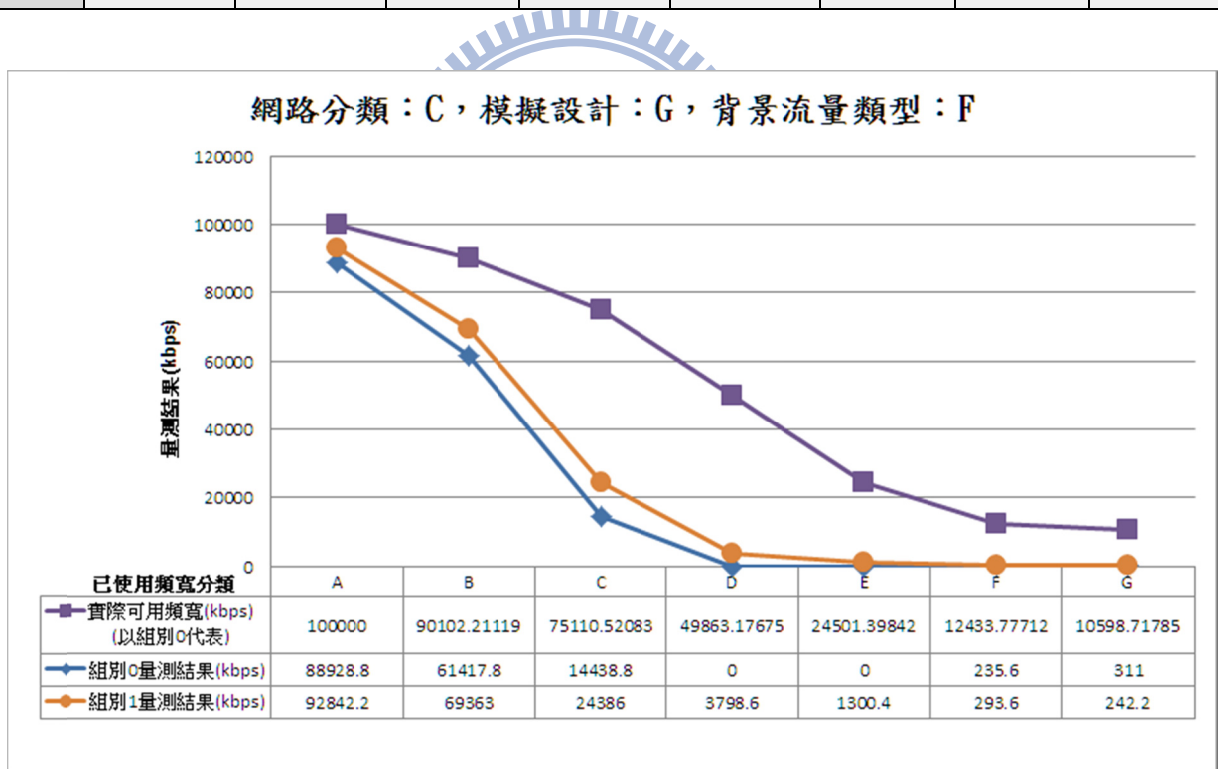


圖 40、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖

表 60、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果

	網路分類	D	模 擬 設 計	G	背 景 流 量 類 型	F	C (kbps)	10000
已使 用頻 寬分 類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用 頻 寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結 果 (kbps)	組別 0 量 測結果標 準差	(3)組別 1 實際可用 頻 寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結 果 (kbps)	組別 1 量 測結果標 準差	差 異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	8878.6	62.911	10000	9259.2	38.3693	380.60
B	9000	8994.457	6136.2	110.459	8994.457	6560	66.1891	423.80
C	7500	7549.328	2029.6	104.658	7549.328	2990.2	133.6552	960.60
D	5000	5068.804	0	0	5068.804	498.8	101.9519	498.80
E	2500	2402.653	0	0	2402.653	28.8	7.328	28.80
F	1000	1343.859	0	0	1372.515	15.2	18.9394	-13.46
G	0	1097.115	27.4	25.016	1146.787	0	0	-77.07

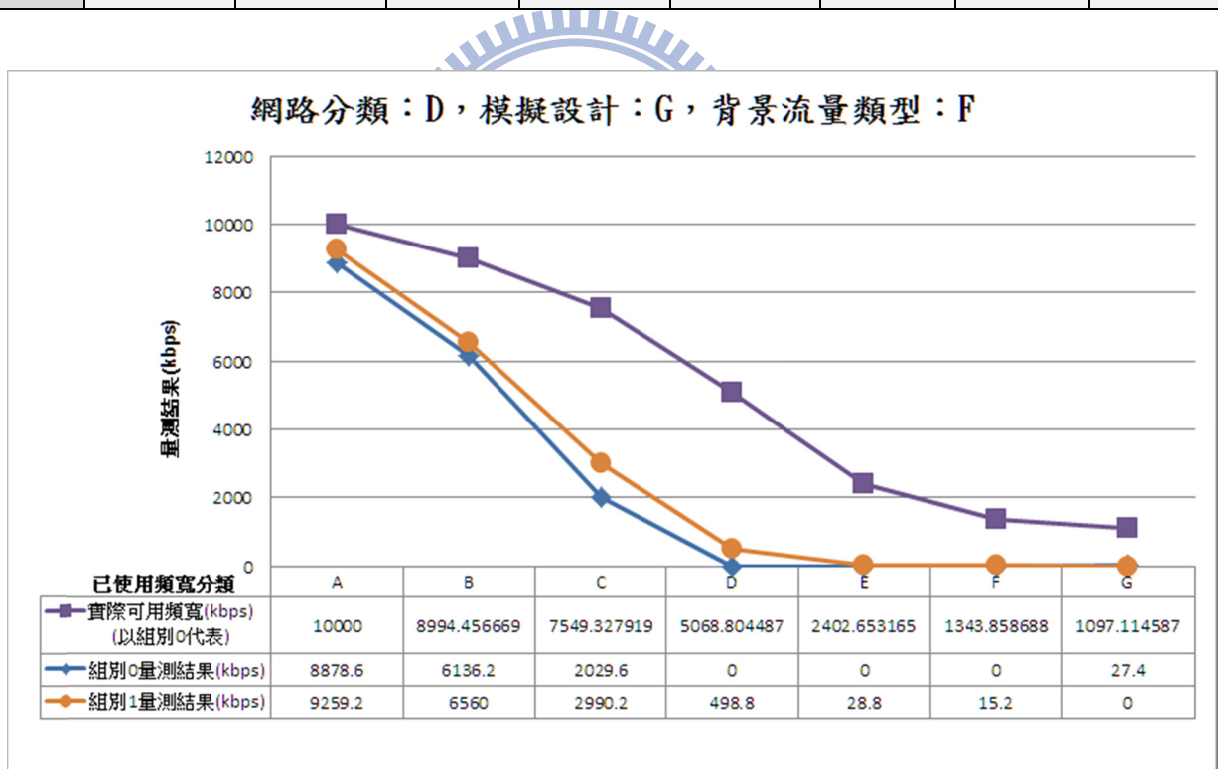


圖 41、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖



表 61、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果

網路分類	C	模擬設計	G	背景流量類型	X	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 =  (1)-(2)   (3)-(4)
A	100000	100000	88727.4	546.3065	100000	92734	555.8759	4006.60
B	90000	90362.79	59566.6	663.1179	90362.79	65821.4	403.7404	6254.80
C	75000	75856.86	33541	533.068	75856.86	42381.4	795.7659	8840.40
D	50000	51583.53	0	0	51583.53	13977.6	991.5976	13977.60
E	25000	27294.23	0	0	27294	68.8	153.8415	69.03
F	10000	12648.47	0	0	12646.34	0	0	2.13
G	0	10027.01	195.8	179.6001	10119.48	59.2	132.3752	-229.06
H	50000	48281.94	0	0	48281.94	5718	1257.226	5718.00

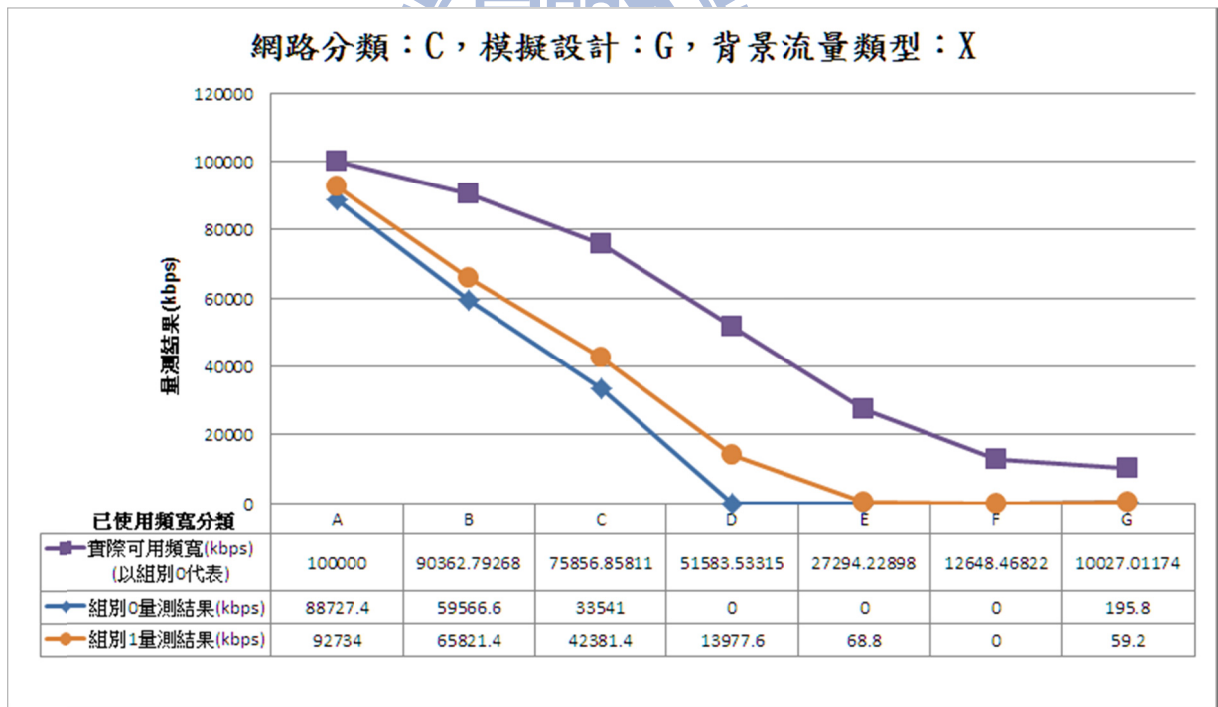


圖 42、網路分類 C—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果圖

表 62、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果

網路分類	D	模擬設計	G	背景流量類型	X	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	8881.6	45.4015	10000	9262.2	40.721	380.60
B	9000	9005.643	6178.6	67.7665	9005.643	6983.6	48.0656	805.00
C	7500	7556.997	3525.2	107.1574	7556.997	4351.6	71.5633	826.40
D	5000	5160.376	0	0	5160.376	1367.8	88.2791	1367.80
E	2500	2804.027	0	0	2804.027	37.6	29.177	37.60
F	1000	1346.355	0	0	1329.877	0	0	16.48
G	0	1065.444	18	24.6881	1063.183	27.8	25.5382	12.06
H	5000	4822.748	0	0	4822.737	728.2	47.6781	728.21

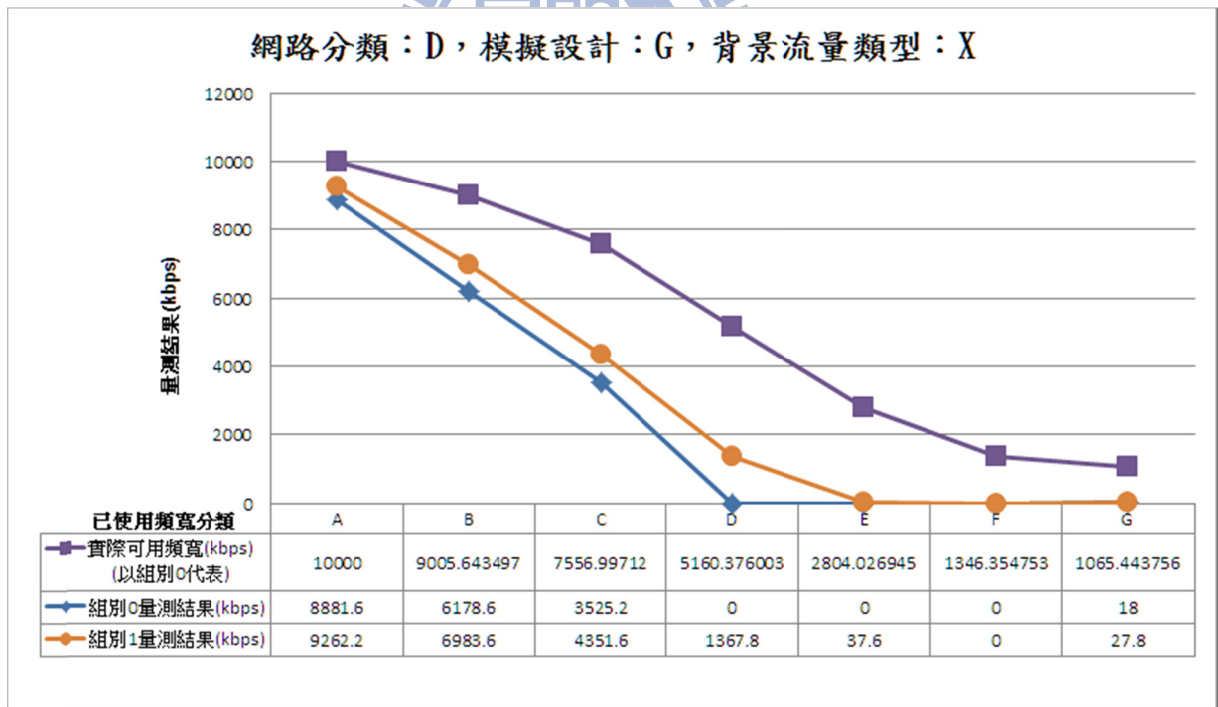


圖 43、網路分類 D—模擬設計 G—背景流量類型 X 之模擬結果圖

在模擬設計 G 中，我們另外設計了網路分類 E，用來探討在 multi hops 單一 bottleneck link 的情境。在使用網路分類 E 的模擬案例中，Spruce 原設計雖能量測出當時的網路可用頻寬，但隨著已使用頻寬比例的上升，量測的誤差程度也逐漸放大；相對於原 Spruce 設計，我們改良後的實作在大部份的案例量測結果的誤差程度都在 3-10%之內，並且提供較原設計高出平均 3.49-8.85%的量測準確性。

我們整理模擬設計 G 中使用網路分類 E 的模擬案例實驗結果於表 63 至表 66 以及圖 44 至圖 47。

表 63、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果

	網路分類	E	模擬設計	G	背景流量類型	A	C (kbps)	10000
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9158.4	16.6673	10000	9548.8	15.3525	390.40
B	9000	9034.264	7971.2	18.7003	9034.264	8395.2	36.813	424.00
C	7500	7585.373	5802.2	86.358	7585.373	7123.4	50.4014	1321.20
D	5000	5170.746	3671.8	54.5775	5170.746	4279.2	48.3032	607.40
E	2500	2753.25	1412.2	254.8356	2753.25	2292	191.6455	879.80
F	1000	1308.147	0	0	1306.081	563	45.853	565.07
G	0	1001.383	198.4	4.1593	1000.924	196.8	1.6432	-1.14
H	5000	4840.227	3092.2	162.1919	4840.227	3181.6	90.1737	89.40
	結果：		A-E 平均差異		724.56		平均差異	534.52
			A-E 平均差異%		7.25%		差異%	5.35%

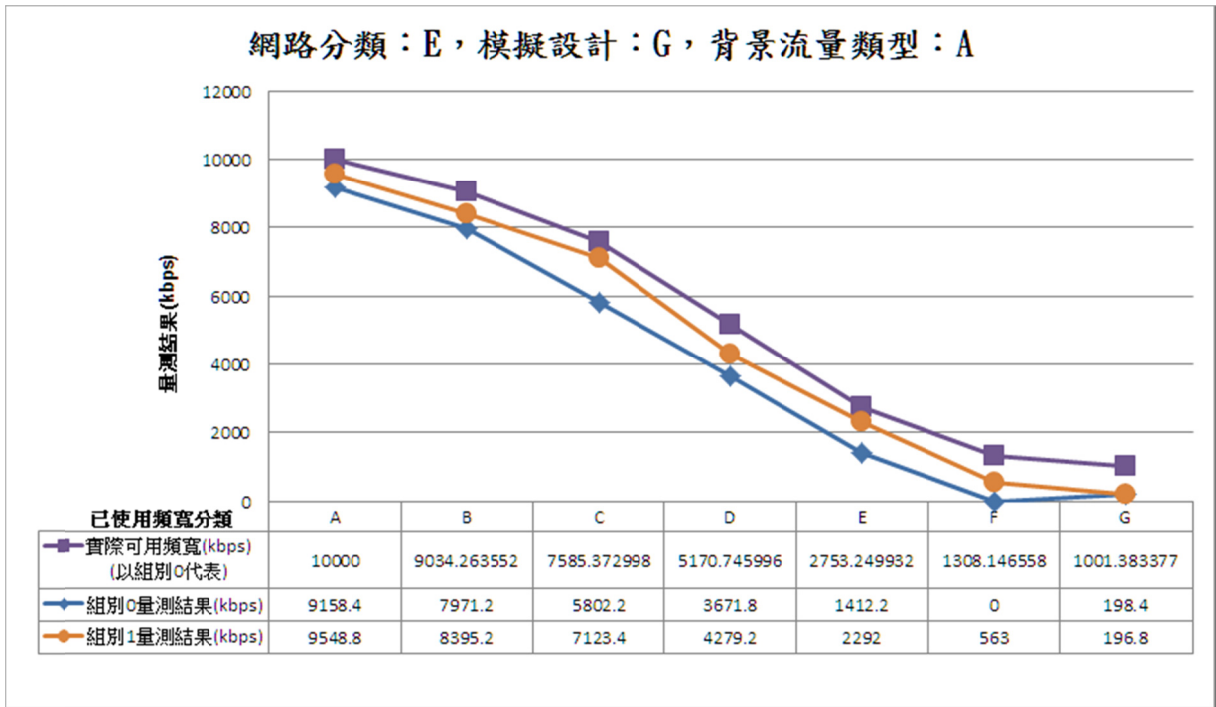


圖 44、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 A 之模擬結果圖



表 64、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果

網路分類	E	模擬設計	G	背景流量類型	B	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9167	13.9104	10000	9564	13.0576	397.00
B	9000	9005.643	8050.8	29.8278	9005.643	8008	28.3108	-42.80
C	7500	7556.997	6541	47.0903	7556.997	6815.4	24.7245	274.40
D	5000	5160.376	3818	62.3338	5160.376	4458	46.0923	640.00
E	2500	2804.027	1372.8	150.4084	2804.027	2388.4	38.6756	1015.60
F	1000	1346.623	0	0	1330.406	1709.6	81.1006	967.43
G	0	1065.496	67.6	94.9647	1102.886	39	87.2067	-65.99
H	5000	4822.748	2704.8	50.9087	4822.748	4005.4	27.8442	1300.60
結果：			A-E 平均差異		456.84		平均差異	560.78
			A-E 平均差異%		4.57%		差異%	5.61%

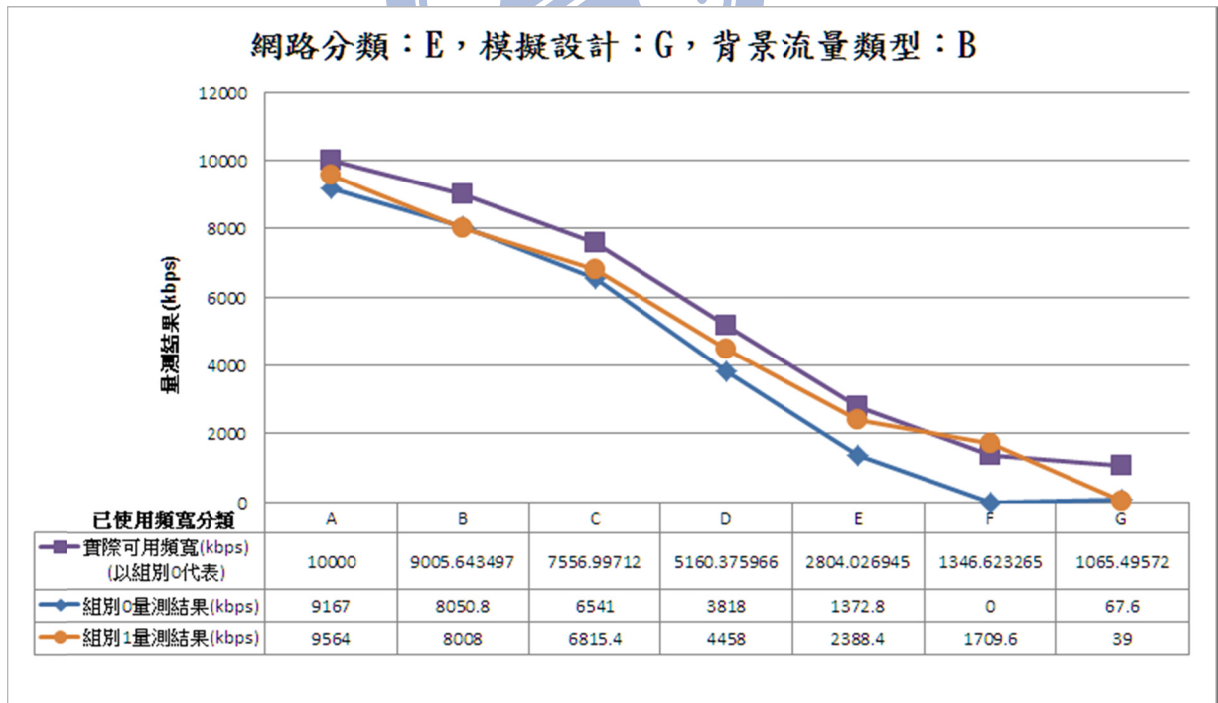


圖 45、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 B 之模擬結果圖

表 65、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果

網路分類	E	模擬設計	G	背景流量類型	E	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)   (3)-(4)
A	10000	10000	9203.6	26.8198	10000	9540.4	38.2727	336.80
B	9000	9212.749	7931.6	46.2526	9212.749	8595.2	45.8988	663.60
C	7500	8030.499	6915.2	69.251	8030.499	7614.2	26.0998	699.00
D	5000	5974.993	4596.6	84.1475	5974.993	4749.8	45.5324	153.20
E	2500	3981.544	1581.6	70.9422	3981.544	3596.6	29.2797	2015.00
F	1000	2760.825	1236.2	277.9185	2760.825	2443.2	147.9787	1207.00
G	0	1988.055	0	0	1988.055	1654.2	44.6677	1654.20
H	5000	5716.857	4074.4	142.8489	5716.857	4426.4	54.2568	352.00
結果：			A-F 平均差異		845.77		平均差異	885.10
			A-F 平均差異%		8.46%		差異%	8.85%

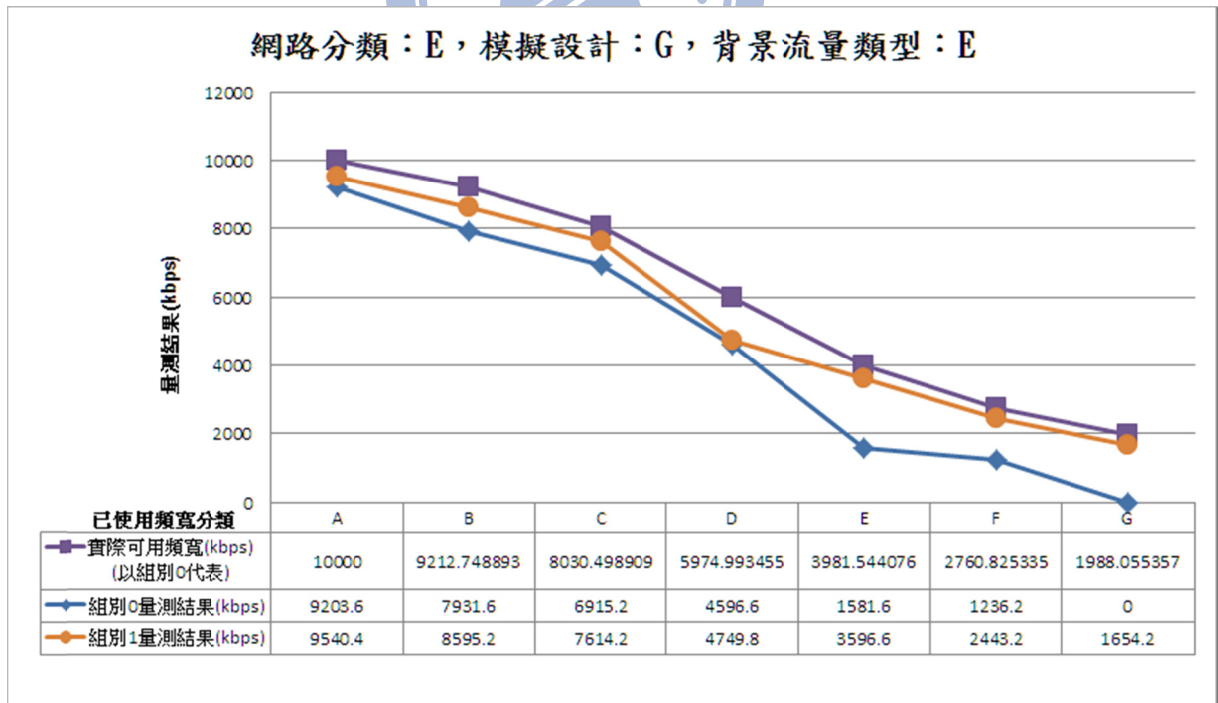


圖 46、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 E 之模擬結果圖

表 66、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果

網路分類	E	模擬設計	G	背景流量類型	F	C (kbps)	10000	
已使用頻寬分類	可用頻寬 (kbps)	(1)組別 0 實際可用頻寬 (kbps)	(2)組別 0 量測結果 (kbps)	組別 0 量測結果標準差	(3)組別 1 實際可用頻寬 (kbps)	(4)組別 1 量測結果 (kbps)	組別 1 量測結果標準差	差異 = (1)-(2)  減  (3)-(4)
A	10000	10000	9185.2	11.7771	10000	9562.8	31.1881	377.60
B	9000	8994.457	7715	47.5763	8994.457	8544.8	41.5295	829.80
C	7500	7549.328	6553.6	39.5576	7549.328	6115.2	35.6889	-438.40
D	5000	5068.804	3996.4	73.6974	5068.804	4207.8	34.0544	211.40
E	2500	2402.653	515.4	226.961	2402.653	1909.2	61.2225	1393.80
F	1000	1290.891	116.2	106.1047	1317.747	236.6	433.5779	93.54
G	0	1065.974	214.4	46.7793	1066.334	188.6	1.5166	-26.16
						結果：	平均差異	348.80
							差異%	3.49%

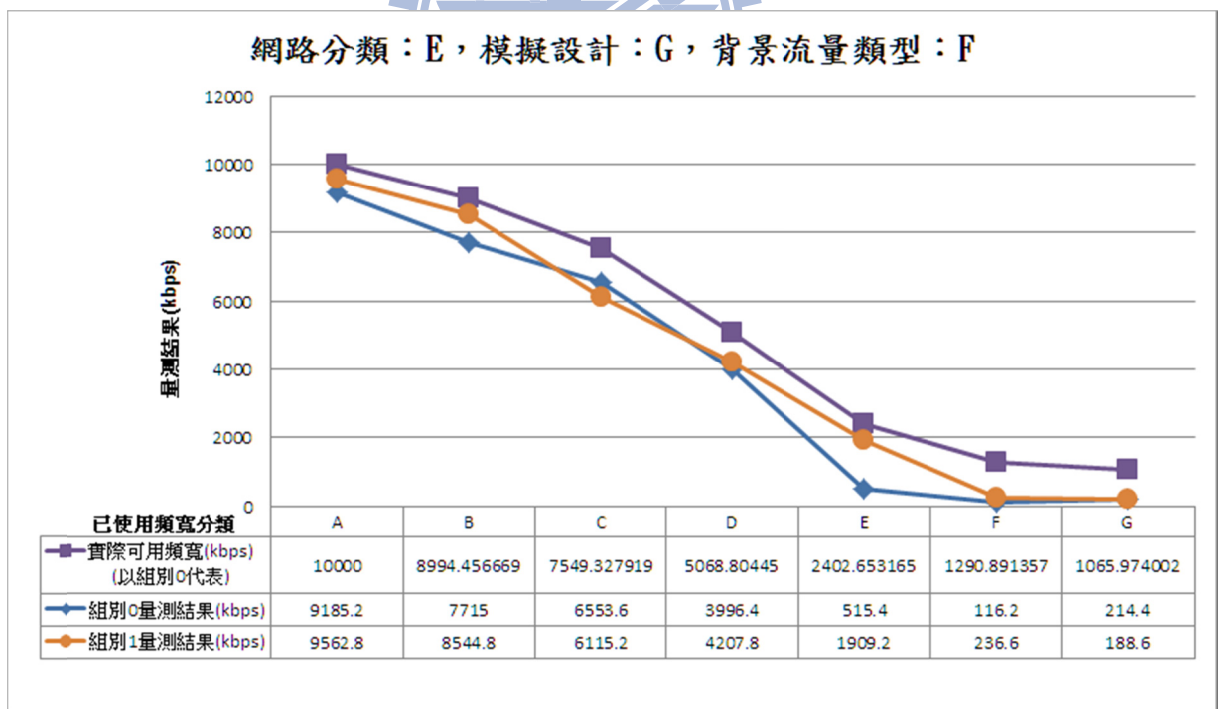


圖 47、網路分類 E—模擬設計 G—背景流量類型 F 之模擬結果圖

## 六、結 論

在現今網路科技快速演進且網路相關應用日趨多元的環境裡，網路可用頻寬資訊對於各種網路應用而言是相當重要的資訊。常見的網路可用頻寬量測技術可分為探測速率模型(Probe Rate Model, PRM)以及探測間隔模型(Probe Gap Model, PGM)這兩大類型。使用 PRM 模型的實作雖然較 PGM 模型實作有較高的量測準確性，但量測所需的時間較長，並且由於其量測是以形成網路壅塞來推估當時的網路可用頻寬，因此並不適合使用於真實的網路世界。相對於 PRM，PGM 模型則具有輕量、快速、準確的特性，較適合用於真實世界的網路可用頻寬量測工作。

在本論文的研究中，我們選擇了採用 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具—Spruce，設計包含不同網路拓樸、頻寬、背景流量類型、使用頻寬比例、參數等情境的模擬案例，對 Spruce 的行為特性進行深入的探討，同時藉此了解 PGM 模型的特性。並於觀察 Spruce 在不同情境下的量測表現之後，提出改善的建議，透過模擬案例實驗證實，我們的改良確實有效。

我們將本論文中，經由觀察、模擬及改良 Spruce 原設計後所得到的結果整理成以下的結論：

1. Spruce 原設計中，在 intra pair gap 及 inter pair gap 的等待時間是以 pooling loop 的方式強佔處理器的控制權，希望能以最接近預期排定時間的方式送出探測封包。我們對 Spruce 原設計的機制進行效能改良，並證明效能改良後的實作有效的縮短模擬執行所需的時間，並且量測結果準確度較原設計準確。
2. 我們改良 Spruce 原設計在計算探測 packet pair 中的兩個 packets 間距的設計，將 Ethernet header 納入計算，模擬結果證實，改良後的實作量測結果較原設計準確。
3. 在 Spruce 原設計中，inter pair gap 的配置是採用 exponential 分配，我們擴充 Spruce 的設計，將 uniform 分配加入成為 inter pair gap 的配置方式，經模擬實驗發現，採用 uniform 分配取代 exponential 分配做為 inter pair gap 配置的量測結果較為準確。



4. 在 Spruce 原設計中，大部份量測的結果傾向於低估實際網路可用頻寬，但在 bottleneck link 頻寬使用率較高的情況下，卻容易錯誤的量測而高估可用頻寬達 bottleneck link 頻寬的 20-40%。我們改良 Spruce 在量測結果的評估方式後以模擬實驗進行確認，經過我們改良後的實作，量測結果的準確度較接近真正的網路可用頻寬，並且在頻寬使用率較高的情況下，也可有效避免錯誤高估網路可用頻寬的結果發生。
5. 我們探討在 Spruce 量測過程中發生可用頻寬變動的情境，比較 Spruce 原設計與我們改良後的實作，發現改良後的實作所量測的結果正確性提升了 7.42%。並且發現在這樣的情境上，Spruce 量測結果的誤差由其他情境的 3-12%提高至 11-18%。
6. 我們研究 Spruce 在 multi hops 環境下的探測結果，在 path 上多條 link 都是 bottleneck link 的情況下，spruce 無法量測出正確的可用頻寬；而在 multi hops 環境但只有單一 bottleneck link 的情況下，Spruce 原設計雖能量測出當時的網路可用頻寬，但隨著已使用頻寬比例的上升，量測的誤差程度也逐漸放大；相對於原 Spruce 設計，我們改良後的實作在大部份的案例量測結果的誤差程度都在 3-10%之內，並且提供較原設計高出平均 3.49-8.85%的量測準確性。

## 七、未來工作

在本論文中，我們對於採用 PGM 探測間距模型的網路可用頻寬量測工具—Spruce 進行了大規模的研究以了解其行為與特性，並對原設計提出改良後以模擬實驗證實我們的改良確實提升了量測結果的正確性。

其他採用 PGM 模型的網路可用頻寬量測工具，大多數的設計也是修改自 Spruce 或與 Spruce 具有相同特性，未來的研究可以探討本論文所發現的改良是否也可以套用在其他採用 PGM 模型設計的網路可用頻寬量測工具上，改進其量測的準確性。

在 PGM 的模型中，假設 bottleneck link 上的頻寬是已知的，Spruce 的特點之一，也是將頻寬偵測與網路可用頻寬偵測進行區隔，只專注在網路可用頻寬的探討上。但實際上 bottleneck link 頻寬與頻寬使用率這兩個變數若以兩組速率不同的 packet pairs 分別進行偵測，求解二元一次聯立方程式之後是可以求得 bottleneck link 頻寬與及頻寬使用率[20]。未來的研究也可以對以此種機制進行網路可用頻寬量測的工具做進一步的分析與探討，以了解其特性與準確性。



## 參考文獻

- [1] M. Mrak, N. Sprljan, E. Izquierdo, “An Overview of Basic Techniques Behind Scalable Video Coding”, 46th International Symposium Electronics In Marine, ELMAR-2004, pp. 597-602, Zadar, Croatia, 16-18 June 2004.
- [2] J.R. Ohm, “Advances in Scalable Video Coding”, Proceedings of the IEEE, Vol.93, No. 1, pp. 42-56, January 2005.
- [3] J. Strauss, D. Katabi, and F. Kaashoek, “A measurement study of available bandwidth estimation tools”, In Proceedings of Internet Measurement Conference (IMC’ 03), Oct. 2003.
- [4] NCTUns Network Simulator and Emulator is available at <http://nsl10.cs.nctu.edu.tw/>
- [5] S.Y. Wang, C.L. Chou, C.H. Huang, C.C. Hwang, Z.M. Yang, C.C. Chiou, and C.C. Lin, “The Design and Implementation of the NCTUns 1.0 Network Simulator,” Computer Networks, vol. 42, no. 2, pp. 175-197, June 2003. (available at <http://NSL.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>).
- [6] 黎明富, “多媒體串流網路雙向可用頻寬估測機制之研究” [http://www.ee.cgu.edu.tw/member/teacher/mfli/NSC97\\_poster.pdf](http://www.ee.cgu.edu.tw/member/teacher/mfli/NSC97_poster.pdf)
- [7] C.W. Baochun, L. Shuqiao, “Characterizing Peer-to-Peer Streaming Flows”, IEEE JSAC, vol 25(9), 1612-1626 (2007)
- [8] L. Favalli , M. Folli, D. Reforgiato, G. Schembra, ”A Bandwidth-Aware P2P Platform for the Transmission of Multipoint Multiple Description Video Streams” in Proceedings of the Italian Networking Workshop 2009.
- [9] Evaluation of Bandwidth Estimation Tools in [http://www.caida.org/outreach/presentations/2005/pam2005\\_bwest/pam2005\\_bwest.ppt](http://www.caida.org/outreach/presentations/2005/pam2005_bwest/pam2005_bwest.ppt)
- [10] M. Jain and C. Dovrolis, “Ten fallacies and pitfalls on end-to-end available bandwidth estimation” in Proceedings of Internet Measurement Conference (IMC’ 03), Oct. 2003.
- [11] N. Hu and P. Steenkiste, “Evaluation and characterization of available bandwidth probing techniques” in IEEE JSAC Special Issue in Internet and WWW Measurement, Mapping, and Modeling, 21(6), August

2003.

[12] M. Jain, "Pathload: A measurement tool for end-to-end available bandwidth," in Proc. Passive and Active Measurements (PAM) Workshop, Mar. 2002, pp. 14–25.

[13] B. Melander, M. Bjorkman, and P. Gunningberg, "A New End-to-End Probing and Analysis Method for Estimating Bandwidth Bottlenecks," IEEE GLOBECOM'00, pp.415–420, 2000.

[14] V. Ribeiro, R. Riedi, R. Baraniuk, J. Navratil, and L. Cottrell, "Pathchirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths," Proc. PAM, April 2003.

[15] J. Sommers, P. Barford, W. Willinger, "A Proposed Framework for Calibration of Available Bandwidth Estimation Tools", in [http://pages.cs.wisc.edu/~pb/yaz\\_final.pdf](http://pages.cs.wisc.edu/~pb/yaz_final.pdf)

[16] N. Hu and P. Steenkiste, "Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Techniques." IEEE JSAC Special Issue in Internet and WWW Measurement, Mapping, and Modeling, 2003.

[17] "Bandwidth estimation in computer networks: measurement techniques & applications" in <http://www.cc.gatech.edu/~dovrolis/Talks/iasted-keynote.ppt>

[18] V. Riberiro, M. Coates, R. Riedi, S. Sarvotham, B. Hendricks, and R. Baraniuk, "Multifractal Cross-Traffic Estimation," ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling, and Management, Sept. 2000.

[19] J. Navratil, R. L. Cottrell, "ABwE: A Practical Approach to Available Bandwidth Estimation," in: Proc. Passive and Active Measurement Conf., La Jolla, CA, 2003.

[20] H. Wang, Z. Wang, X. Yin, "TSprobe: a Two-Step Probe Method for End-to-End Available Bandwidth Estimation" in <http://www.csee.usf.edu/~labrador/Share/Globecom/DATA/02-175-03.PDF>

[21] L. Lao, C. Dovrolis, M.Y. Sanadidi, "The Probe Gap Model can Underestimate the Available Bandwidth of Multihop Paths", ACM SIGCOMM Computer Communication Review Homepage archive Volume 36 Issue 5, October 2006

[22] D.Y. ZHANG, M.Z. HU, D.H. FANG, "Comparative Analysis of

Available Bandwidth Estimation Tools” in <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2005athens/csc/papers/497-859.pdf>

[23] E. Goldoni, M. Schivi, “End-to-End Available Bandwidth Estimation Tools, an Experimental Comparison” in [http://www.pam2010.ethz.ch/TMA/papers/TMA2010\\_p13.pdf](http://www.pam2010.ethz.ch/TMA/papers/TMA2010_p13.pdf)

[24] S.Y. Wang, C.L. Chou, and C.C. Lin, “The GUI User Manual for the NCTUns 6.0 Network Simulator and Emulator” is available at <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/support/documentation/GUIManual.pdf>

[25] 黃昱銘, “在 NCTUns 網路模擬器上支援 IEEE 802.11 無線感知網路並進行效能評估”, 國立交通大學, 碩士, 2009

[26] S.Y. Wang, C.L. Chou, C. C. Lin, and C.H. Huang, “The Protocol Developer Manual for the NCTUns 6.0 Network Simulator and Emulator” is available at <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/support/documentation/DeveloperManual.pdf>

[27] “Analysis of UDP Traffic” in <http://www.caida.org/research/traffic-analysis/tcpudpratio/>

[28] M. Zhang, M. Dusi, W. John and C. Chen, “Analysis of UDP Traffic Usage on Internet Backbone Links” in <http://www.cse.chalmers.se/~johnwolf/publications/zhang-UDP-CR.pdf>

[29] “Internet Study 2008/2009” in [http://www.ipoque.com/resources/internet-studies/internet-study-2008\\_2009](http://www.ipoque.com/resources/internet-studies/internet-study-2008_2009)