

國立臺灣師範大學科技與工程學院電機工程學系

碩士論文

Department of Electrical Engineering
College of Technology and Engineering
National Taiwan Normal University
Master's Thesis

5 G 毫米波網路中以比例公平為基礎之用戶連線與資源配
置

A proportional-fairness-based client association and resource
allocation in 5G millimeter wave network

李奕叡

Lee, Yi-Rui

指導教授：黃政吉 博士

Advisor: Huang, Jeng-Ji, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

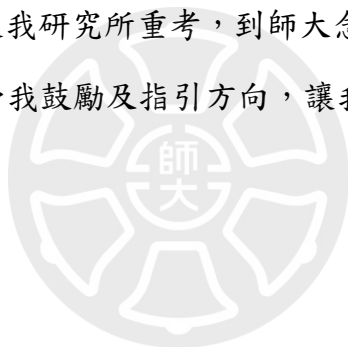
June 2023

致 謝

歲月如梭，轉眼間，兩年的研究生生活到了尾聲，在行囊滿是收穫及祝福之際，我將要畢業了。回想起剛進入師大的那一刻，到一路上走來遇到的人事物，過程中要感謝的人事物太多了，此時此刻充滿了無限的感恩。

感謝我的指導教授黃政吉教授，雖然我的程式基礎沒有很好，教授還是很有耐心且認真，從頭開始指導，讓我能順利跟上進度。無論遇到了什麼樣的瓶頸，老師總是很有耐心地提供我寶貴的建議以及自身經驗與我分享，讓我對這個領域有更多的了解。除此之外，在做人處事的方面，老師也都會給予叮囑與提醒。所有的教誨我都謹記在心，並在此致上最高的尊敬和感謝。

最後感謝我的父母，從我研究所重考，到師大念研究所，一路陪伴著我，且在我人生最低潮的時候，能給予我鼓勵及指引方向，讓我能專心完成我的碩士學業。



5 G毫米波網路中以比例公平為基礎之用戶連線與資源配置

學生：李奕叡

指導教授：黃政吉

國立臺灣師範大學電機工程學系碩士班

摘 要

5G 毫米波網路使用在頻段為 GHz，已知能夠提供 Gbps 級別的速度。然而，在這些頻段中，通道容易受到損壞。因此，類似 Wi-Fi 網路，小型基站被部署在服務區域內，以解決這個問題。

本論文討論了一種基於對偶分解方法的分散式演算法。在該分散式演算法中，不僅可以確定用戶端和存取點之間的連線，還可以以一種比例公平 (proportional fairness, PF) 的方式分配通道資源。具體而言，本論文運用隨機幾何學來計算網絡整體吞吐性能的平均值。這有助於節省從大量模擬運行中取平均值的工作。

關鍵字：毫米波、對偶分解、分散式演算法、比例公平性、隨機幾何。

A proportional-fairness-based client association and resource allocation in 5G millimeter wave network

student : Lee, Yi-Rui

Advisors : Dr. Huang, Jeng-Ji

Department of Electrical Engineering
National Taiwan Normal University

ABSTRACT

A 5G millimeter network, operated in the bands of GHz, is known to provide speeds of Gbps. However, channel is prone to be deteriorated in these bands. Therefore, like a Wi-Fi network, small cells are deployed in a service area to combat this problem.

In this thesis, a distributed algorithm based on the dual decomposition method is discussed. In the distributed algorithm, not only can the associations between clients and access points (APs) be determined, but channel resources are allocated in a way that proportional fairness (PF) can be achieved. In particular, stochastic geometry is employed in the thesis to calculate the mean of the overall throughput performance of the network. This helps to spare the work of taking the average from a lot of simulation runs.

Keywords: mmWave, dual decomposition, distributed algorithm, proportional fairness, stochastic geometry.

目 錄

致 謝	i
目 錄	iv
表 目 錄	vi
圖 目 錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 5G 的介紹	1
1.2 Sub-6 與毫米波(mmWave)	3
1.3 路徑損失	4
1.4 公平性標準	4
1.5 研究背景與動機	5
1.6 章節安排	5
第二章 相關背景知識	6
2.1 通道模型 [3]	6
2.1.1 狀態機率分布	7
2.1.2 路徑損失	7
2.2 [5]	8
2.3 對偶分解法	11
2.4 [6]	15
2.5 [7]	16
2.6 [8]	17
2.7 [9]	18
2.8 資源分配中的效用與公平 [4]	19
2.8.1 優化框架	19
2.8.2 公平性標準	20

第三章	分析方法	23
3.1	最佳化連線	23
3.2	分散式演算法	25
3.3	隨機幾何	34
第四章	數值結果與討論	36
4.1	模擬設置	36
4.2	連線最佳化問題的結果與討論	37
4.2.1	分析討論部分	38
4.2.2	模擬演進部分	39
4.3	模擬添加隨機幾何	43
第五章	結論	47
參 考 文 獻		48
附 錄 一		50
附 錄 二	算幾不等式[11]	53
自 傳		55
學 術 成 就		56

表 目 錄

表 1: 4G 與 5G 的差異。	1
表 2: SUB-6 與 MMWAVE 之比較。	3
表 3 : 模擬參數設定表。	36
表 4: 重要文獻符號表。	50
表 5: 英文縮寫表。	51



圖目錄

圖 1- 1: SUB-6 跟 5G 使用頻段[2]。	4
圖 2- 1: 鏈路狀態機率與傳輸距離關係圖。	6
圖 2- 2: 存取點的資源共享示意圖[5]。	10
圖 2- 3: 用戶與 AP 最佳連線結果圖[5]。	11
圖 2- 4: 跨層設計架構圖。	16
圖 2- 5: 毫米波網路參考示意圖。	18
圖 2- 6: 3 個基地台與 5 個用戶的範例。	21
圖 3- 1: 3 個 AP 與 5 個用戶之間的連線資源範例。	24
圖 3- 2: 演算法 1。	30
圖 3- 3: 3 個 AP 與 10 個用戶範例。	31
圖 3- 4: nk 演進圖($\Delta = 0.01$)。	31
圖 3- 5: Δk 演進圖($\Delta = 0.01$)。	32
圖 3- 6: Nk 演進圖($\Delta = 0.001$)。	32
圖 3- 7: Δk 演進圖($\Delta = 0.001$)。	33
圖 3- 8: Nk 演進圖($\Delta = 0.001$)。	33
圖 3- 9: Δk 演進圖($\Delta = 0.001$)。	34
圖 3- 10: 用戶分布位置。	35
圖 4- 1: 5 個 AP 與 150 用戶位置圖。	37
圖 4- 2: 5 個 AP 與 150 用戶的連線最佳結果圖。	38
圖 4- 3: Δk 之演進圖 (Δk 初始值為 0)。	40

圖 4- 4: Δk 之演進圖(Δk 初始值為 4)。	40
圖 4- 5: Nk 之演進圖。	41
圖 4- 6: $\sum i \in Cxik$ 的演進圖。	41
圖 4- 7: 目標值之演進圖。	42
圖 4- 8: 5 個 AP 與 10000 用戶的位置圖。	43
圖 4- 9: 用戶跟 AP 連線的結果圖(隨機幾何)。	44
圖 4- 10: Δk 之演進圖(隨機幾何)。	44
圖 4- 11: Nk 的演進圖(隨機幾何)。	45
圖 4- 12: $\sum i \in Cxik$ 的演進圖(隨機幾何)。	45



第一章 緒論

1.1 5G 的介紹

5G 為第四代 (4G) 技術的延伸，其性能目標包含高資料速率、減少延遲、節省能源、降低成本、提高系統容量、大規模裝置連接，以提供更卓越的網路體驗。5G 在物聯網 (Internet of Things, IoT) 方面有著廣泛的應用，例如：無人汽車、無人機控制、或透過無人機搜救災難現場。這些應用都受益於 5G 的低延遲 (low delay) 特性，使其操作更順暢。此外，5G 也促進了遠距醫療、VR (virtual reality) 直播、4K 畫質直播、智慧家庭應用等領域的發展。表 1 為 4G 與 5G 之差異。

表 1: 4G 與 5G 的差異。

	4G	5G
最高傳輸速率	0.1-1 Gbps	1-10 Gbps
延遲	15-25 毫秒	1 毫秒
頻率	10 GHz 以下	30-300 GHz
優點	低頻率覆蓋，不用大量基地台	高頻率提升傳輸速率
缺點	頻寬小易壅塞	難穿透固體，訊號隨距離快速下降，需要建置更多基地台

5G 的特點除了傳輸速度快，還有三大特色如下：

- 高頻寬 (eMBB, Enhanced Mobile Broadband) : 當使用高頻寬時, 我們通過增加頻譜範圍來提高數據傳輸速度。據統計, 5G 毫米波技術提供了更大的頻譜範圍, 其最高頻寬可達 800 MHz, 比 4G LTE 的 20 MHz 大 40 倍。同時, 5G 毫米波還實現了更快的傳輸速度, 最高可達每秒 500 Mb, 相比 4G LTE 快了近 10 倍。這將明顯地加快我們在網絡上下載和上傳數據的速度, 帶來更順暢的網絡體驗。未來, 這將對通信和互聯網應用帶來巨大的影響。[1]
- 低延遲 (uRLLC: Ultra-Reliability and Low Latency Communications) : 當我們想要降低延遲時, 主要方法是減少資訊傳送所需的時間。在這方面, 關鍵技術是近來常聽到的「邊緣運算 (Edge Computing)」。簡單來說, 邊緣運算是在使用者附近 (例如基地台旁邊) 建立邊緣計算台, 以便能夠在就近處直接處理一些較簡單的資訊, 而不是將所有資訊都傳送回中央雲端 (Cloud) 進行處理。這樣一來, 我們能夠顯著減少資訊傳輸的時間, 進而降低整體的延遲問題。 [1]
- 廣連結 (mMTC: Massive Machine Type Communications) : 5G 網路的優勢在於能夠在相同範圍內連接更多的裝置。根據統計數據, 每平方公里的 5G 網路頻寬約能夠連接 100 萬個裝置, 這是 4G LTE 能力的 10 倍。換句話說, 5G 技術大幅擴增了在特定區域內支援裝置的能力, 為更多的設備提供高效且穩定的連接。[1]

在 5G 時代, 要實現以上三個特性, 必須同時使用 Sub-6 GHz 和毫米波技術, 並將它們互補運用。當需要高速上網和低延遲時, 使用速度較快的毫米波頻譜; 而在萬物互聯、低功耗、高可靠度的場景下, 則使用傳遞距離較遠且繞射能

力較強的 Sub-6 GHz 頻譜。因此，真正完整的 5G 網路實際上是一種異質結合網路 (HetNet)，它不僅整合了 4G LTE 技術，還包含了 Sub-6 GHz 和毫米波頻譜的服務，以最大限度地滿足不同應用場景的需求。

1.2 Sub-6 與毫米波(mmWave)

目前 5G 主要的頻段分為 Sub-6 (6 GHz 以下) 和毫米波 mmWave (24 GHz 以上)。如圖 1-1。其中，Sub-6 與 4G LTE 技術相近，主要不同在於 Sub-6 提升了頻寬以實現更高的傳輸速率，被稱為是初級階段的 5G 技術。目前大多數國家主要電信業者為了降低成本，主要採用 Sub-6 為主。另一方面，毫米波 mmWave 過去廣泛使用於衛星及地面的點對點 (point-to-point) 傳輸，現在則被考慮用於商業的細胞通訊 (cellular communications)。這項技術將頻段提升至 24 GHz 以上，具有快速的傳輸速率、低延遲和更大的頻寬，被稱為是進階的 5G 技術。表 2 為 Sub-6 與 mmWave 之比較。根據表 2，可發現 Sub-6 與 mmWave 有互補的功能，因此未來可能有兩者並存的混合系統 (hybrid system)，以實現完整的涵蓋，尤其是在室內 (indoor coverage)。

表 2: Sub-6 與 mmWave 之比較。

	Sub-6	mmWave
使用頻段	6GHz 以下	24GHz 以上
最大頻寬	100MHz	400MHz
訊號傳輸	距離長	距離短
穿透力	弱	強
繞射能力	強	弱
傳輸速率	最高 1Gbps	最高 10Gbps
發展難度	低	高

建置成本	低	高
------	---	---

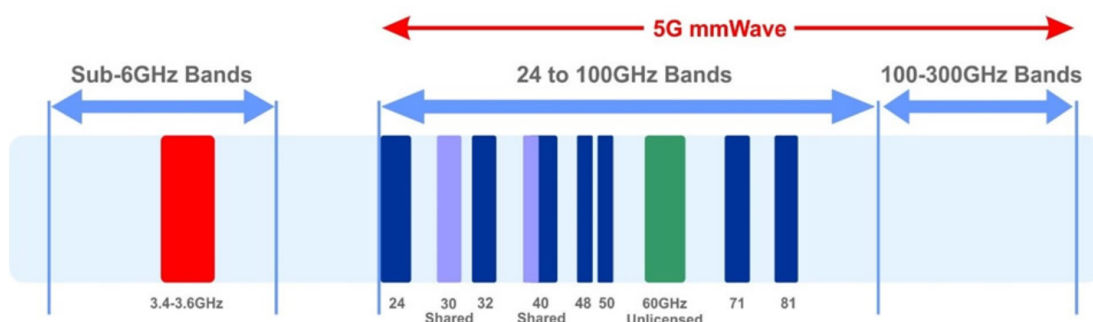


圖 1- 1: Sub-6 跟 5G 使用頻段[2]。

1.3 路徑損失

在本篇論文中，我們為了估測用戶與基地台之間的連線速率，以作為連線決策的依據。根據用戶與基地台之間的距離，可透過以下的計算，獲得訊號雜訊功率比 (signal to noise ratio, SNR)，或簡稱訊雜比。為了達成這個目的，我們採用了[3]中的統計模型，其中包括以用戶與存取點(access point,AP)之間距離為變數的路徑損失函數，以及不同頻率和鏈路狀態所對應的參數。因此，如果我們已知用戶和存取點的位置，就可以計算出訊雜比 SNR。詳細的計算方法將會在第 2.1 節中介紹。

1.4 公平性標準

我們考慮如何將網路資源分配給網路中的不同流量，以滿足用戶所需的公平性，因為 5G 毫米波跟 4G 網路考慮的需求不太一樣。在後面的章節，我們會介紹幾種常見的公平性標準，如最大最小公平性 (max-min fairness)、最小可能延遲公平性 (minimum potential delay fairness) 和比例公平性 (proportional fairness)，這些標準可作為連線問題的考量依據[4]。在本篇論文中，我們將採用比例公平性

作為連線問題的公平性標準。

1.5 研究背景與動機

隨著科技日新月異，新的技術將能夠在更高的頻率範圍內進行數據傳輸，從而實現更快的傳輸速率，以滿足用戶不斷增長的數據需求。在 5G 網路環境中，我們將採用毫米波網路技術，讓資料傳輸速率提升。

在本篇論文中，我們會做出一點貢獻如下：

- 參考[5]的作法，將最佳化問題改寫成多維分配問題，並使用對偶分解 (dual decomposition) 法進行求解；
- 參考[5]的作法，基於對偶分解方法的分散式演算法。在該分散式演算法中，不僅可以確定用戶端和存取點之間的連線，還可以以一種比例公平 (proportional fairness, PF) 的方式分配通道資源；
- 透過隨機幾何 (stochastic geometry) 的方式，計算用戶的平均連線速率。

1.6 章節安排

本篇論文的後面章節安排與內容如下：第二章為與本論文相關背景知識，包含相關文獻、路徑損失、對偶分解法、公平性標準等；第三章為首先探討最佳化連線的問題，再來提出分散式演算法來解決此問題；第四章為數值結果與討論，其中該結果利用 MATLAB 執行數值的計算及模擬；最後，第五章為本論文的結論。

第二章 相關背景知識

在這個章節中介紹本論文相關之背景知識，以下是解決連線最佳化問題所需的基本相關說明。其中包含相關文獻、路徑損失、對偶分解法、公平性標準等。

2.1 通道模型 [3]

為了估測用戶與基地台之間的連線速率 r_{ik} ，並作為連線決策的參考，本論文參考[3]所建立之通道模型。根據用戶與基地台之間的距離，透過以下計算公式，可以獲得訊號雜訊功率比(signal-to-noise ratio, SNR)，或簡稱訊雜比。接著，再利用香濃定理(Shannon's theorem)，可以獲得通道速率。

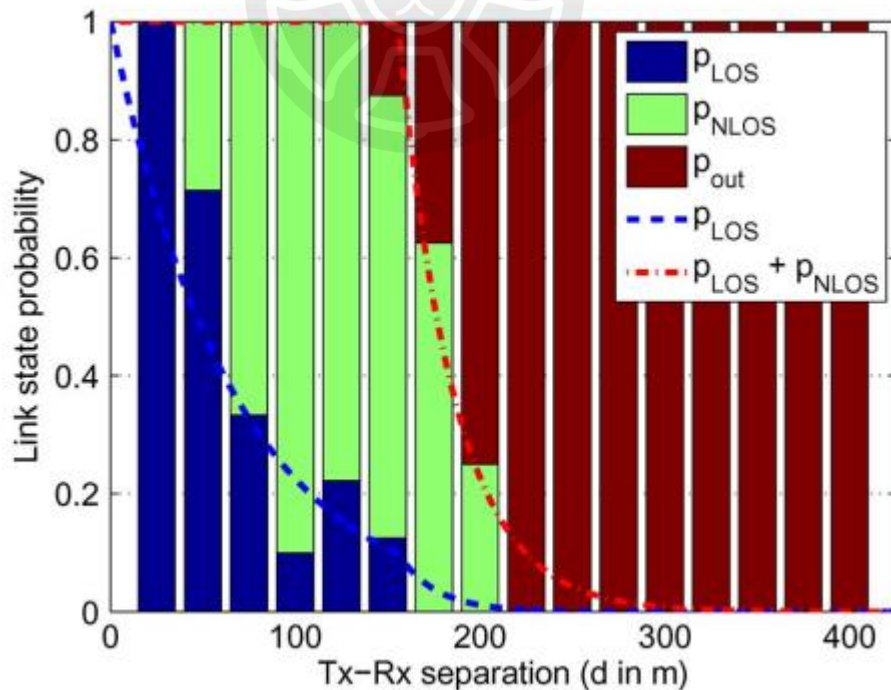


圖 2- 1: 鏈路狀態機率與傳輸距離關係圖。

2.1.1 狀態機率分布

根據 3GPP 的規範，基地台與用戶之間的鏈路 (link) 有兩個狀態 (state)：直視波 (line of sight, LOS) 傳輸和非直視波傳輸 (non-line of sight, NLOS)。根據[3]由實地量測所獲得的統計結果，狀態的機率為距離 d_{ik} (m) 的函數，如圖 2-1 所示。在[3]中，毫米波網路另增加一個中斷 (outage) 狀態。根據圖 2-1，可找出狀態機率之間的回歸曲線 (regression curve) 函數如下(2.1)：

$$p_{out}(d) = \max(0, 1 - e^{-a_{out}d + b_{out}}) \quad (2.1a)$$

$$p_{LOS}(d) = (1 - p_{out}(d))e^{-a_{los}d} \quad (2.1b)$$

$$p_{NLOS}(d) = 1 - p_{out}(d) - p_{LOS}(d) \quad (2.1c)$$

其中，參數 a_{out} 、 a_{los} 、 b_{out} 之數值與頻段相關，皆透過實驗結果統計而得，請參考[3]。由圖 2-1 可發現，當 d_{ik} 增加，直視波傳輸(LOS)機率減少，而非直視波傳輸(NLOS)機率則增加；當 d_{ik} 超過 200 m 時，中斷機率為百分之百。每個用戶與任何一個基地台之間的鏈路狀態，可利用均勻分布的隨機變數決定。

2.1.2 路徑損失

在確定存取點與用戶之間的鏈路狀態後，我們可以參考[3]的參數值，來計算存取點與用戶之間鏈路的路徑損失(path loss, PL)，路徑損失指的是訊號在空氣中傳遞時，會隨著路徑而產生訊號的損失。訊號強度會隨著距離增加而下降，路徑損失會隨距離增加而增加。然後，根據所決定的鏈路狀態，可計算用戶與基地台之間的路徑損失 (path loss, PL)，其模型如下：

$$PL[\text{dB}] = \alpha + 10\beta \log d + \xi \quad \xi \sim (0, \sigma^2) \quad (2.2)$$

其中， ξ 為對數常態 (lognormal) 隨機亂數，平均值為 0，標準差 σ^2 。關於 α 、 β 、 σ^2 之參數值，可參考[3]。

然後，可根據下式計算接收功率：

$$PL = P_{TX} - P_{RX} + G_{TX} + G_{RX} \quad (2.3)$$

其中， P_{TX} 為傳輸總功率，單位為 dBm； P_{RX} 為接收所有角度方向的總功率； G_{TX} 、 G_{RX} 為天線的增益。(2.3)中路徑損失有等向性的特質，換句話說，在隨機發射和接收方向上，看到的平均發射和接收功率之間會有差異。因此，路徑損失不會包括通過正確引導發射器或接收器獲得的任何波束成形增益。舉例來說，在[3]中， $P_{TX}=30$ dBm， $G_{TX}=G_{RX}=24.5$ dBi。

最後，我們能以 dB 為單位的方式計算，可求得訊雜比如下：

$$SNR[\text{dB}] = P_{RX} - (P_{noise} + NF[\text{dB}]) \quad (2.4)$$

其中， P_{noise} 為雜訊功率，等於雜訊功率頻譜密度 (-174 dBm/Hz [5]) 乘上頻寬 (1 GHz [5])，而接收端的噪音因子 (noise figure, NF) 為 6 dB [5]。

2.2 [5]

在本篇論文中，介紹毫米波系統正逐漸成為實現極高數據速率無線通信的重

要技術。毫米波系統的主要限制因素是阻塞（高衰減損耗）和耳聾（發射器和接收器波束之間的不對準）。為了緩解這些問題，必須在終端和接入點之間實現有效的連線和中繼。但是，現有的連線技術是為傳統的受干擾限制網絡設計的，因此在毫米波通信中高度不適用，原因是窄波束操作和由此產生的非可忽視的無干擾行為。

毫米波網路主要的挑戰是嚴重的路徑損失(path-loss)、耳聾(deafness)、阻塞(blockage)。為了彌補高路徑損失，毫米波頻率的小波長允許在當前尺寸的射頻晶片實現大量天線元件，以此方式生成窄波束，即所謂的筆型波束(pencil beam)。窄波束提供顯著的天線增益，從而提升了鏈路預算。窄波束還大幅減少了干擾影響，因為接收器只聽取特定方向的訊號，這減少了產生干擾的有效發射器數量。然而，使用窄波束進行連接建立和維護會導致耗時的對準開銷，以避免耳聾(deafness)，即發射器和接收器的主波束不指向彼此，從而無法建立高質量的毫米波連接。毫米波通訊的另一個挑戰是阻塞(blockage)，即高衰減損耗。為了獲得定量洞察，人體可以使毫米波信號衰減 35 dB，而固體材料（例如磚塊）的衰減可以高達 80 dB。

不能僅通過增加發射功率或使用更窄的波束來增加額外的天線增益來有效解決，而只能通過重新連線或中繼程序來解決。在毫米波網絡中，由於小單元的有限大小和密集的存取點（AP）部署，連線和中繼尤其重要。中繼技術可以通過提供穩健的毫米波連接、負載平衡(load balancing)、擴展覆蓋範圍（coverage extension）、室內外覆蓋(indoor-outdoor coverage)、高效的移動管理(mobility management)和流暢的換手操作(smooth handover operation)來提供更均勻的服務質量。

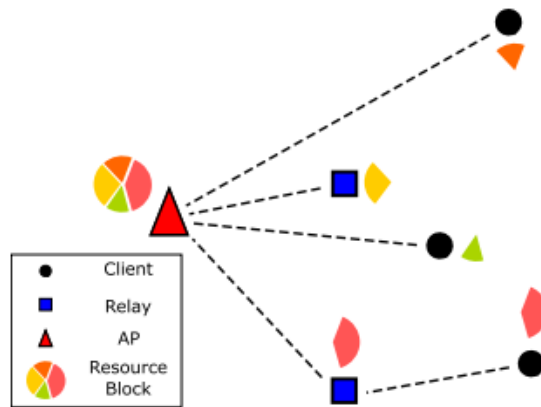


圖 2- 2：存取點的資源共享示意圖[5]。

由圖 2-2 得知，圖中黑色圓形圖案為用戶、藍色正方形圖案為中繼，而用戶數量為 3 個，中繼數量為 2 個；用戶與中繼旁的扇形圖案，表示存取點所分配到資源比例。需要注意的是，一旦用戶使用中繼跟存取點進行連線，則該用戶資源比例會跟中繼的資源比例會相同，可由右下用戶或中繼旁的扇形區域得知，扇形圖案會是相同。

此論文探討了毫米波網絡中的聯合連線和中繼問題。其過程如下：

- 提出了一種新的優化方法來解決聯合連線和中繼問題，該方法將對數效用 (logarithmic utility)、存取點的資源分配、用戶的連線、中繼選擇以及不完善的通道狀態訊息全部考慮在內；
- 將上述聯合連線和中繼問題重新制定為多維分配問題，並提出對偶分解的法 (dual decomposition) 進行求解；
- 設置一種新的分散式拍賣演算法，以解決多維分配問題。

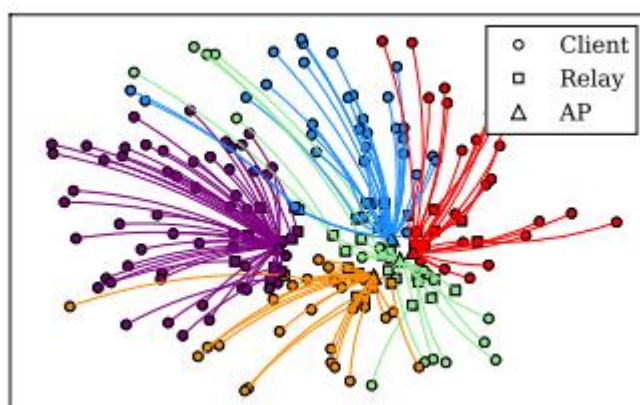


圖 2- 3: 用戶與 AP 最佳連線結果圖[5]。

根據該篇論文，圖 2-3 展示了連線最佳化演算法的執行結果。從圖中可觀察到，大多數用戶會優先選擇與距離較近的存取點進行連線，因為這樣的連線速率更快。然而，並不是所有用戶都會選擇和速率最高的存取點連線，少數用戶會考慮負載較小的但距離較遠的存取點進行連線。

2.3 對偶分解法

此方法能放寬對整數的限制，將初始的函數轉變為凸函數，凸函數能尋找最小值，如此就能用來解決最佳化的問題。接下來介紹此方法，以及相關的證明。

在求解目標函數的對偶問題時，並不會要求目標函數一定是凸函數，因此可能會是凸函數或是凹函數。這裡假設最佳化問題之目標函數為：

$$\max_{x_1, x_2, y} f_1(x_1, y) + f_2(x_2, y) \quad (2.5)$$

另外加入 $y = y_1 = y_2$ 的限制，(2.5) 可以改寫成(2.6)

$$\max_{x_1, x_2, y_1, y_2} f_1(x_1, y_1) + f_2(x_2, y_2) \quad (2.6a)$$

$$\text{s. t. } y_1 = y_2 \quad (2.6b)$$

根據拉格朗日乘數法(Lagrangian multiplier)，可進一步寫成拉格朗日函數：

$$\mathcal{L}(x_1, x_2, y_1, y_2, \lambda) = f_1(x_1, y_1) + f_2(x_2, y_2) + \lambda(y_1 - y_2) \quad (2.7)$$

該函數可透過對每個變數偏微分，以得到聯立方程式，可找到極值位置的解。需要注意的是，拉格朗日乘數法多半僅可找到局部最佳解，也就是局部最大或局部最小，無法確定找到的解為全域最佳解。儘管對偶分解法並非透過上述的方式找最佳解，而是在找最佳解的過程，分成主問題與子問題。在主問題與子問題當中，仍是透過偏微分的方式找最佳解，如果目標函數不是凸函數或凹函數，則仍無法保證全域最佳。

接下來，它的拉格朗日對偶函數可表示為：

$$\begin{aligned} \mathcal{D}(\lambda) &= \max_{x_1, x_2, y_1, y_2} \mathcal{L}(x_1, x_2, y_1, y_2, \lambda) \\ &= \max_{x_1, x_2, y_1, y_2} [f_1(x_1, y_1) + \lambda y_1] + [f_2(x_2, y_2) - \lambda y_2] \\ &= \max_{x_1, y_1} [f_1(x_1, y_1) + \lambda y_1] + \max_{x_2, y_2} [f_2(x_2, y_2) - \lambda y_2] \\ &= \max_{x_1, y} [f_1(x_1, y) + \lambda y] + \max_{x_2, y} [f_2(x_2, y) - \lambda y] \end{aligned} \quad (2.8)$$

由此得知，拉格朗日對偶函數一定為凹函數，其凹性與原目標函數和限制函數凹凸與否無關。我們能由(2.8)推得(2.9)：

$$\mathcal{D}(\lambda) = \max_{x_1, y} [f_1(x_1, y) + \lambda y] + \max_{x_2, y} [f_2(x_2, y) - \lambda y] \quad (2.9a)$$

$$\geq \max_{x_1, x_2, y} [f_1(x_1, y) + \lambda y + f_2(x_2, y) - \lambda y] \quad (2.9b)$$

$$= \max_{x_1, x_2, y} f_1(x_1, y) + f_2(x_2, y) = p^* \quad (2.9c)$$

由上面的推導可發現， $\mathcal{D}(\lambda) \geq p^*$ ，其中 p^* 為(2.5)最佳解所對應的目標值，也能得知 p^* 是 $\mathcal{D}(\lambda)$ 的一個下界。關於上面推導中的不等式(2.9a)≥(2.9b)，證明如下：

推論 2.1: 若 y 為實數變數，則 $\max_y f_1(y) + \max_y f_2(y) \geq \max_y (f_1(y) + f_2(y))$ 。

證明：令 $\max_y f_1(y) = f_1(y_1)$ ， $\max_y f_2(y) = f_2(y_2)$ ， $\max_y (f_1(y) + f_2(y)) = f_1(y_3) + f_2(y_3)$ 。於是，

$$f_1(y_1) \geq f_1(y_3) \quad (2.10a)$$

$$f_2(y_2) \geq f_2(y_3) \quad (2.10b)$$

把兩個不等式相加，可得：

$$f_1(y_1) + f_2(y_2) \geq f_1(y_3) + f_2(y_3) \quad (2.11)$$

或將(2.11)改寫為：

$$\max_y f_1(y) + \max_y f_2(y) \geq \max_y (f_1(y) + f_2(y)) \quad (2.12)$$

正如前面所提到的，如果 p^* 是(2.5)的最佳解所對應的目標值，則 $\mathcal{D}(\lambda)$ 代表其對偶問題之目標。由上面的推導可發現， $\mathcal{D}(\lambda) \geq p^*$ 。換言之，當 p^* 無法直接獲得時，我們可以用 $\min_{\lambda} \mathcal{D}(\lambda)$ 作為 p^* 的近似解 (approximation)。於是，(2.5)的對偶問題可表示為：

$$\min_{\lambda} D(\lambda) = \min_{\lambda} \{ \max_{x_1, y_1} [f_1(x_1, y_1) + \lambda y_1] + \max_{x_2, y_2} [f_2(x_2, y_2) - \lambda y_2] \} \quad (2.13)$$

於是，將(2.13)表示為一個主問題及兩個子問題：

- 主問題：

$$\min_{\lambda} D(\lambda) \quad (2.14a)$$

- 子問題：

$$\max_{x_1, y_1} [f_1(x_1, y_1) + \lambda y_1] \quad (2.14b)$$

$$\max_{x_2, y_2} [f_2(x_2, y_2) - \lambda y_2] \quad (2.14c)$$

求解的整個過程需要不斷地更新 λ ，主要會有兩個步驟：

- 針對目前的 λ ，分別計算兩個子問題的最佳解；
- 更新 λ ，改變幅度(δ)與斜率 $\frac{\partial D}{\partial \lambda} = (y_1^* - y_2^*)$ 成正比。

假設 $(x_1^*, y_1^*) = \operatorname{argmax}_{x_1, y_1} [f_1(x_1, y) + \lambda y]$ ， $(x_2^*, y_2^*) = \operatorname{argmax}_{x_2, y} [f_2(x_2, y) - \lambda y]$ ， $\frac{\partial D}{\partial \lambda} = y_1^* - y_2^*$ 。若 $y^* = y_1^* = y_2^*$ ，斜率 $\frac{\partial D}{\partial \lambda} = 0$ 代表著(2.14a)會有最小值，而會導致(2.13)會有近似的最佳解；相反地， $y_1^* \neq y_2^*$ ，或斜率 $\frac{\partial D}{\partial \lambda} \neq 0$ ，則 λ 就會變更為：

$$\lambda \leftarrow \lambda - \delta \times \frac{\partial D}{\partial \lambda} = \lambda - \delta \times (y_1^* - y_2^*) \quad (2.15)$$

其中， δ 為基本改變幅度。當斜率 $\frac{\partial D}{\partial \lambda} = 0$ ，也就是 $y^* = y_1^* = y_2^*$ 時，

$$\begin{aligned} \mathcal{D}(\lambda) &= \max_{x_1, y} [f_1(x_1, y) + \lambda y] + \max_{x_2, y} [f_2(x_2, y) - \lambda y] \\ &= f_1(x_1^*, y_1^*) + \lambda y_1^* + f_2(x_2^*, y_2^*) - \lambda y_2^* \\ &= f_1(x_1^*, y_1^*) + f_2(x_2^*, y_2^*) \end{aligned} \quad (2.16)$$

如前所述， $\mathcal{D}(\lambda) \geq p^*$ ，或根據上式， $\mathcal{D}(\lambda) = f_1(x_1^*, y_1^*) + f_2(x_2^*, y_2^*)$ ，因此可得 $f_1(x_1^*, y_1^*) + f_2(x_2^*, y_2^*) \geq p^*$ 。另一方面，由於 $p^* = \max_{x_1, x_2, y} f_1(x_1, y) + f_2(x_2, y)$ ，或 $p^* \geq f_1(x_1^*, y_1^*) + f_2(x_2^*, y_2^*)$ 。結果，可得 $p^* = f_1(x_1^*, y_1^*) + f_2(x_2^*, y_2^*)$ 。換言之，原始問題之最佳解之目標值，必定與對偶問題最佳解之目標值相同。

2.4 [6]

在此論文中，介紹允入控制，其目的在於確保服務品質（quality of service, QoS），尤其是封包有延遲與丟失率要求的資料流，如超可靠低延遲通訊。設計一個跨層的架構（framework）以適用於全球互通微波存取（worldwide interoperability for microwave access, WiMAX）。在該架構之下，如圖 2-4 所示，服務品質之保證是透過一個圖 2-4 中 tier-2 的無線電資源管理（radio resource management, RRM）層、以及一個圖中 tier-1 負責排程的媒體存取控制（medium access control, MAC）層所組成。透過即時的測量排程的效用，其中包含頻寬使用率（bandwidth utilization）與資料流之間的公平性（fairness）。該 tier-2 的測量結果可立即回報給 tier-1，以作為下次調整頻寬分配的參考。

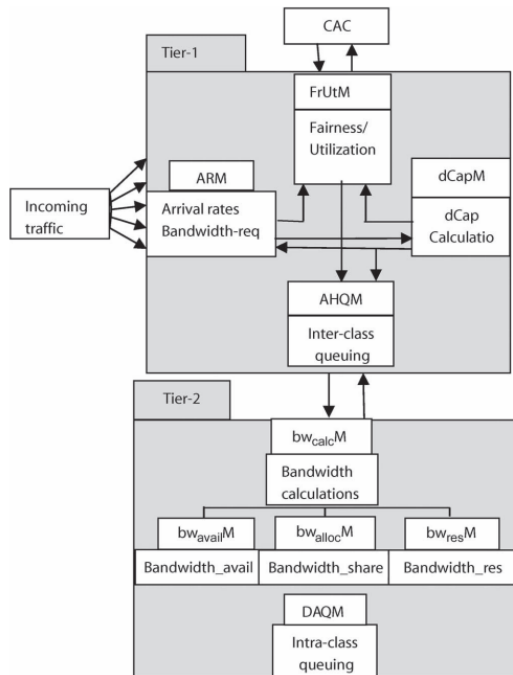


圖 2- 4:跨層設計架構圖。

2.5 [7]

在此論文中，介紹在第三代合作夥伴計畫 (3rd generation partnership project, 3GPP) 的版本 15 中，超可靠低延遲通訊 (ultra-reliable and low latency, URLLC) 的用戶面 (user-plane) 的延遲目標為小於 1 毫秒，封包丟失率則為小於 10^{-5} 。為了因應這個嚴苛的要求，在實體 (physical) 層方面的因應作法包含：較保守的編碼與調變 (coding and modulation) 方式、迷你時槽 (mini-slot) 排程等。另一方面，在媒體存取控制 (medium access control, MAC) 層則必須考慮超可靠低延遲通訊與現有的增強型移動寬頻 (enhanced mobile broadband, eMBB) 共存的問題。最初的概念通常假設用正交方法來減輕服務間的干擾，其中一個服務的頻譜資源與其他服務隔離。在這種情況下，由於其嚴格的要求，URLLC 流量總是被安排在 eMBB 傳輸之上。已經開發了一種半靜態的排程機制，其中允許 URLLC 流量覆蓋先前分配的 eMBB 傳輸，以進行即時傳輸。此外，為了進一步降低 URLLC 的延遲，即使 URLLC 的活動量較低，也會保留一定量的時頻資源供 URLLC 流量使用。這些基於正交排程的方法明顯降低了 eMBB 服務的性能，並減少了寶貴

的時頻資源的利用效率。這種現象激發我們開發一種基於非正交頻譜共享的新排程策略，用於 URLLC 和 eMBB 服務之間的共存。

也討論超可靠低延遲通訊之用戶與增強型移動寬頻之用戶共用相同的頻譜，並允許兩種用戶可以連線至多個基地台。接著，利用矩陣幾何方法（matrix geometry method）來計算該系統所對應的排隊理論。然後，所有用戶傳送功率的分配與所有頻寬資源的配置，可整理成一個最小花費網路流（minimum cost network flow）的問題，以找出最佳解。

2.6 [8]

由於毫米波的通道具有訊號衰減快速的特性，需要佈建密集的毫米波基地台，如圖 2-5 所示，以提供足夠的服務涵蓋範圍。儘管 2-5 為 WLAN 的佈設位置圖，但毫米波通訊會有相似的網路拓撲。也就是說，每個用戶可由數個基地台當中，選擇連線至其中一個或多個基地台。如前所述，過去已經有許多關於 WLAN 連線控制的研究，因此可作為毫米波連線控制之參考或借鏡。WLAN 連線控制假設用戶連線後，會完全使用其所分配的頻寬（bandwidth）資源，作為資料下載用途。因此，多半參考用戶與基地台之間的連線速率，來分配頻寬資源。其中，除了要使得無線頻寬的利用（utilization）可以最大化之外，並確保用戶之間可以獲得公平的頻寬。由於頻寬利用最大化，通常等同於基地台之間的負載要達到平衡。於是，之前 WLAN 的連線控制問題，可視為基地台要達到負載平衡，且用戶間要達到公平性的問題。除此之外，考慮用戶的移動性（mobility），連線控制的設計盡可能要可以是分散式的（distributed），這是因為集中式（centralized）的做法會使得計算（computation）與管理（overhead）成本過高的緣故。

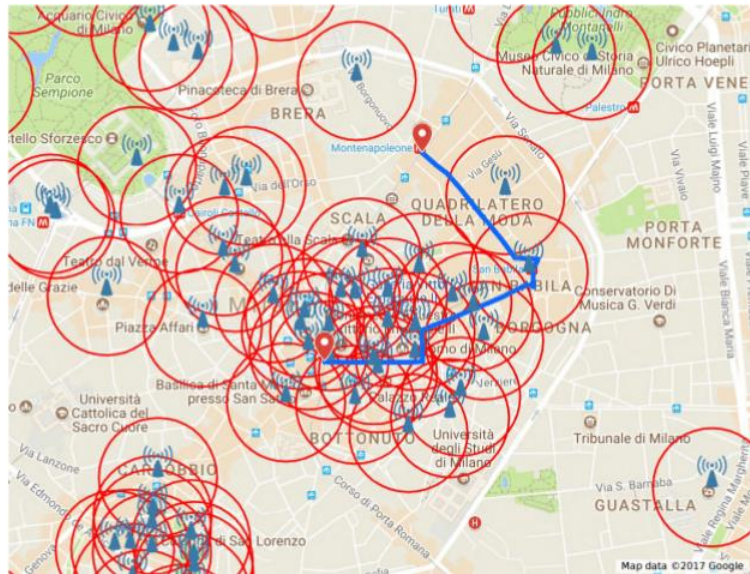


圖 2- 5: 毫米波網路參考示意圖。

2.7 [9]

在此論文中，介紹未充分利用的毫米波頻段是未來無線網絡中實現極高數據傳輸速率的有希望候選方案。然而，毫米波系統的特殊特性，如對障礙物的高脆弱性（由於高穿透損耗）和對移動性的高要求（由於定向通訊），要求仔細設計用戶與存取點 AP 之間的連線。這個挑戰可以通過分散式連線技術來解決，這些技術可以優雅地適應無線通道變化和用戶的移動。我們將連線問題制定為混合整數最佳化問題，在保證比例公平性的前提下最大化網絡吞吐量。首先，通過分散式對偶分解算法來解決這個最佳化問題，然後通過一種新的分散式拍賣算法，用戶可以異步操作，實現用戶與 AP 之間的接近最佳化連線。後一種算法收斂速度更快，網絡吞吐量下降可忽略不計。所提出算法的一個獨特特點是，所得的最優連線不必在每次網絡更改時（例如由於移動性）重新計算。相反地，這些算法不斷適應網絡變化，因此非常高效。

此論文專注於通過存取點 AP 跟用戶連線來設計高效的長期資源分配。在不同類型的無線接入網絡（例如蜂窩網絡、本地區域網絡、小型蜂窩等）中，用戶與 AP 之間的連線一直是近年來強烈研究的焦點。最常見的 AP 連線策略是基於接收信號強度指示器（RSSI）。粗略地說，在單用戶場景中，更高的 RSSI 相當於

更高的提供的吞吐量。然而，在多用戶場景中，無線資源（例如時間和頻率）應該在所有用戶之間共享，因此，雖然更高的 RSSI 值在仍保證更高的可達速率的情況下，並不能保證每個用戶的平均吞吐量更高。

2.8 資源分配中的效用與公平[4]

在本篇論文中，我們考慮用戶所分配到的頻寬資源問題。我們將介紹效用函數(utility function)，並將其引入且整理成最佳化問題。為了深入了解效用函數的設計方法，首先，在 2.8.1 節介紹優化框架，接著，在 2.8.2 節中介紹幾種常見的公平性標準。

2.8.1 優化框架

假設用戶 i 之速率為 r_i ，並且令 $U_i(r_i)$ 表示其效用函數，我們假設 $U_i(r_i)$ 是光滑（連續可微）的凹函數。同時，假設所有鏈路 l 都具有固定容量。因此，資源分配的問題可表示為式子(2.17)：

$$\max \quad \sum_{\{r_i\} \in \mathcal{S}} U_i(r_i) \quad (2.17a)$$

$$\text{subject to } \sum_{\{r_i\} \in \mathcal{S}} r_i \leq c_l, l \in \mathcal{L} \quad (2.17b)$$

$$r_i \geq 0, i \in \mathcal{C} \quad (2.17c)$$

其中， \mathcal{C} 代表用戶 i 之集合。 \mathcal{L} 代表鏈路 l 之集合。 c_l 代表鏈路 l 之容量。(2.17b) 說明所有流通過任何連接 $l \in \mathcal{L}$ 的聚合速率不得超過連接的容量 c_l 。(2.17c) 說明任何流的速率 r_i 都必須為非負。

在線性約束條件下最大化一個凹目標函數，這個資源分配問題等價於在凸集上最大化一個凹函數。根據最佳化理論，這是一個凸最佳化問題，最大化一個凹函數（或同樣地最小化一個凸函數）在凸集合上有唯一的解。因此，所提出的問

題有唯一的解。

2.8.2 公平性標準

我們將會介紹一些常見公平性標準下的資源分配，如最大最小公平性、最小可能延遲公平性、比例公平性，還有所對應之效用函數及其特點。

- 最大最小公平性(max-min fairness): 當資源分配達到最大最小公平時，任何一個用戶的資源分配，若不透過減少比該用戶所分配資源量少的用戶的資源分配的話，則無法得以增加。
- 最小可能延遲公平性(minimum potential delay fairness): 考慮一個用戶 i 試圖傳送大小為 w_i 的文件的情況。然後 $\frac{w_i}{r_i}$ 給出了在為用戶 i 分配速率 r_i 時傳輸文件所需的時間。在這種情況下，我們可以將效用函數制定為 $U_i(r_i) = -\frac{w_i}{r_i}$ 。
- 比例公平性(proportional fairness): 按比例公平性(proportional fairness)，可以得到 $U_i(r_i) = \log r_i$ 。本篇論文將採用此公平性標準，來解決連線問題。

α 的公平性 α -fairness: 定義 α -proportional 公平性度量 (fairness measures)，透過不同的 α 值，產生不同的公平性標準，如下：

$$f_{\alpha}(x_i) = \begin{cases} \log(x_i) & \alpha = 1 \\ \frac{x_i^{1-\alpha}}{1-\alpha} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.13)$$

其中， x_i 代表分配給用戶 i 的資源。若加總所有用戶的公平性度量，並將其最大化，會變成如下：

$$\max \sum_i f_\alpha(x_i) \quad (2.14)$$

由(2.14)得知：

- 當 $\alpha=0$ 時， $\max \sum_i f_\alpha(x_i) = \max \sum_i x_i$ 。由於該度量會以加總頻寬為最大化的目標，因此並沒有提供任何公平性。
- 當 $\alpha=1$ 時， $\max \sum_i f_\alpha(x_i) = \max \sum_i \log(x_i)$ 。該度量是比例公平性 (proportional fairness)。
- 當 $\alpha=2$ 時， $\max \sum_i f_\alpha(x_i) = \max \sum_i -x_i^{-1} = \max \sum_i -\frac{1}{x_i} = \min \sum_i \frac{1}{x_i}$ 。可看為傳送 1 個位元所需要的時間，則該度量是以所有用戶傳送 1 個位元所需要的加總時間為最小化的目標，稱為最小可能延遲 (minimal potential delay) 公平性。
- 當 $\alpha \rightarrow \infty$ 時，可視為最大最小公平性。如 [10]

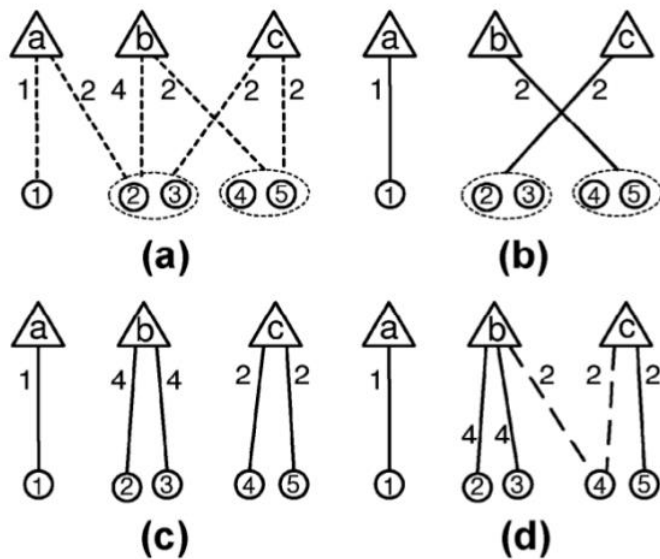


圖 2- 6: 3 個基地台與 5 個用戶的範例。

針對最大最小公平，可透過圖 2-6 的範例予以說明。其中，a,b,c 為基地台，1, 2, 3, 4, 5 為用戶，基地台與用戶之間的虛線代表可行的 (feasible) 連線，而旁邊的數字代表連線速率。舉例來說，圖 2-6 (a) 中，用戶 2 與 3 可以連線至 a,b,c 三個基地台，當連線至基地台 a 時，分別都有 2 的連線速率；當連線至基地台 b 時，分別都有 4 的連線速率；而當連線至基地台 c 時，則分別都有 2 的連線速率。首先，考慮用戶最多只能與一個基地台進行連線。在圖 2-6 (b) 中，實線代表一組連線的可行解 (feasible solution)。若以 x 向量代表用戶的連線，其中各個分量為所連線基地台的編號，則 $x=(a, c, c, b, b)$ 。另一方面，由於基地台 b 與 c 分別與兩個用戶建立連線，若連線的時間比例都是平分的話，則連線速率的向量 $y=(1,1,1,1,1)$ ，是一個公平的結果。然而，在圖 2-6 (c) 中，則是另一組連線的可行解 $x=(a, b, b, c, c)$ 。由於基地台 b 與 c 仍然分別與兩個用戶建立連線，假設連線的時間比例也是平分的話，所對應的連線速率向量 $y=(1, 2, 2, 1, 1)$ ，這個結果會是一個最大最小公平。接著，若用戶允許跟多個基地台進行連線。在圖 2-6 (d) 中，用戶 4 同時與基地台 b 與 c 建立部分 (fractional) 連線。若基地台 b 的時間資源分配是平分給 3 個用戶，也就是用戶 2,3,4 分別都有 $\frac{1}{3}$ 的連線時間；而基地 c 的時間資源分配給用戶 4 與 5 分別為 $\frac{2}{3}$ 與 $\frac{1}{3}$ 。則所對應的連線速率向量 $y=(1, \frac{4}{3}, \frac{4}{3}, \frac{4}{3}, \frac{4}{3})$ ，同樣會是一個最大最小公平。

由前面的討論得知，透過不同的 α 值，可獲得不同的公平性。其中， $\alpha=0$ 時沒有任何公平性，與 $\alpha \rightarrow \infty$ 時為最大最小公平，兩個相當的極端。而 $\alpha=1$ 時為比例公平性，可以說是介於兩者之間的折衷。由於，公平性與頻寬使用效率 (bandwidth utilization) 是設計時，需要進行取捨的東西。也就是說，儘管 $\alpha=0$ 時沒有任何公平性，但頻寬使用效率會是最佳；反之， $\alpha \rightarrow \infty$ 時有最好的公平，但是頻寬使用效率會是最差。

第三章 分析方法

在本章中，闡述了我們提出的分析方法。一開始，在 3.1 節介紹最佳化連線，利用比例公平的標準，來改寫連線最佳化的問題。接著，我們在 3.2 節中設計一個分散式演算法，來判斷用戶要與哪個 AP 進行連線，達成最佳化連線；最後，3.3 節介紹隨機幾何的方法。

3.1 最佳化連線

在本節中，我們將探討 5G 毫米波網路中客戶連線的最佳化問題，該問題涵蓋了用戶的連線和存取點 AP 的資源分配。在處理這個最佳化問題時，我們引入了效用函數。由於效用函數通常需要綜合考慮負載平衡、公平性、系統吞吐量等多種因素，因此用戶連線的最佳化實質上就是效用函數的最大化。

接著，我們分別以 \mathcal{C} 作為全部用戶 i 的集合， \mathcal{A} 作為全部存取點 k 的集合。需要注意的是在本論文中，我們假設每個用戶只允許跟一個存取點連線。因此，連線最佳化問題可表示為：

$$\max_{x,r,y} \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} \mathcal{U}(r_{ik} y_{ik}) \quad (3.1a)$$

$$s. t. \quad \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} = 1, \quad x_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \quad (3.1b)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{C}} y_{ik} \leq 1, \quad y_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \quad (3.1c)$$

其中， r_{ik} 為用戶 i 與存取點 k 之間的連線速率， $x = \{x_{ik} | i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A}\}$ ， $r = \{r_{ik} | i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A}\}$ ， $y = \{y_{ik} | i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A}\}$ 。

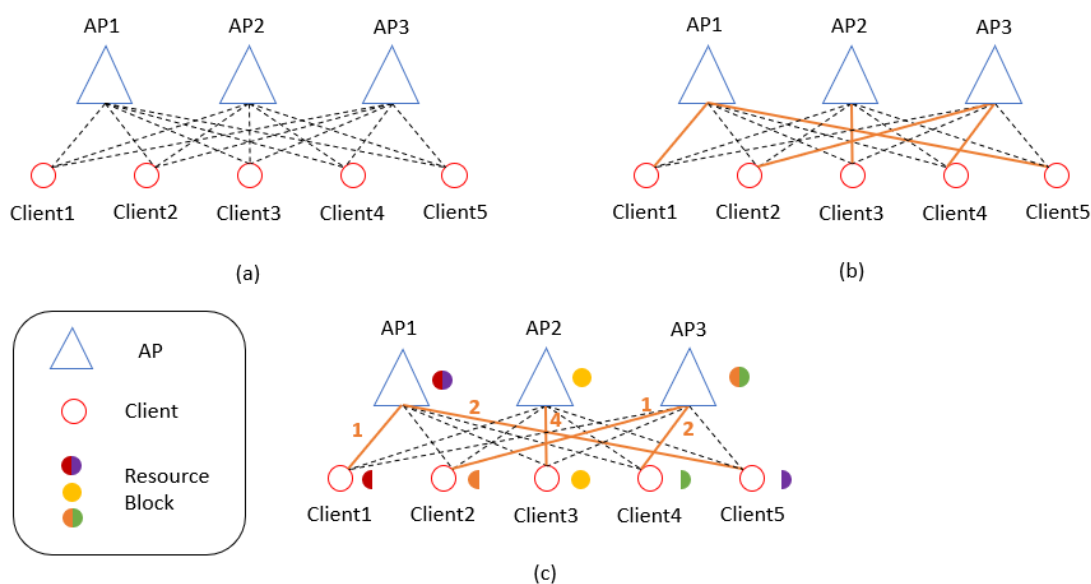


圖 3- 1: 3 個 AP 與 5 個用戶之間的連線資源範例。

針對(3.1)，可透過圖 3-1 的範例予以說明。其中，藍色空心三角形為基地台，紅色空心圓為用戶，AP 與用戶之間的黑色虛線代表可行的 (feasible) 連線，橘色實線代表用戶跟存取點的連線結果，而橘色實線旁邊的數字代表連線速率 r_{ik} ，如圖 3-1(c)， $r_{11} = 1$ ， $r_{23} = 2$ ， $r_{32} = 4$ ， $r_{43} = 1$ ， $r_{51} = 2$ 。

首先，用戶最多只能與一個 AP 進行連線。在(3.1a)和(3.1b)式子中， x_{ik} 為二元連線指示器(binary association indicator)；其中如果用戶 i 與存取點 k 進行連線時， x_{ik} 值為 1；否則， x_{ik} 值為 0。如圖 3-1(b)中橘色實線，該結果可表示為 $x_{11} = x_{23} = x_{32} = x_{43} = x_{51} = 1$ ，且 $x_{12} = x_{13} = x_{21} = x_{22} = x_{31} = x_{33} = x_{41} = x_{42} = x_{52} = x_{53} = 0$ 。

接著，在(3.1a)中， r_{ik} 為用戶 i 與存取點 k 之間的連線速率，該數值與兩者之間的通道狀況相關；因此，若連線結果確定，該數值可唯一的被決定。此外， y_{ik} 為存取點 k 分配給用戶 i 的資源，也就是所分配時間之比例。圖 3-1(c) 為資源分

配之結果。其中， $y_{11} = \frac{1}{2}$ ， $y_{23} = \frac{1}{2}$ ， $y_{32} = 1$ ， $y_{43} = \frac{1}{2}$ ， $y_{51} = \frac{1}{2}$ 。要注意到存取點 AP3 並不是在同一個時間跟 2 個用戶同時進行連線；換句話說， $y_{23} = \frac{1}{2}$ 代表用戶 2 與存取點 AP3 連線的時間，占存取點 AP3 全部的一半；當兩方進行連線期間，用戶 4 為閒置狀態。

最後，(3.1a) 中， $\mathcal{U}(r_{ik} \cdot y_{ik})$ 為效用函數 (utility function)。若效用函數 $\mathcal{U}(r_{ik} \cdot y_{ik})$ 採用比例公平性原則，則(3.1)可改寫為：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{y}} \quad & \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} \log r_{ik} y_{ik} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} = 1, \quad x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \\ & \sum_{i \in \mathcal{C}} y_{ik} \leq 1, \quad y_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \end{aligned} \quad (3.2)$$

其中， \mathbf{x} ， \mathbf{r} ， \mathbf{y} 各別代表 x_{ik} ， r_{ik} ， y_{ik} 所構成之向量。

3.2 分散式演算法

在本節中，我們文獻[5]的方法，將(3.2)中的連線最佳化問題改寫為一個多維度 \mathbf{x} 的配置問題。接著，經過對偶分解法 (dual decomposition) 的處理，求得最佳解。由於 x_{ik} 是已知的，也就是說 \mathbf{x} 是一個可行解。然後，可以獲得與(3.2)對應的 r_{ik} 和最佳的 y_{ik} ，其過程如下所述。首先，我們可以將(3.2)的目標改寫為：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{y}} \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} \log r_{ik} y_{ik} &= \max_{\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{y}} \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} (\log r_{ik} + \log y_{ik}) \\ &= \max_{\mathbf{x}, \mathbf{r}, \mathbf{y}} \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} (x_{ik} \log r_{ik} + x_{ik} \log y_{ik}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

根據香濃定理 (Shannon's theorem)，可以使用以下公式計算 r_{ik} ：

$$r_{ik} = B \log_2(1 + SNR_{ik}[\text{dB}]) \quad (3.4a)$$

$$SNR_{ik}[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} \quad (3.4b)$$

其中 B 為頻帶寬度， SNR_{ik} 代表用戶 i 與存取點 k 之間鏈路的訊號雜訊功率比 (signal-to-noise ratio, SNR)，或簡稱訊雜比，需要注意的是 SNR_{ik} 的單位是 dB，不然會計算錯誤。

假設 n_k 為存取點 k 的用戶連線數量，也就是：

$$n_k = \sum_{i \in \mathcal{C}_k} x_{ik} \quad (3.5)$$

依照(3.3)且由於 x_{ik} 為已知的，且當 $x_{ik} = 1$ 時， $y_{ik} > 0$ ，且 $\sum_{i \in \mathcal{C}_k} y_{ik} \leq 1$ ：

$$\max_y \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} \log y_{ik} = \max_y \sum_{k \in \mathcal{A}} \sum_{i \in \mathcal{C}_k} \log y_{ik} \quad (3.6)$$

其中 \mathcal{C}_k 代表與存取點 k 連線用戶的集合。明顯地， $|\mathcal{C}_k| = n_k$ 。(3.6)可進一步改寫為：

$$\max_y \sum_{k \in \mathcal{A}} \sum_{i \in \mathcal{C}_k} \log y_{ik} = \max_y \sum_{k \in \mathcal{A}} \prod_i^{n_k} y_{ik} \quad (3.7)$$

此外，由於對數為遞增函數，換言之，(3.7)等同於：

$$\begin{aligned} & \max_{y>0} \prod_i^{n_k} y_{ik}, \\ & s. t. \sum_i^{n_k} y_{ik} \leq 1. \end{aligned} \quad (3.8)$$

根據算幾不等式(arithmetic-geometric mean inequality)，可得知當 $y_{ik}=1/n_k$ 時，可以最大化 $\prod_i^{n_k} y_{ik}$ ，有關算幾不等式的證明，詳見附錄二。於是，可得：

$$y_{ik} = \frac{1}{n_k} \quad (3.9)$$

因此，(3.2)的目標可以重新表述為：

$$\max_{x,r,n} \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} \log r_{ik} - \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k \log n_k \quad (3.10)$$

其中，為了簡化起見，令 $b_{ik} = \log r_{ik}$ ，讓(3.2)成為：

$$\begin{aligned} \max_{x,r,y} \quad & \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} b_{ik} - \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k \log n_k \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} = 1, \quad x_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \\ & \sum_{i \in \mathcal{C}} y_{ik} \leq 1, \quad y_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A} \end{aligned} \quad (3.11)$$

接下來，為了能夠應用拉格朗日乘數法，必須放寬 x_{ik} 為整數0或1的限制，讓所對應數值可以介於0和1之間的任意實數。如此一來，便已經符合對偶分解法所需要的形式了。引入拉格朗日乘數 $\lambda = \{\lambda_k | k \in \mathcal{A}\}$ ，可得：

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(x, n, \lambda) &= \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} b_{ik} - \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k \log n_k + \sum_{k \in \mathcal{A}} \lambda_k (n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}) \\ &= \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} (b_{ik} - \lambda_k) + \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k (\lambda_k - \log n_k) \end{aligned} \quad (3.12)$$

於是，(3.11)的對偶問題寫成(3.13)：

$$\min_{\lambda} \mathcal{L}(x, n, \lambda) = \min_{\lambda} f(n, \lambda) + g(x, \lambda) \quad (3.13a)$$

其中，

$$f(n, \lambda) = \max_{n \geq 0} \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k (\lambda_k - \log n_k) \quad (3.13b)$$

$$g(x, \lambda) = \begin{cases} \max_x \sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} (b_{ik} - \lambda_k) x_{ik} \\ \text{s.t. } x_{ik} \in [0, 1], \forall i \in \mathcal{C}, k \in \mathcal{A}, \\ (3.1b) \end{cases} \quad (3.13c)$$

- 關於 $g(x, \lambda)$ ，其最大化過程如後。對於每個用戶 i ，各個維度的斜率為：

$$\frac{\partial g}{\partial x_{ik}} = (b_{ik} - \lambda_k) \quad (3.14)$$

由於， $\sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} = 1$ ；因此，每個用戶 i 都必須利用有限的數值 x_{ik} ，讓 $\sum_{k \in \mathcal{A}} (b_{ik} - \lambda_k) x_{ik}$ 可以最大化。為此，用戶 i 將選擇具有最大斜率 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 的維度 k ，讓 $x_{ik} = 1$ ，其餘為 0。

- 同樣地，關於 $f(n, \lambda)$ ，可直接對 n_k 偏微分：

$$\frac{\partial f}{\partial n_k} = \lambda_k - \frac{\partial}{\partial n_k} (n_k \log n_k) = \lambda_k - (\log n_k + 1) = 0 \quad (3.15)$$

根據(3.15)，可得 $n_k = e^{(\lambda_k - 1)}$ 。

- 最後，對於主問題而言，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_k} &= \frac{\partial}{\partial \lambda_k} (\sum_{i \in \mathcal{C}} \sum_{k \in \mathcal{A}} x_{ik} w_{ik} (b_{ik} - \lambda_k) + \sum_{k \in \mathcal{A}} n_k (\lambda_k - \log n_k)) \\ &= n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik} \end{aligned} \quad (3.16)$$

因此，若 $n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik} = 0, \forall k$ ，則(3.13)的對偶問題已經求得最佳解；否則，

λ_k 將更換新的數值為：

$$\lambda_k \leftarrow \lambda_k - \delta \times (n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}) \quad (3.17)$$

最終，我們將使用稍後在圖 3-2 描述的演算法 1 計算(3.13)的最佳解。需要注意的是隨著放寬 x_{ik} 為整數 0 或 1 的限制，讓所對應數值可以介於 0 和 1 之間的任意實數。因為(3.11)和(3.5)都是線性等式(linear equalities)；而且，明顯地存在一個可行解。舉例來說，對於圖 3-1，圖 3-1(b)或 3-1(c)即都是可行解之一。根據斯萊特的條件(Slater condition)，如果原問題為凸優化問題，同時存在至少一組可行解，這樣強對偶性(strong duality)將會成立。

1: //input $\mathcal{A}, \mathcal{C}, b_{ik}, \lambda_k$
2: Given \mathcal{A} ;
3: Given \mathcal{C} ;
4: Given $b_{ik}, \forall i \in \mathcal{C}, \forall k \in \mathcal{A}$;
5: $x_{ik} = 0, \forall i \in \mathcal{C}, \forall k \in \mathcal{A}$;
6: $n_k = 0, \forall k \in \mathcal{A}$;
7: $\lambda_k = 0, \forall k \in \mathcal{A}$;
8: $\delta = 0.01$; //基本改變幅度
9:
10: //code:
11: do
12: $n_k = e^{(\lambda_k - 1)}$;

```

13:    $k^* = \operatorname{argmax}_k (b_{ik} - \lambda_k)$ 
14:   if  $k = k^*$ 
15:        $x_{ik} = 1$ ;
16:   else
17:        $x_{ik} = 0$ ;
18:   end
19:    $\lambda_k = \lambda_k - \delta \times (n_k - \sum_{i \in C} x_{ik})$ ;
20: while  $n_k - \sum_{i \in C} x_{ik} \neq 0$ 
21: return  $\mathbf{x}$ 

```

圖 3- 2: 演算法 1。

以下是關於演算法 1 的說明：

首先，我們通過設定每個 λ_k 的初始值。因為每個 b_{ik} 都已經知道，第 11-18 行經過運算得到該應對 λ 的最佳 \mathbf{n} 和 \mathbf{x} 。在第 13-18 行，代表如要最大化 (3.13c) 之目標，用戶 i 會選擇所有 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 當中，具有最大數值的存取點 k ；接下來，在第 20 行判斷演算法要不要停止更新。停止的條件取決於是否達到 (3.13a) 的最佳解，也就是 $\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_k} = (n_k - \sum_{i \in C} x_{ik})$ 是否全為 0。如果 $n_k - \sum_{i \in C} x_{ik} \neq 0$ ，第 19 行繼續會更新 λ_k 。接著，持續進行第 11-20 行之間的循環計算，直到停止條件得以滿足。最後，輸出最佳解 \mathbf{x} 。需要注意的是，在 (3.13b) 和 (3.13c) 中，因為 \mathbf{x} 、 \mathbf{n} 在演算法執行中都是整數之向量。因此，演算法停止的條件，也就是每個 $(n_k - \sum_{i \in C} x_{ik}) = 0$ ，而不能 $(n_k - \sum_{i \in C} x_{ik}) \approx 0$ 。

接著，我們藉由圖 3-3 的範例，利用 Matlab 軟體模擬演算法 1 的計算過程。假設系統中有 3 個存取點，10 個用戶，基本改變幅度 $\delta = 0.01$ ，我們先做 1000 次，看看 n_k 、 λ_k 演進的過程。

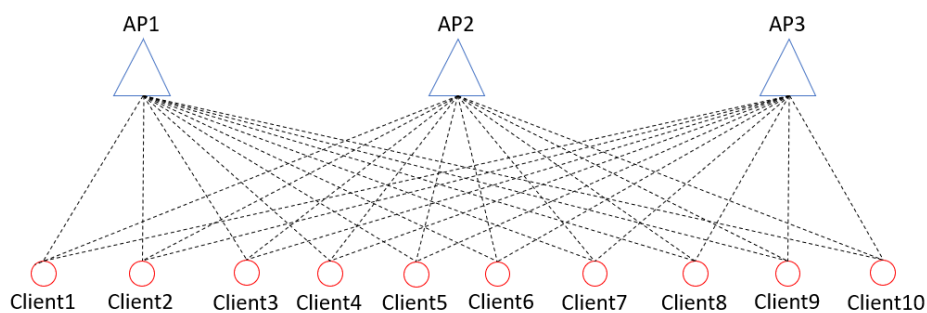


圖 3- 3: 3 個 AP 與 10 個用戶範例。

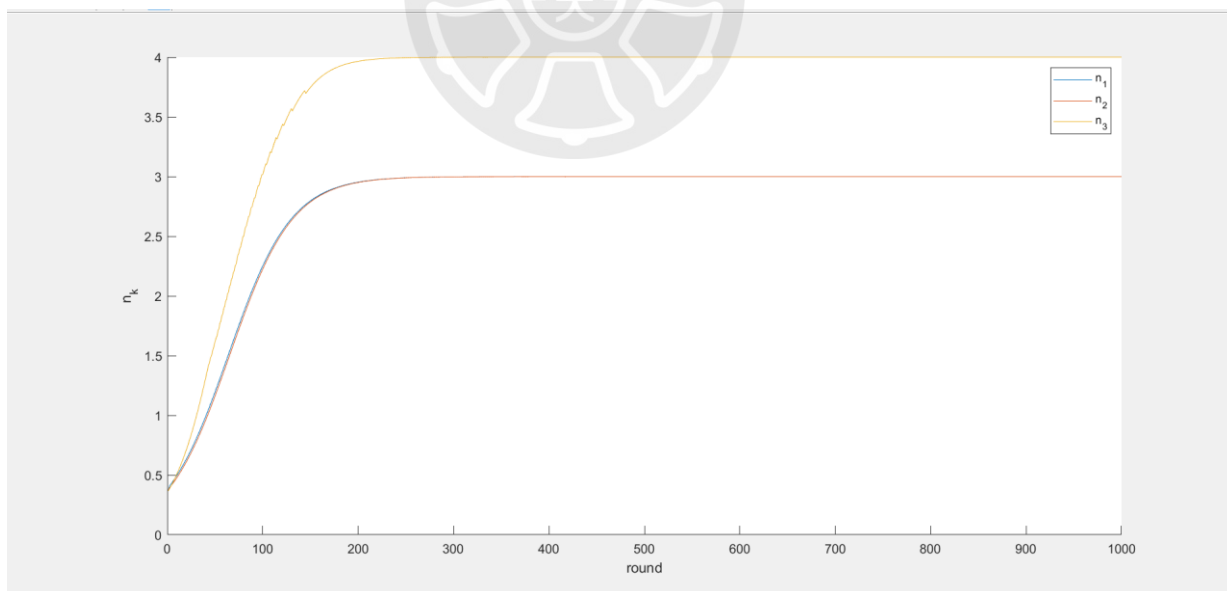


圖 3- 4: n_k 演進圖 ($\delta = 0.01$)。

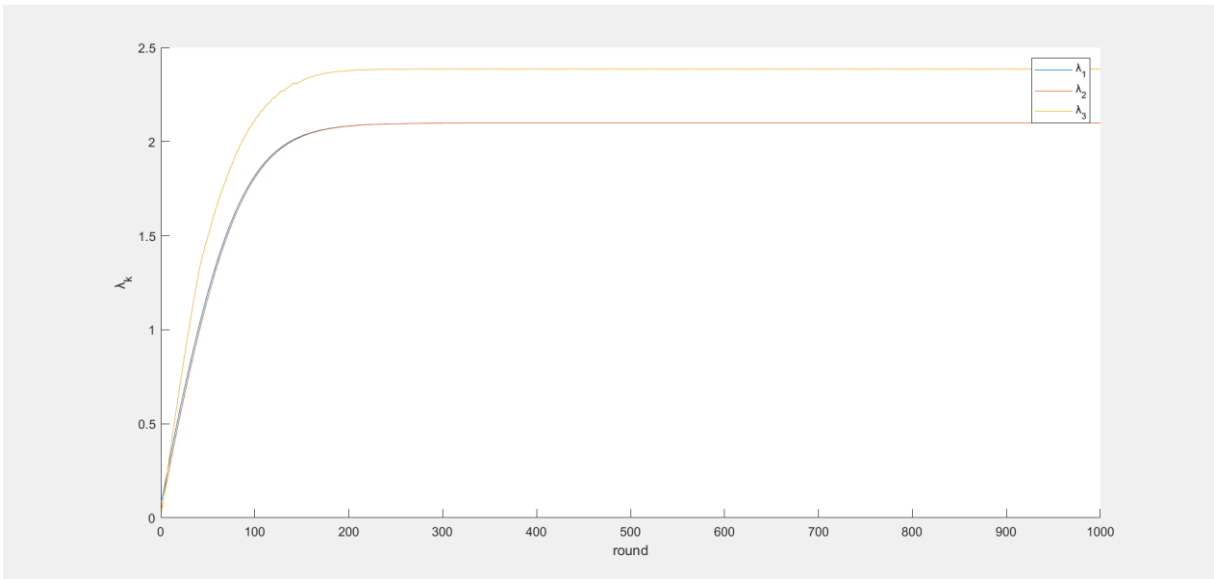


圖 3- 5: λ_k 演進圖($\delta = 0.01$)。

由圖 3-4 及 3-5 得知，我們在接近第 200 次左右， n_k 、 λ_k 就開始收斂，仔細看還是有些許的小震盪，接下來我們更改基本步伐 $\delta = 0.001$ ，看看會跟 $\delta = 0.01$ 有什麼變化，也是做 1000 次

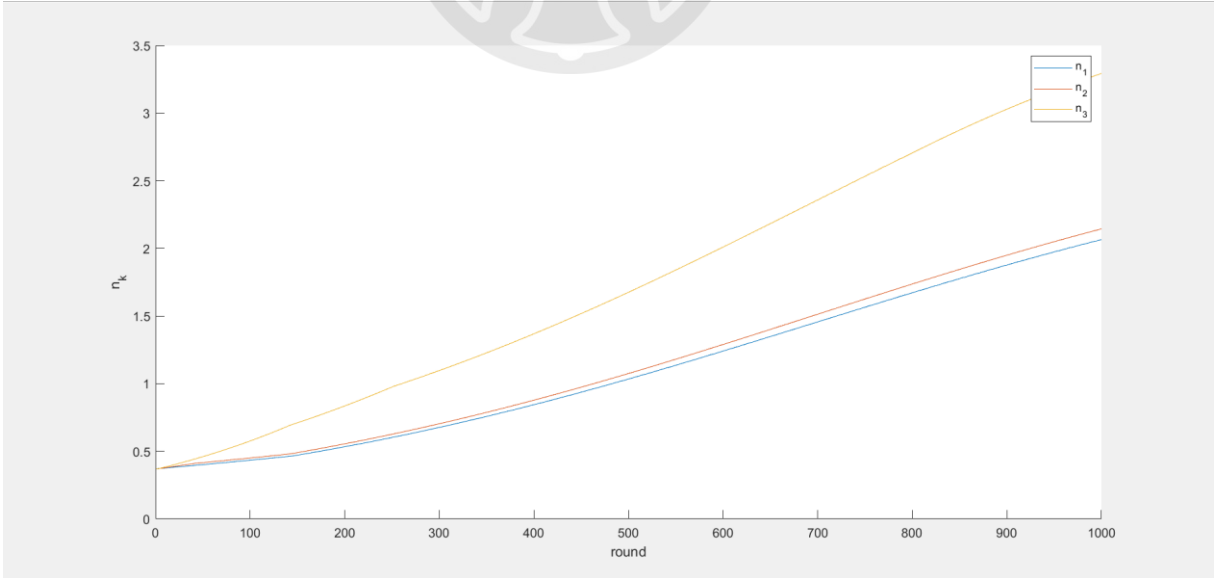


圖 3- 6: n_k 演進圖($\delta = 0.001$)。

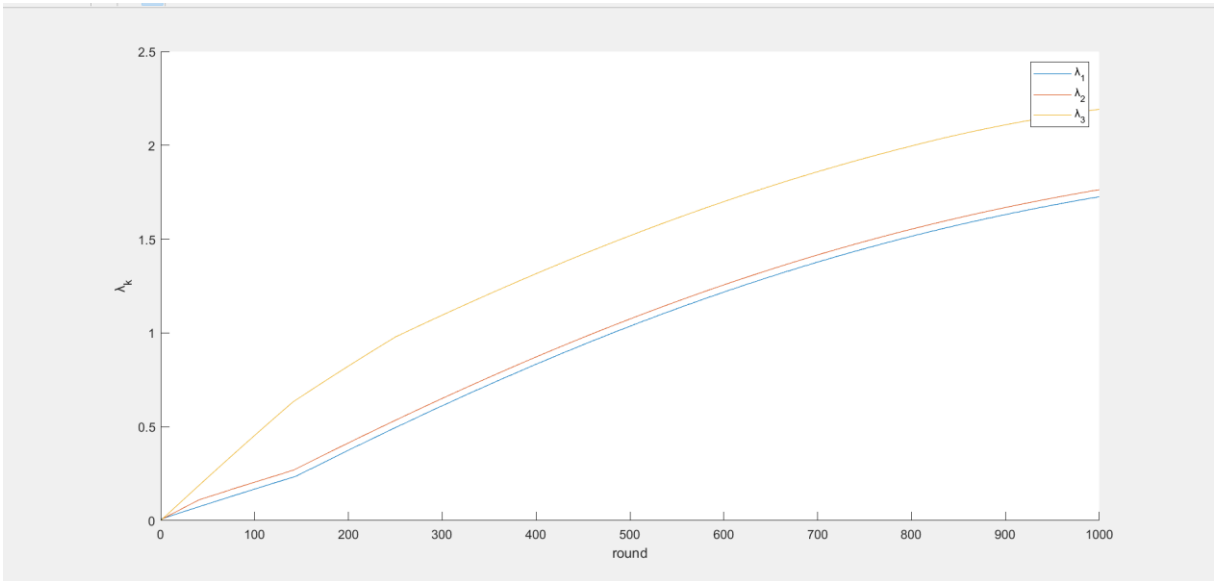


圖 3- 7: λ_k 演進圖($\delta = 0.001$)。

由圖 3-6 及 3-7 得知，我們發現當 δ 變小時， $\delta = 0.001$ 的演進過程會變比較慢，在第 1000 次的時候， n_k 、 λ_k 還沒進入收斂的狀態，代表一定要超過 1000 次才能看到 n_k 、 λ_k 接近收斂，那最後我們做 3000 次， $\delta = 0.001$ ，看看 n_k 、 λ_k 在第幾次可以接近收斂

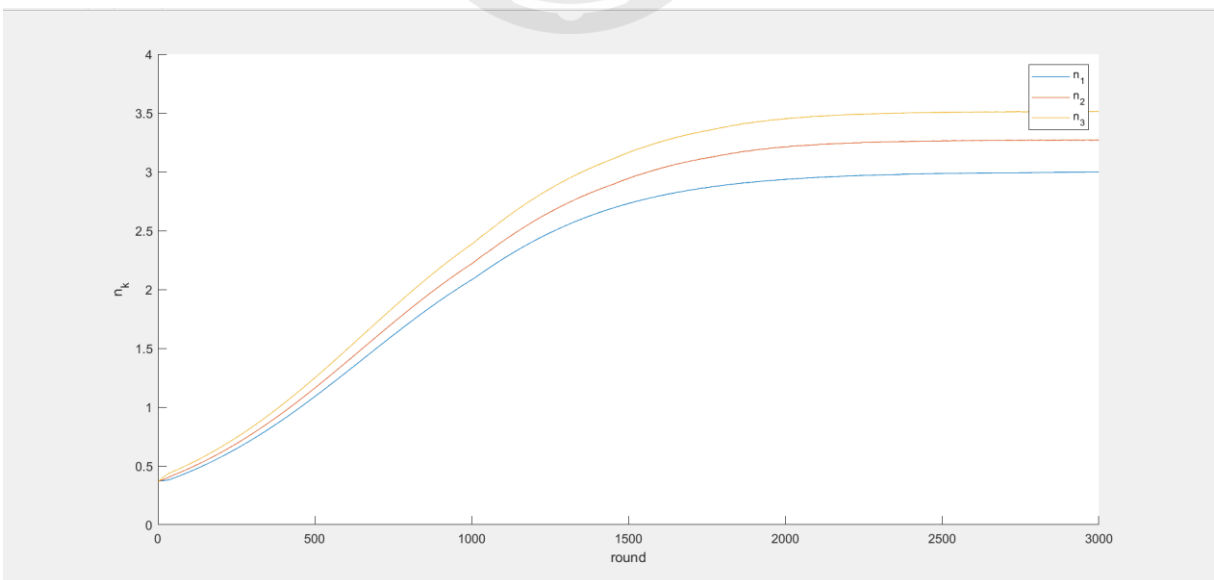


圖 3- 8: n_k 演進圖($\delta = 0.001$)。

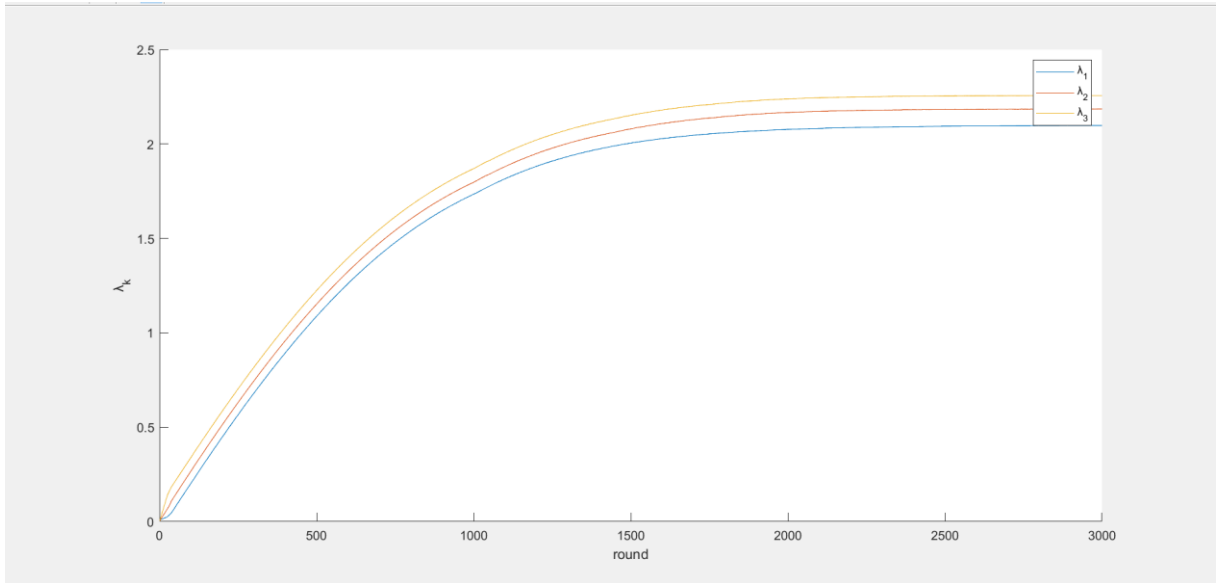


圖 3- 9: λ_k 演進圖($\delta = 0.001$)。

由圖 3-8 及 3-9 得知，在接近第 2000 次左右， n_k 、 λ_k 就開始接近收斂，我們可以得知 δ 的大小，會影響演進的次數。

3.3 隨機幾何

根據 3.2 節，可以發現用戶的連線是透過比較 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 來決定，由於 $b_{ik} = \log r_{ik}$ ，而 λ_k 是由基地台定期所廣播，用戶因此可分散式地決定與 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 結果最大的基地台進行連線。根據這個方式，可透過隨機幾何 (stochastic geometry) 的方式，來計算一個服務區域內，平均的用戶連線速率。

接下來，我們透過 Matlab 軟體模擬，來實行隨機幾何的方法。服務區域內單位圓面積，平均用戶有 100 位。

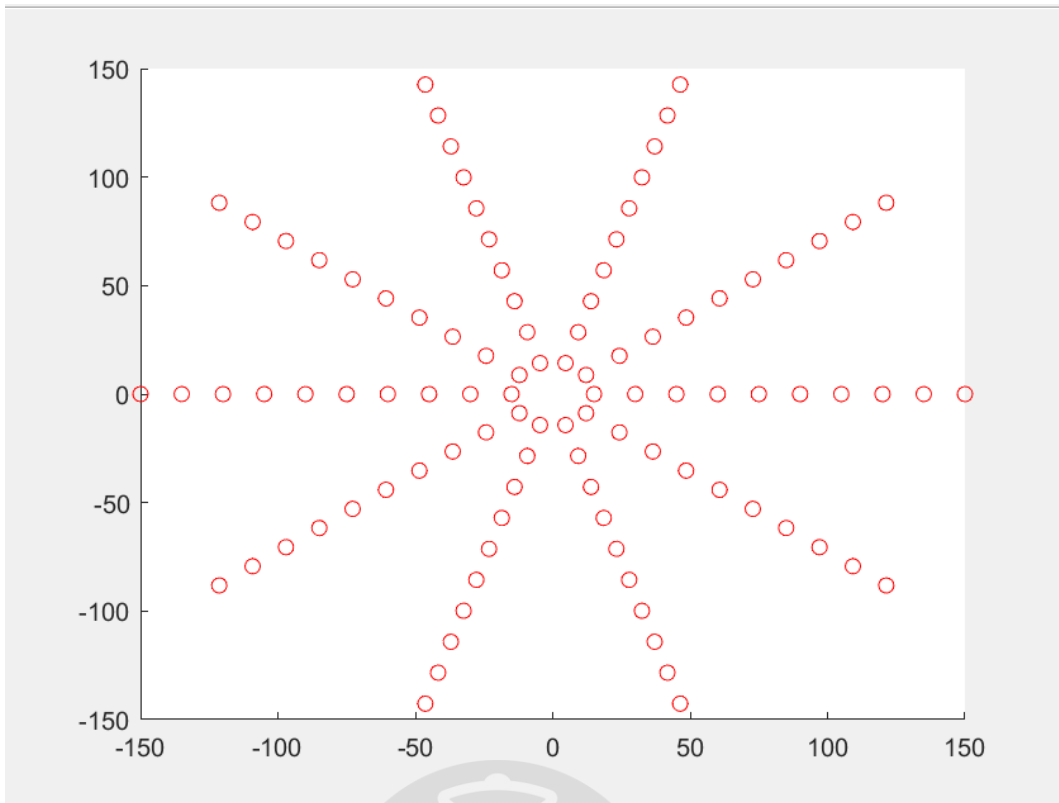


圖 3- 10:用戶分布位置。

如圖 3-9，其中，用戶位置以(0,0)為中心、用戶半徑為 150 公尺，紅色空心圓代表用戶所在的位置。

第四章 數值結果與討論

本章節將使用 MATLAB 並驗證第三章分析方法之結果。首先，4.1 節為模擬參數的設置，把用戶與存取點 AP 的位置模擬出來。接著 4.2 節模擬最佳化問題在演算法 1 的結果與討論。最後 4.3 節運用隨機幾何 (stochastic geometry) 的方式，計算用戶的平均連線速率及連線狀況。

4.1 模擬設置

表 3 : 模擬參數設定表。

參數名	參數值
頻寬	1 GHz [5]
頻段	28 GHz [5]
雜訊功率頻譜密度	-174 dBm/Hz [5]
接收端的噪音因子(noise figure, NF)	6 dB [5]
用戶(Client)數量	150[5]
存取點(access point, AP)數量	5 [5]

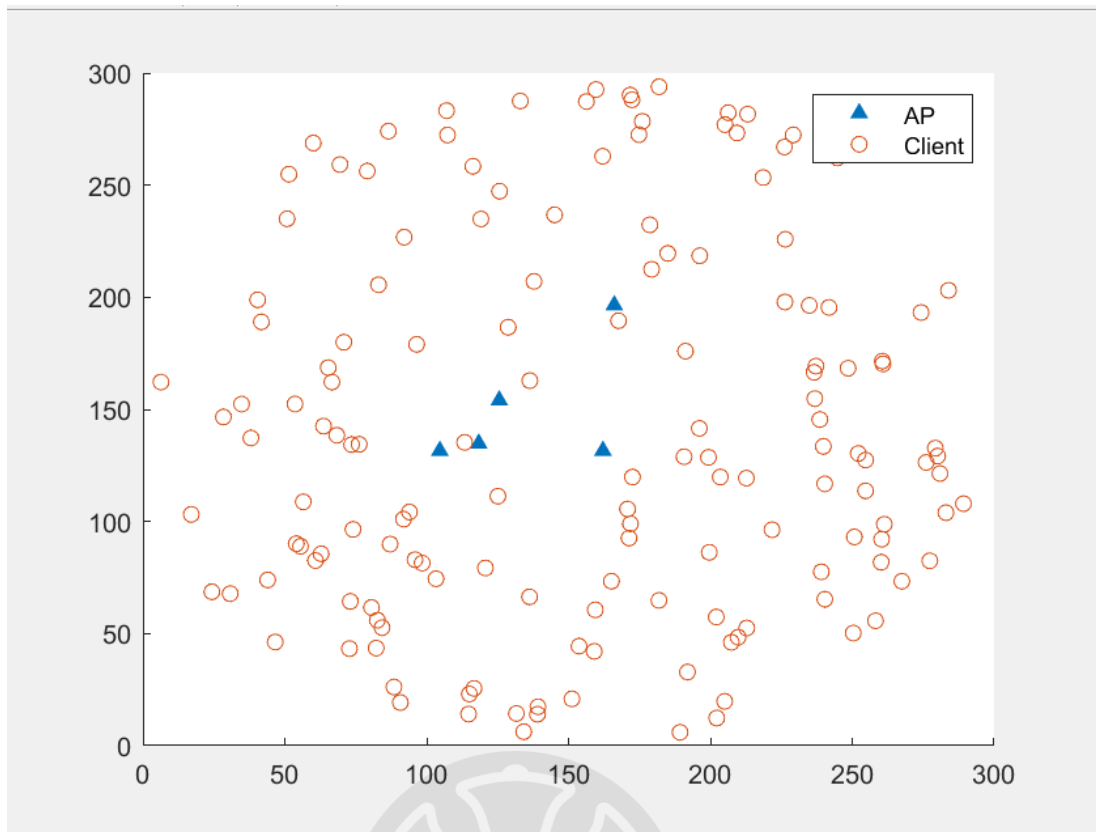


圖 4- 1：5 個 AP 與 150 用戶位置圖。

其中利用卜瓦松點程序 (Poisson point process, PPP) 以產生 5 個存取點 AP 與 150 個用戶的位置。用戶與存取點 AP 皆以(150,150)為中心，存取點 AP 的範圍半徑為 80 公尺，而用戶的半徑為 150 公尺，用戶與存取點 AP 都均勻分布於該範圍中。用戶與存取點 AP 之間鏈路狀態以及路徑損失之計算，如前所述。位置分布結果如圖 4-1 所示，其中藍色三角形表示存取點 AP 的位置，紅色空心圓表示用戶的位置。

4.2 連線最佳化問題的結果與討論

我們用 MATLAB 模擬出 5 個 AP 與 150 用戶位置之後，再利用 MATLAB 對演算法 1 進行用戶與 AP 連線的模擬。其結果如圖 4-2 所示。

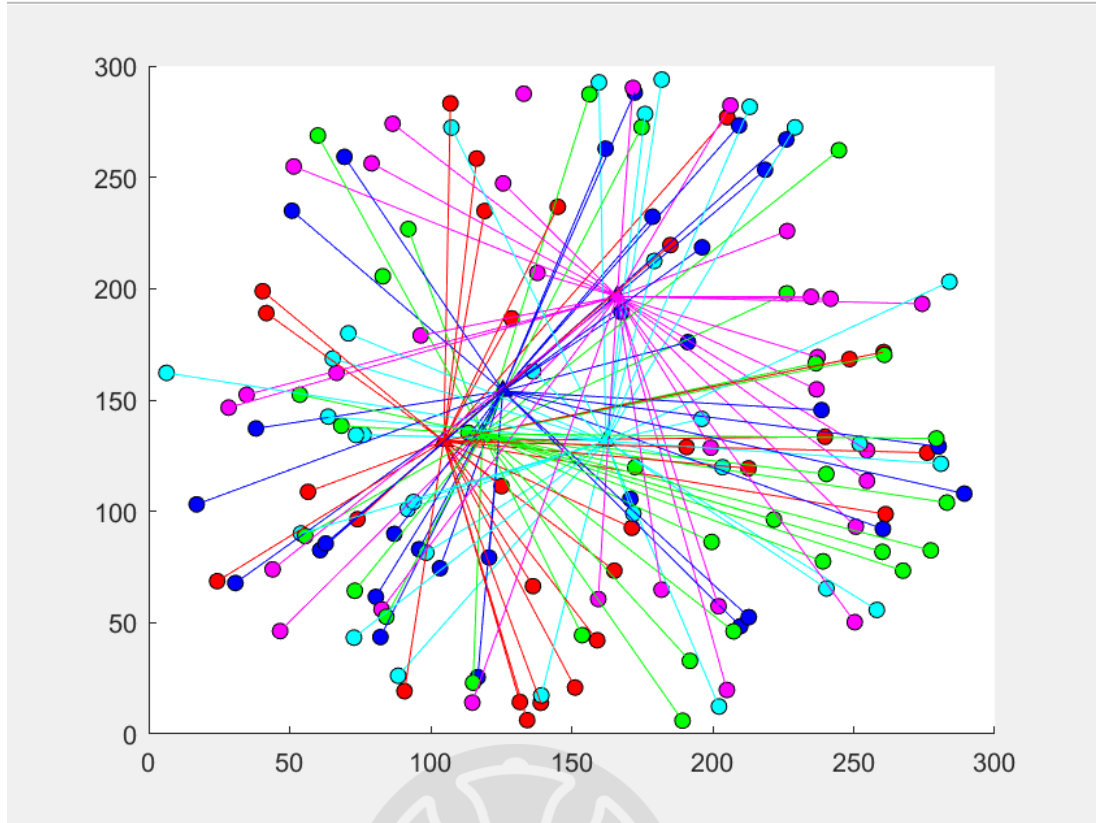


圖 4- 2: 5 個 AP 與 150 用戶的連線最佳結果圖。

4. 2. 1 分析討論部分

在圖 4-2 中，可發現到不同顏色的線表示用戶與該對應顏色的 AP 進行連線。再從圖 4-2 可以得知用戶會想要選擇與較鄰近的存取點 AP 進行連線，因為根據式子(3.13c)，各個維度的斜率為 $(b_{ik} - \lambda_k)$ ，(3.13c)之最大值，會讓用戶跟最大斜率的存取點 AP 連線。所以，用戶跟 AP 之間的距離減少，訊雜比增加；用戶跟 AP 之間的距離增加，訊雜比減少。換言之， b_{ik} 愈大，斜率愈大； b_{ik} 愈小，斜率愈小。

但是，能觀察到並不是所有用戶都會跟距離最鄰近的存取點 AP 連線，少數用戶還是選擇跟較遠但負載較小的存取點 AP 連線。這種現象的原因如下所述。

根據演算法1，只有終止條件 $n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik} = 0$ 成立時，才有最佳解。但是，根據(3.13b)， λ_k 會影響 n_k 的變化，即 $n_k = e^{(\lambda_k - 1)}$ ；也就是說，若 λ_k 愈大， n_k 愈大。

但是，如前所述，根據(3.13c)，各維度的斜率為 $(b_{ik} - \lambda_k)$ ，若 λ_k 愈大，將使得 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 愈小，與 AP k 連線的用戶愈少，或 $\sum_{i \in C} x_{ik}$ 愈小。事實上，這會是一個權衡(trade-off)的過程。因此，即便 AP 離某個用戶較遠，如果其負載 n_k 變小， λ_k 因此變小，用戶與其連線的可能性將增加。

根據實驗結果，發現與每個存取點 AP 連線的用戶數傾向差不多的數量，這是因為 b_{ik} 數值大多分布在 22 左右，所以相差不大；而根據(3.13c)，用戶會選擇與具有最大斜率 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 的存取點 AP 連線。如果每個 λ_k 間都有一點點差距，這樣會讓很多用戶選擇最小 λ_k 之存取點 AP。依據上述所講的權衡過程，會讓下一輪的 λ_k 數值變大。最終，導致每個 λ_k 間差距變為極小。因此，根據(3.13b)， $n_k = e^{(\lambda_k - 1)}$ ，每個 λ_k 間差距極小，會讓每個存取點 AP 的用戶數量幾乎一樣。

4.2.2 模擬演進部分

關於這個部分，在模擬過程中，我們將展示相關參數的演進過程，如圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7。從圖 4-3 和圖 4-4，我們觀察到 λ_k 之演進過程。根據(3.13b)， λ_k 會影響 n_k 的變化，即 $n_k = e^{(\lambda_k - 1)}$ 。需要注意的是，根據實際模擬結果顯示，與每個 AP 連線的用戶數量呈現出趨近相同趨勢，也就是說 $150/5=30$ ，150 個用戶與 5 個存取點 AP 進行連線，平均每個 AP 所連線之用戶數量大約在 30 左右，也就是 $n_k \approx 30$ 。因此， $\lambda_k \approx \ln 30 + 1 \approx 4.4$ 。圖 4-3 為 λ_k 之演進圖，其中初始時 λ_k 的值被設定為 0。不過由於 λ_k 之初始值為 0 時，各個 λ_k 到後面的變化很接近，無法清楚辨別，因此，才產生出圖 4-4，其中 λ_k 之初始值為 4，這樣一來，比較好辨別 λ_k 到後面的演進過程。

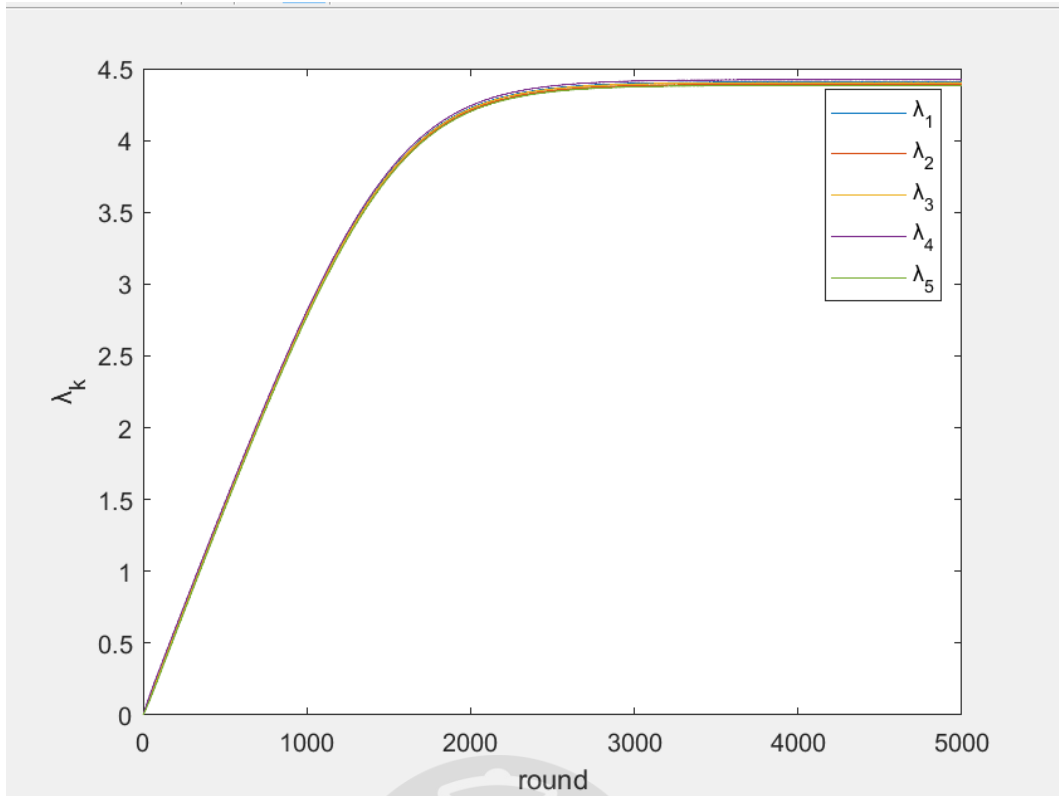


圖 4- 3: λ_k 之演進圖 (λ_k 初始值為 0)。

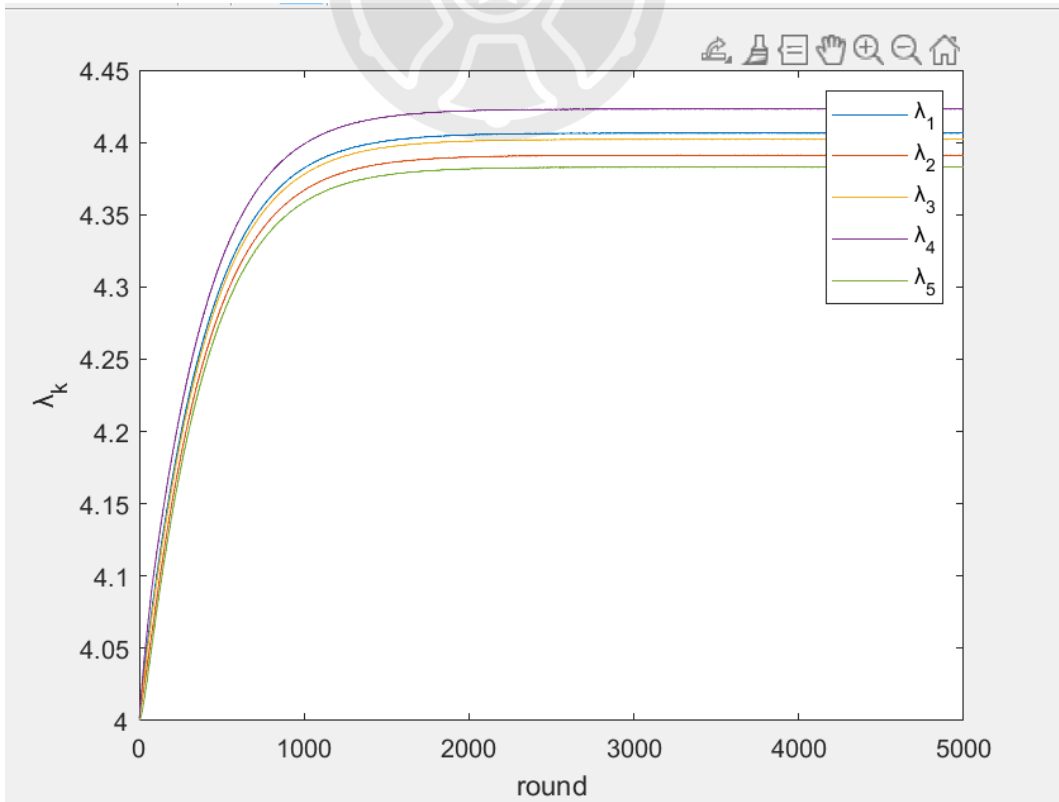


圖 4- 4: λ_k 之演進圖 (λ_k 初始值為 4)。

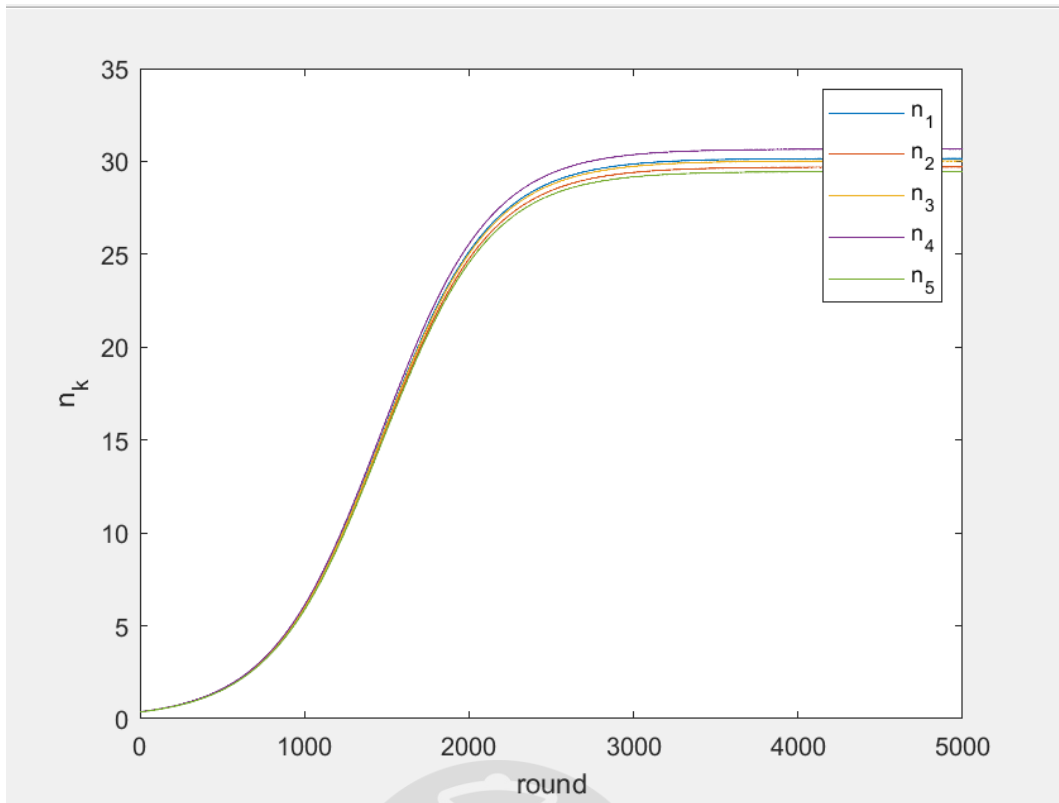


圖 4- 5: n_k 之演進圖。

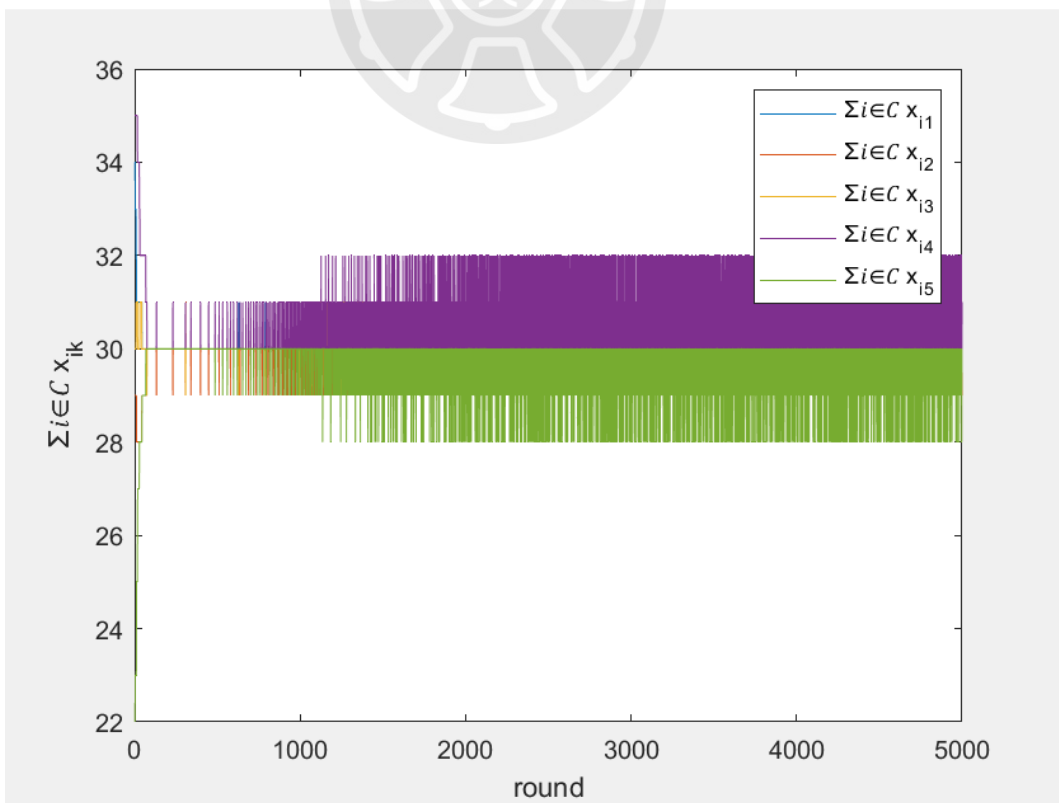


圖 4- 6: $\sum_{i \in C} x_{ik}$ 的演進圖。

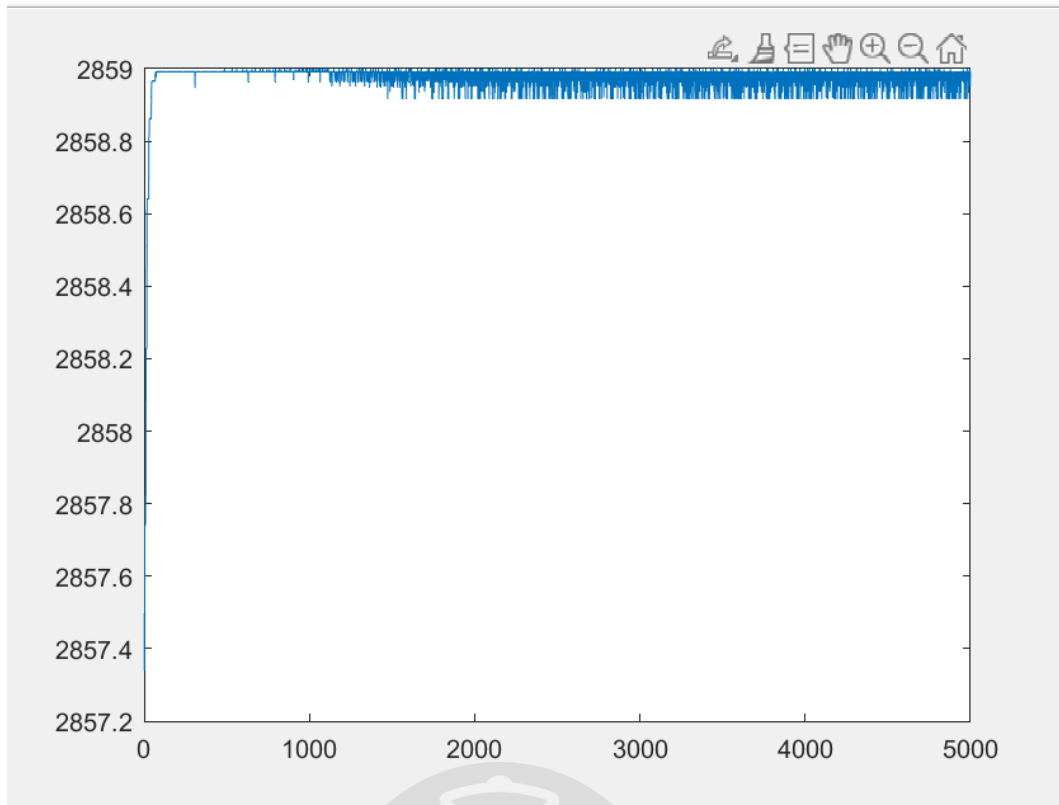


圖 4- 7: 目標值之演進圖。

接下來，圖 4-5、圖 4-6、圖 4-7。分別是 λ_k 變換 5,000 次之 n_k 、 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 以及目標值之演進圖，其中 $\delta=0.0001$ 。根據式子(3.16)，即演算法 1 的終止條件，可以觀察到，儘管 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 很快收斂到 30 上下， n_k 的收斂卻相對緩慢（大約需經過 3000 次之後）。可對比 n_k 與 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 之大小，以判斷 λ_k 是增加還是減少。由圖 4-5 與圖 4-6，能發現到 n_k 起初都少於 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ ；由此可知，圖 4-3 和圖 4-4 中隨著 n_k 的增加，可以觀察到 λ_k 出現上升的趨勢， n_k 和 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 之間差距逐漸縮小，使得 λ_k 上升的趨勢也逐漸緩和；直到獲得最佳解， λ_k 停止增加。此外，儘管 $(n_k - \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik})$ 所得到的斜率在前面 3000 次左右都無法收斂，目標值的收斂卻很快，在一開始不久就已經來到 2859 附近。

最後，總結演算法 1 的結果如下：在該演算法中，大部分用戶會傾向與最近的 AP 進行連線，因為這將帶來較大的訊雜比。然而，為了避免僅有少數用戶與

少數幾個 AP 建立連線，導致資源分配不公平的情況，部分用戶會選擇與負載較小的 AP 建立連線，而不一定是選擇連線到速率最高的 AP。這樣的設計確保了整體系統的效能均衡，同時考慮了資源分配的公平性。

4.3 模擬添加隨機幾何

我們用隨機幾何方式產生，以單位面積內產生平均用戶數，總共產生出 10000 用戶在此單位圓面積內，做 5000 次的運算，同樣也是 5 個 AP， $\delta=0.0001$ 。我們讓存取點(AP)的位置，如圖 4-8 戶與存取點 AP 皆以(0,0)為中心，存取點 AP 的範圍半徑為 80 公尺，而用戶的半徑為 150 公尺，用戶與存取點 AP 都均勻分布在該範圍內。位置分布情況如圖 4-8 所示，圖中藍色三角形表示了 AP 的位置，而黑色空心圓表示了用戶的位置。

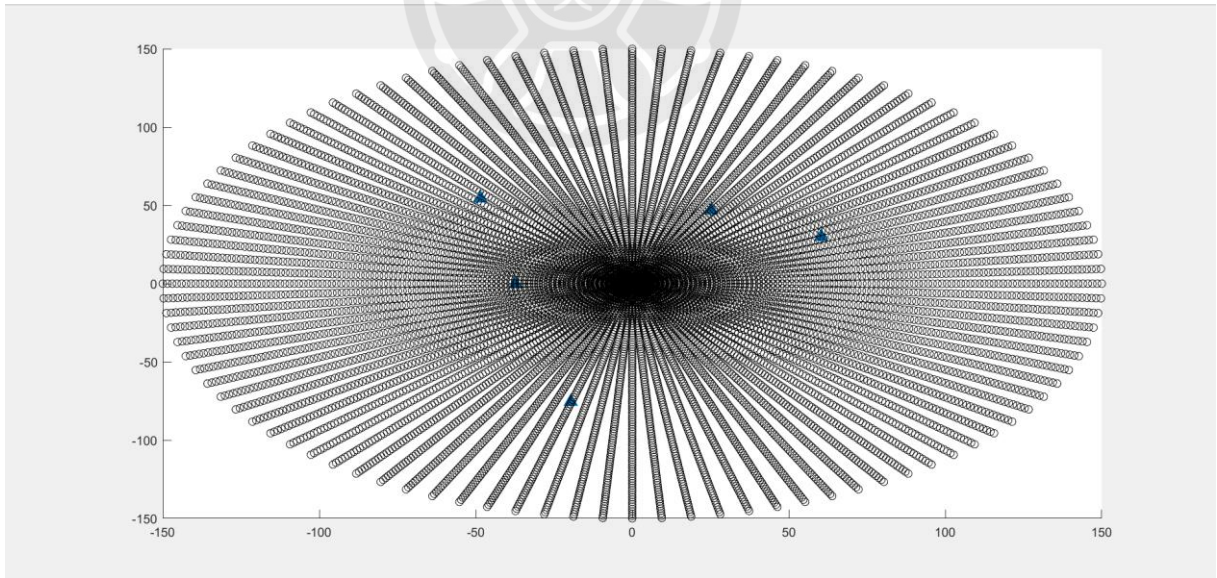


圖 4- 8:5 個 AP 與 10000 用戶的位置圖。

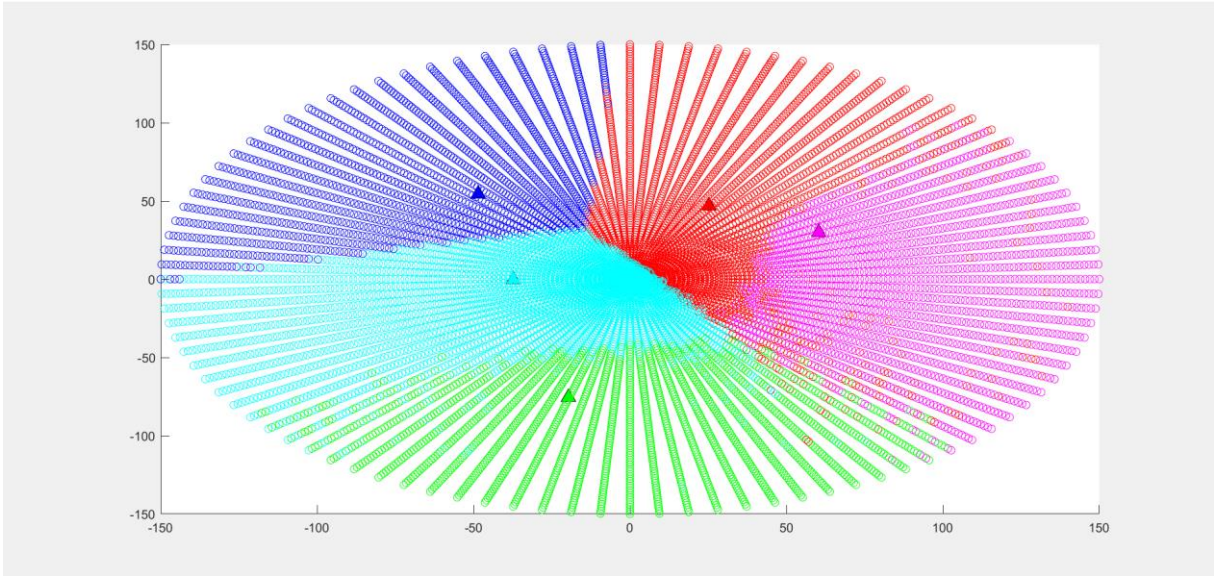


圖 4- 9: 用戶跟 AP 連線的結果圖(隨機幾何)。

在圖 4-9, 不同顏色的線代表用戶與相對應顏色的 AP 進行連線。從圖 4-9 可以觀察到, 大多數用戶選擇與距離較近的 AP 進行連線。然而, 仍然可以看到並非所有用戶都選擇與最近的 AP 連線, 少數用戶仍會選擇與距離較遠但負載較小的 AP 進行連線。

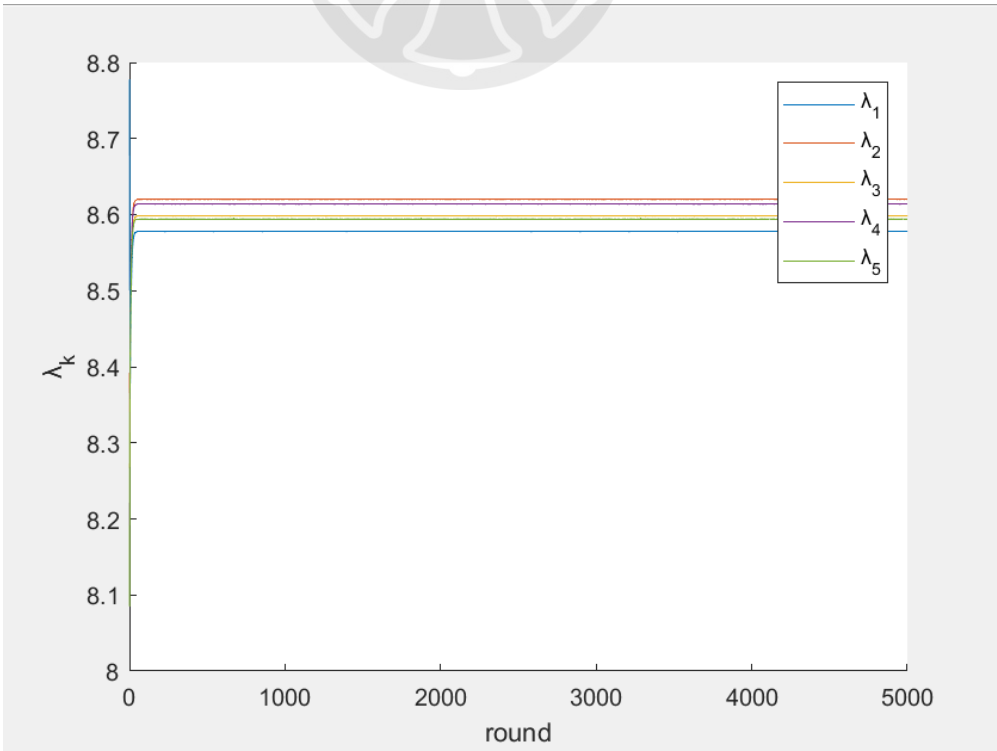


圖 4- 10: λ_k 之演進圖(隨機幾何)。

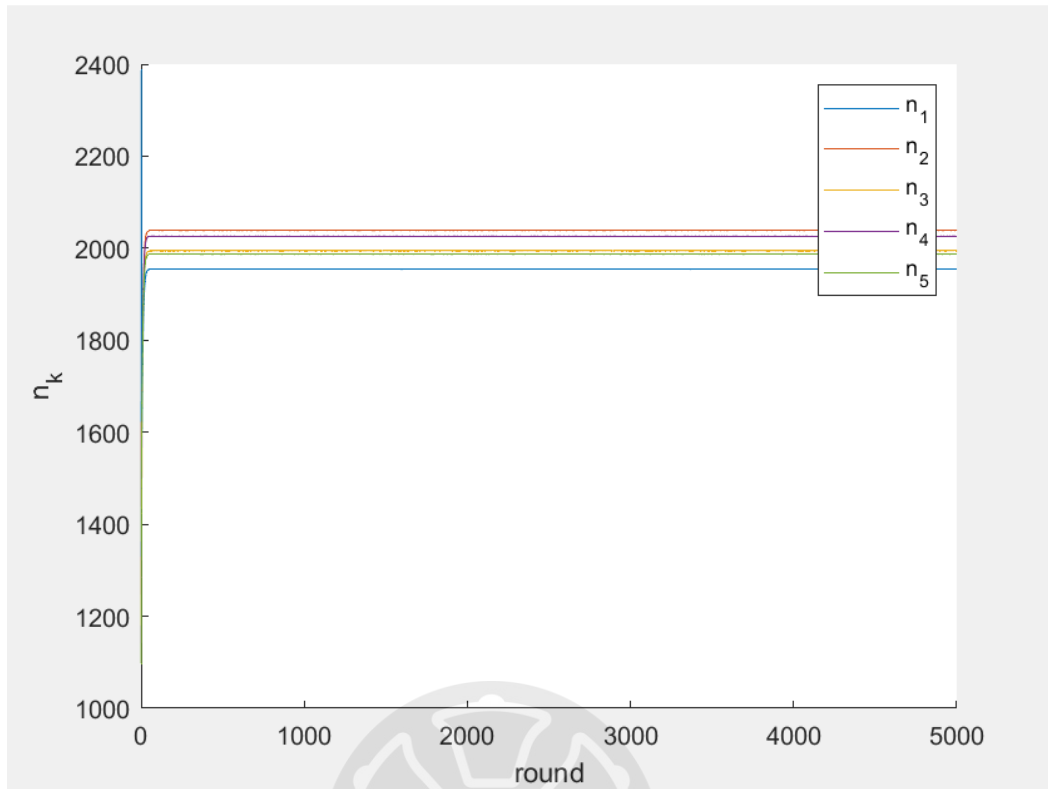


圖 4- 11: n_k 的演進圖(隨機幾何)。

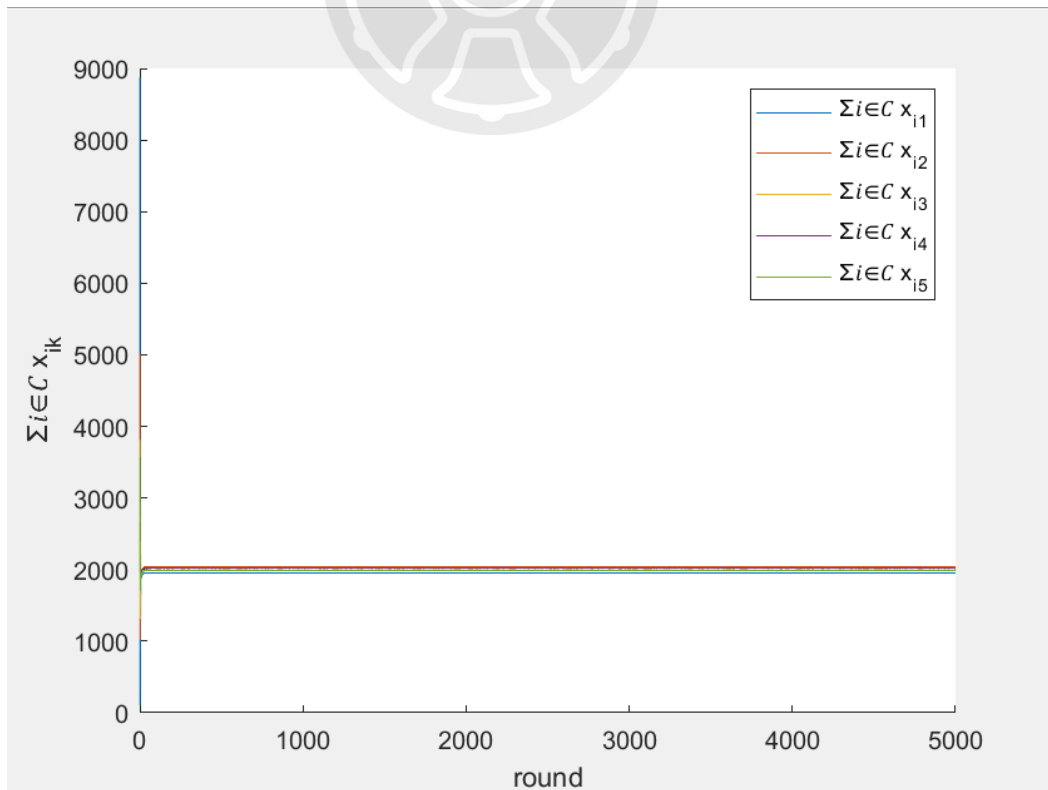


圖 4- 12: $\sum_{i \in C} x_{ik}$ 的演進圖(隨機幾何)。

圖 4-10，為在隨機幾何狀況下 λ_k 之演進圖，其中初始時 λ_k 的值被設定為 8。根據實際模擬結果，我們可以觀察到與每個 AP 連線的用戶數量會趨向相同，也就是說 $10000/5=2000$ ，讓與每個 AP 所連線的用戶數量大約落在 2000 左右，也就是 $n_k \approx 2000$ 。因此， $\lambda_k \approx \ln 2000 + 1 \approx 8.6$ 。

接著，圖 4-11、圖 4-12。分別為 λ_k 變換 5,000 次之 n_k (隨機幾何)、 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 演進圖(隨機幾何)，其中 $\delta=0.0001$ 。根據(3.16)，可發現到，儘管 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 很快收斂到 2000 上下， n_k 的收斂卻相對緩慢。可對比 n_k 與 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 之大小，以觀察 λ_k 是增加還是減少。從圖 4-11 和圖 4-12 可以觀察到， n_k 最初小於 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ ；因此，在圖 4-10 中， λ_k 隨著增加 n_k 而上升，隨著 n_k 逐漸增大， n_k 與 $\sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ 之間差距逐漸減小，導致 λ_k 上升逐漸緩慢；當達到 $n_k = \sum_{i \in \mathcal{C}} x_{ik}$ ，即達到最佳解時， λ_k 停止增加。

最後，可以發現用戶的連線是透過比較 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 來決定，由於 $b_{ik} = \log r_{ik}$ ，而 λ_k 是由存取點 AP 定期所廣播，用戶因此可分散式地決定與 $(b_{ik} - \lambda_k)$ 結果最大的基地台進行連線。根據這個方式，可透過隨機幾何 (stochastic geometry) 的方式，來計算一個服務區域內，平均的用戶連線速率。

第五章 結論

本文探討了在 5G 毫米波網絡中連線最佳化客戶對 AP 的問題。目標是在考慮 AP 中的負載平衡的情況下，最大化網絡中用戶速率的對數效用。我們展示了這個問題可以被轉化為一個多維分配問題。然後，我們對偶分解法算法來解決此問題。

根據用戶與存取點 AP 之間的距離，可透過通道模型的計算，獲得訊號雜訊比 SNR，再利用 Shannon 定理，可計算通道速率。以用戶所分配的頻寬資源之比例公平性 (proportional fairness) 為基礎的效用函數 (utility function)，經過對偶分解法 (dual decomposition) 的處理後，可以讓用戶決定與哪個存取點進行連線。

根據模擬結果，得知透過隨機幾何 (stochastic geometry) 的方式，來計算一個服務區域內，計算用戶的平均連線速率。

參 考 文 獻

- [1] 5G 概念股看什麼？Sub 6、毫米波差在哪？一文看懂產業鏈 3 大趨勢
<https://www.bnnext.com.tw/article/60653/5g-stock-industry-cellphone-december>
- [2] The Emergence of 5G mmWave
[The Emergence of 5G mmWave – Accton Technology](#)
- [3] M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, “Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation,” *IEEE Jour. Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179, 2014.
- [4] L. Daniel, K. Narayanan, “Congestion Control 2: Utility, Fairness and Optimization in Resource Allocation,” *Mathematical Modelling for Computer Networks- Part I*, pp.2-1 – 2-10, March 2013.
- [5] Y. Xu, H. Shokri-Ghadikolaei, and C. Fischione, “Distributed association and relaying with fairness in millimeter wave networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 7955–7970, Dec 2016.
- [6] A. Esmailpour and N. Nasser, “Dynamic QoS-Based Bandwidth Allocation Framework for Broadband Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2690-2700, July 2011.
- [7] R. Liu, G. Yu, J. Yuan, and G. Y. Li, “Resource Management for Millimeter-Wave Ultra-Reliable and Low-Latency Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 1094-1108, Feb. 2021.
- [8] A. S. Cacciapuoti, “Mobility-Aware User Association for 5G mmWave Networks,” *IEEE Access*, pp. 21497 - 21507, Sep. 2017
- [9] Y. Xu, H. S. Ghadikolaei, and C. Fischione, “Adaptive distributed association in time-variant millimeter wave networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 1, pp. 459–472, Jan. 2019.
- [10] Y. Bejerano, S.-J. Han, and L. Li, “Fairness and Load Balancing in Wireless LANs Using Association Control,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 15, no. 3, pp. 560-573, June 2007.
- [11] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, “User Association for Load Balancing in Heterogeneous Cellular Networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, June 2013
- [12] H. Elshaer, M. N. Kulkarni, F. Boccardi, J. G. Andrews, and M. Dohler, “Downlink and Uplink Cell Association with Traditional Macrocells and Millimeter Wave Small Cells,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*,

vol. 15, no. 9, pp. 6244-6258, Sept. 2016.

[13] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta, and R. W. Heath, "Modeling and Analyzing Millimeter Wave Cellular Systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 1, pp. 403-430, Jan. 2017

[14] 算幾不等式的證明(II)與(III)

<https://math.ntnu.edu.tw/~horng/letter/hpm1701.pdf>



附 錄 一

表 4: 重要文獻符號表。

符號表	符號意義
i	用戶
k	存取點 AP
r_{ik}	用戶與存取點之間的連線速率
d_{ik}	用戶與存取點 AP 的距離
p_{out}	d_{ik} 之中斷機率
p_{LOS}	d_{ik} 之直視波傳輸機率
p_{NLOS}	d_{ik} 之非直視波傳輸機率
d	存取點與用戶間的距離
ξ	對數常態 (lognormal) 隨機亂數
P_{TX}	傳輸總功率
P_{RX}	接收所有角度方向的總功率
$G_{TX}、G_{RX}$	天線的增益
P_{noise}	雜訊功率
r_i	用戶 i 之速率
y_{ik}	存取點 k 分配給用戶 i 的資源
SNR_{ik}	用戶 i 與存取點 k 之間鏈路的訊號雜訊功率比
n_k	存取點 k 的用戶連線數量
\mathcal{C}	所有用戶 i 的集合

\mathcal{A}	所有存取點 k 的集合
\mathcal{C}_k	與存取點 k 連線用戶的集合
x_{ik}	二元連線指示器
δ	基本改變幅度
b_{ik}	對 r_{ik} 取對數

表 5: 英文縮寫表。

縮寫表	英文全名
IoT	Internet of Things
VR	virtual reality
EMBB	Enhanced Mobile Broadband
uRLLC	Ultra-Reliability and Low Latency Communications
mMTC	Massive Machine Type Communications
AP	access point
SNR	signal-to-noise ratio
LOS	line of sight
NLOS	non-line of sight
PL	path loss
NF	noise figure
QoS	quality of service
WiMAX	worldwide interoperability for microwave access
RRM	radio resource management

MAC	medium access control
3GPP	3rd generation partnership project
PF	proportional fairness
5G	5th generation mobile networks



附 錄 二 算幾不等式[11]

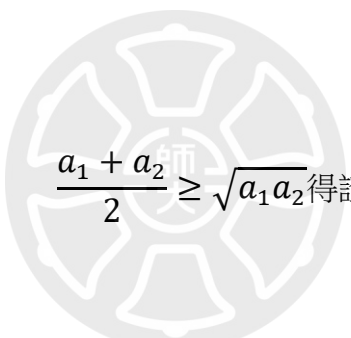
證明算幾不等式如下：

$$\frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{n} \geq \sqrt[n]{a_1 a_2 a_3 \dots a_n}$$

首先，當 $n=2$ 時，證明 $\frac{a_1+a_2}{2} \geq \sqrt{a_1 a_2}$ ，使用差值比較法，如下：

$$\frac{a_1 + a_2}{2} - \sqrt{a_1 a_2} = \frac{(\sqrt{a_1})^2 + (\sqrt{a_2})^2 - 2\sqrt{a_1 a_2}}{2} = \frac{(\sqrt{a_1} - \sqrt{a_2})^2}{2} \geq 0$$

故


$$\frac{a_1 + a_2}{2} \geq \sqrt{a_1 a_2} \text{ 得證}$$

等號成立於 $a_1 = a_2$

接著，當 $n=3$ 時，證明 $\frac{a_1+a_2+a_3}{3} \geq \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$ ，令 $a_3 = \frac{a_3 + \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}}{2}$ ，運用當 $n=2$ 時的算幾不等式，如下：

$$\frac{\frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{a_3 + \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}}{2}}{2} \geq \sqrt{\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right) \left(\frac{a_3 + \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}}{2}\right)} \geq \sqrt{\sqrt{a_1 a_2} \sqrt{a_3 \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}}} = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$$

左右兩式整理得 $\frac{a_1+a_2+a_3}{2} + \frac{\sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}}{2} \geq 2\sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$ ，移項得 $\frac{a_1+a_2+a_3}{3} \geq \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$ ，得證。

我們把上述方法稱為代換法，因此，我們再試一次，當 $n=4$ 時，證明

$$\frac{a_1+a_2+a_3+a_4}{4} \geq \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}, \text{ 令 } a_4 = \frac{a_4 + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4} + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}}{3}, \text{ 利用當 } n=2 \text{ 與 } n=3 \text{ 時}$$

的算幾不等式，如下：

$$\begin{aligned} \frac{\frac{a_1+a_2+a_3}{3} + \frac{a_4 + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4} + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}}{3}}{2} &\geq \sqrt{\left(\frac{a_1+a_2+a_3}{3}\right)\left(\frac{a_4 + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4} + \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}}{3}\right)} \\ &\geq \sqrt{\sqrt[3]{a_1a_2a_3} \sqrt{a_4(\sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4})^2}} = \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4} \end{aligned}$$

左右兩式整理得 $\frac{a_1+a_2+a_3+a_4+2\sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}}{3} \geq 2\sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}$ ，移項得

$$\frac{a_1+a_2+a_3+a_4}{4} \geq \sqrt[4]{a_1a_2a_3a_4}, \text{ 得證。}$$

經由上述兩次計算證明，最後我們根據數學歸納法將 $n=k$ 推導到 $n=k+1$ ，即利用當 $n=k$ 時的算幾不等式，如下：

$$\begin{aligned} \frac{\frac{a_1+\dots+a_k}{k} + \frac{a_{k+1} + \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}} + \dots + \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}}}{k}}{2} \\ \geq \sqrt{\left(\frac{a_1+\dots+a_k}{k}\right)\left(\frac{a_{k+1} + \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}} + \dots + \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}}}{k}\right)} \\ \geq \sqrt{\sqrt[k]{a_1a_2\dots a_k} \sqrt{a_{k+1}(\sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}})^{k-1}}} = \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_k a_{k+1}} \end{aligned}$$

左右兩式整理得 $\frac{a_1+\dots+a_k+a_{k+1}+(k-1)\sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}}}{k} \geq 2\sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}}$ ，移項得

$$\frac{a_1+\dots+a_{k+1}}{k+1} \geq \sqrt[k+1]{a_1a_2\dots a_{k+1}}, \text{ 得證。}$$

自傳

我是李奕叡，居住在新北市，在家中排行老大，父母從小教育我們要腳踏實地，長大有能力的時候，要多幫助一些需要幫助的人們。平常熱愛運動，其中最喜愛桌球，從高中階段打到現在研究所都還有再打，充滿著很多熱血的回憶。

在大學時期，認識了來自不同地區的朋友，跟他們創造了很多瘋狂的回憶。從起初對電機一竅不通的我，到慢慢對電機這個領域產生熱愛，也發現電機這個領域涵蓋的東西非常多，到後來每位同學都精通不同的領域技術，而我自己專題是選有關通訊方面，但大家還是會多方交流技術，運用到自己領域看看結果，讓我對電機這領域有大部分的了解。

在研究所時期，我發現課程的難度及壓力，跟大學時期有著天壤之別，一開始自己有些許不習慣，但經過課程學習的累積，還有指導教授耐心的教導和開導，我慢慢獲得如何自我解決問題的能力，要自己去尋找答案，而不是等著教授給你答案，也從指導教授那邊學到不少知識。無論之後是繼續進修或是在科技產業上發展，期許未來自己能有的表現，為科技業盡一份心力。

學術成就

- [1] J. -J. Huang, Y. -R. Li and D. Shiung, "A design for client association and resource allocation in mmWave 5G networks," *ICASI 2022.*, April. 2022

