

張智為*

運用啟發式演算法模擬 5G 頻譜競標

第五代行動通訊系統(5G)不但將大幅提升行動通訊速率與品質，在新興的AR/VR、智慧城市、物聯網及車聯網等應用服務中，5G更將是一個非常重要的通訊載具；但是無線電頻譜資源是非常有限，可開放使用的頻道非常稀少，因此各國政府多以競標方來拍賣行動通訊頻道，在3G與4G的頻譜競標之中，每MHz的平均標金履創新高，以致高價的頻譜使用成本已成為電信營運商的一大負擔，如何評估競標一個新的服務頻道，將是一個非常值得研究的議題。

由於各國政府公開的無線電頻譜競標資訊也非常有限，公開的真實頻譜拍賣數據也有其局限性，以及無線電頻譜的物理特性限制，所以過去頻譜競標研究模型很難一體適用。本研究是首個建立頻譜競標的標金模型，並且成功模擬出實際5G頻譜競標結果之研究，本模型利用啟發式演算法(Metaheuristic)，並結合電信營運商的服務用戶數、用戶平均貢獻(Average Revenue Per User, ARPU)、頻道需求、網路涵蓋需求的建設成本(Capital Expenditures, CAPEX)以及頻道競標底價等要素進行頻譜競標的模擬研究，其結果可以展示出可能的得標組合與決標金額之分佈樣態，並可協助競標業者研擬經營策略與網路規劃，另外，本研究的頻譜競標模擬結果，亦可事前提供政府主管機關參考，用以制訂符合5G產業發展需要的相關規範。

關鍵詞：頻譜競標、5G、啟發式演算法、模擬退火演算法

* 作者張智為為國立政治大學資訊管理學系博士候選人

E-mail: 107356509@nccu.edu.tw

Chih-Wei Chang *

Simulating 5G Spectrum Auction by using Metaheuristic

The 5th generation mobile communication (5G) system will not only improve the wireless broadband speed and quality of service, but also be a major communication platform in those novel applications, such as AR/VR, smart city and IoT.

However, the radio spectrum is a limited resource, and those radio frequency (RF) channels which can be used on mobile services are very rare. Therefore, almost all of the countries around the world set up auction mechanism as a method for bidding RF channel license. Especially since 2000, the bidding price in the auctions of European countries' radio spectrum has continuously reached new peak. The spectrum license fee almost becomes a huge fixed capital expenditure for mobile service providers.

In the upcoming 5G era, deciding the submitting number of RF channels and price for new mobile service will be the major mission of operator. Nevertheless, it is hard to create a uniform spectrum auction research model during scarce open real spectrum auction data, physical characteristics of the radio frequency and various spectrum governance in different countries. As my best knowledge, this research model is the first research which successfully performs the simulations of the real 5G spectrum auction, by using Metaheuristic and combining the number of subscribers and ARPU(Average Revenue Per User) , the RF bandwidth demands, network coverage, CAPEX (Capital Expenditures) of the operators, and reserve price of auction in each resource condition. The simulation result can show the distribution of the combinations of the final award of bids, it can also help operators decide the business strategies and network plans. Moreover, the result can also assist the government to develop and discipline the 5G industry.

Keywords: 5G, Spectrum auction, Metaheuristic, Simulated Annealing

*Author is a Ph.D. candidate at the Department of Management Information Systems, National Chengchi University.

Email: 107356509@nccu.edu.tw

壹、前言

2018 年台灣行動通信業者為了競爭用戶數，在 4G 行動上網服務上強打 499 元吃到飽的殺價戰之後，於 2019 年 1 月台灣電信三雄公布的 2018 年自結營運表現明顯大幅衰退，預估業者年獲利能力將減少 60 億台幣以上。

在行動通訊服務之中，電信公司取得的無線電頻譜愈大，其可提供的服務容量也愈大，代表可以同時提供服務的用戶數也愈多，以及用戶也可以得到較高速的上網頻寬。過去第三代行動通訊系統(Third-generation mobile networks, 3G)及第四代行動通訊系統(4th generation mobile networks, 4G)的頻譜競標中，最後標金已履創新高，頻譜費用已成為經營行動電信服務的龐大固定資本支出。但在營收與獲利同步衰退的狀況下，對於即將開始的第五代行動通訊系統 (5th generation mobile networks, 以下簡稱 5G)的發展，將增加未來 5G 服務的推動的痛處以及 5G 頻譜競標的變數。

由於無線電頻道使用費已經成為電信業者的一大負擔，但是參如表 2 台灣前三次 4G 頻譜執照的競標結果，最後決標的總標金從溢價 230.5% 到不足底價的 3.9%，其決標金額與底價差異變化是非常巨大的，因此如何評估競標頻道數量與金額將一個非常重要的課題，本文將提供一個有效的競標模擬模型，可供競標業者與主管機構進行事前模擬可能的決標結果與分析，以利進行新的網路設計、策略規劃以及政策擬定。

貳、參考文獻

一、頻譜競標

由於無線電頻譜是稀有的物理資源，因此，自千禧年以來各國政府大多使用競標方式，開放予電信業者使用無線電頻譜也大幅增加政府歲收。Bichler, Goeree, Mayer, and Shabalin (2014) 越來越多的全球電信監理機構開始使用組合拍賣 (Combinatorial Auction, CA)，同時進行多個無線電頻段與數個頻道的網路服務許可證拍賣作業；其中投標人可以提交數百或數千，甚至數萬種的頻譜競價組合，但由於過去公開的競標資訊非常少，目前可提供的決策依據仍然非常有限。

Adomavicius, G., Gupta, A., & Yang, M. (2018) 在很多特定領域上組合拍賣是一個重要的商務機制，然而在一般通用領域上仍不多見；組合拍賣的待售標的與出價模式通常分為 **Single-Item Multi-Unit (SIMU)**與 **Multi-Item Single-Unit (MISU)** 兩種拍賣類型，**SIMU** 拍賣模式是由投標人選擇競標的單位數，而 **MISU** 拍賣模式則是由投標人選擇投標的標的集合；常見的 **MISU** 拍賣包含：無線電頻譜拍賣，鐵道與機場使用時間分配權以及卡車運輸與工業採購等。

無線通訊服務的增長是推動未來經濟成長的潛在動因，也促使決策者和監管機構必須研究管理頻譜政策與制度，以提高無線電頻譜使用效益及加速行動通訊市增的發展。**Jain and Dara (2017)** 過去十年來印度的頻譜管理政策已有顯著的變化，從傳統的行政體制轉向更加商業化的體制，無線電頻譜除了在二級市場進行拍賣外，也開放在二級市場上進行交易，並且開放頻譜使用的中立性，由各電信服務商自行決定採用技術與提供服務類型。而 **Bichler et al. (2014)** 的研究指出在幅員廣大的地區，監管機構除了舉行各地區的許可證頻譜拍賣作業外，特別在加拿大與美國地區，全國性的電信營運商甚至堅持要求提供多地區多頻道的捆綁包裹出價，更加深了競標規則的設計難度與決策的複雜度。

幾十年來經濟學家、營運研究人員和電腦科學家已經在組合拍賣的研究上提出了很多貢獻，包含：競標規則、出價方式、支付規則、贏家演算法、保留價格等等。雖然已有不少學者提出組合拍賣的方法與研究，然而 **Weiss, Lubin, and Seuken (2017)** 指出頻譜競標分析仍是一個非常具有挑戰性的問題，受限於不同無線電頻段的物理特性有所不同，且各國頻譜管理、組合應用也有所不同，所以研究模型很難一體適用；並且由於各國政府公開的無線電頻譜競標資訊非常有限，公開的真實頻譜拍賣數據也有其局限性，通常也難以轉化為實際的現實問題，更加深研究的不確定性；因此研究人員很難有數千個實例可供測試不同拍賣方式設計，以致經歷了十幾年的研究，目前尚無大幅的進展。

Bichler et al. (2014) 及 **Weiss et al. (2017)** 研究建議使用價值模型(Value model)與拍賣產生器(Auction Instance Generator)來進行頻譜競標研究分析，但此種模擬方式通常用於各無線電頻段的價值分析，並不易轉化為頻道組合競標的決策依據。

參如表 1 羅列出無線電頻譜競標的相關文獻，由於過往的研究文獻多為組合拍賣的方法，以及頻譜競標的質性研究為主，量化研究並不多見而且標金預測的研究更加稀少，以致目前仍未有良好的頻譜競標預測模型，可以有效預測競標結果，以及最後各競價公司取得的頻道數量與決標金額，因此本研究的主要目的將是建立決標預測模型，用以協助參與競價公司可以事先進行模擬評估，以便進行策略研擬與網路系統規劃。

參閱 Anumandla, Kudikala, Venkata, and Sabat (2013) 使用啟發式演算法來研究頻率指派問題，以及 Paul, Maitra, Mandal, Sadhukhan, and Saha (2011) 使用啟發式演算法來動態配置不同服務的行動網路服務頻譜，以提高用戶服務體驗，啟發本研究想要利用啟發式演算法，進行頻譜競標的狀況模擬方式，在符合台灣的通訊監理方式下，由多個業者同時在不同的開放頻道上進行競價作業，讓決策單位可以有競標的模擬結果，以供制訂 5G 頻譜競標的方法與準則。同時也可以提供參與競標者，用以評估取得頻道數量及標金投資需求，以供研擬投標策略及擬定網路建設規劃之依據。

二、台灣 4G 頻譜釋照競標方式

葉子平(2018)的研究指出，依「行動寬頻業務管理規則」，就台灣前三次 4G 頻譜釋照程序，從舉辦說明會、競價業者申請、業者資格審查、競價投標作業、到最終公告競價結果，每一次釋照都歷經一年以上作業時間；而頻譜拍賣規則採用多回合上升拍賣(Simultaneous Multiple Round Auction, SMRA)方式進行競標，競價者可以在每一回合中同時對多個標的進行報價，競價者於每次競標報價皆必須上升價格，且報價增幅最低得不少於 1%，每一回合由各標的最高報價者成為暫時得標者，最終各標的連續數次未有新的報價時結束競標，由各標的最後暫時得標者得標。

再者，第三次 4G 頻譜競標為提升各業者通訊頻道的使用便利性，拍賣規則變更為「改良型多回合上升拍賣制度」，分為兩階段競標作業，第一階段競價作業方式同前 2 次競價作業，但只先決定各競價者在各頻段取得的頻寬；第二階段位置

競價作業，先由各競價業者提出選擇頻道位置意向書，如有重疊位置將先進行協調，協調不成再進行一回合報價決定最終各競價者取得的頻道。

表 1 頻譜問題相關文獻匯整表

文獻	研究發現	質性研究	量化研究	標金預測
Bichler, Goeree, Mayer, and Shabalin (2014)	<ul style="list-style-type: none"> 越來越多的全球電信監管機構開始使用組合拍賣 (Combinatorial Auction, CA)，同時進行多個無線電頻段與數個頻道的網路服務許可證拍賣作業。 由於過去公開的競標資訊非常少，目前可提供的決策依據仍然非常有限。 監管機構除了舉行各地區的許可證頻譜拍賣作業外，特別在加拿大與美國地區，全國性的電信營運商甚至堅持要求提供多地區多頻道的捆綁包裹出價。 	V		
Adomavicius, et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> 在很多特定領域上組合拍賣是一個重要的商務機制，組合拍賣的待售標的與出價模式通常分為 Single-Item Multi-Unit (SIMU) 與 Multi-Item Single-Unit (MISU) 兩種拍賣類型。 常見的 MISU 拍賣包含：無線電頻譜拍賣，鐵道與機場使用時間分配權以及卡車運輸與工業採購等。 本研究提出的計算工具可以促進在商業和消費者市場中更有效與透明地實施 SIMU 組合拍賣。 	V	V	
葉子平(2018)	<ul style="list-style-type: none"> 台灣前三次 4G 頻譜拍賣規則採用多回合上升拍賣(Simultaneous Multiple Round Auction, SMRA)方式進行競標。 4G 頻譜釋照程序，從舉辦說明會、競價業者申請、業者資格審查、競價投標作業、到最終公告競價結果，每一次釋照都歷經一年以上作業時間。 	V		
Weiss Lubin, and Seuken (2017)	<ul style="list-style-type: none"> 頻譜競標分析仍是一個非常具有挑戰性的問題，受限於不同無線電頻段的物理特性有所不同，且各國頻譜管理、組合應用也有所不同，所以研究模型很難一體適用。 由於各國政府公開的無線電頻譜競標資訊非常有限，公開的真實頻譜拍賣數據也有其局限性，通常也難以轉化為實際的現實問題，以致經歷了十幾年的研究目前尚無大幅的進展。 	V		
Jain and Dara (2017)	<ul style="list-style-type: none"> 過去十年來印度的頻譜管理政策已有顯著的變化，無線電頻譜除了在二級市場進行拍賣外，也開放在二級市場上進行交易。 印度政府對頻譜使用態度已改為開放性的技術中立性，由各電信服務商自行決定採用技術與提供服務類型。 	V		
Weiss et al. (2017)	<ul style="list-style-type: none"> 研究建議使用價值模型(Value model) 與拍賣產生器(Auction Instance Generator) 來進行頻譜競標研究分析 		V	V
Anumandla et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> 頻率指派是一個複雜的 NP-hard 問題而且在服務需求上必須即時被處理，本研究使用啟發式演算法來改善頻率指派問題。 		V	
Paul et al. (2011)	<ul style="list-style-type: none"> 使用啟發式演算法來動態配置不同服務的行動網路服務頻譜，以提高用戶服務體驗。 		V	

資料來源：本研究彙整

三、台灣 4G 頻譜競標結果

既有 4G 頻譜執照取得成本已經非常高，綜整台灣先前 3 波 4G 頻譜釋照的競標結果參如表 2 與表 3，且決標總金額也與底價差異的有非常大的變化，後續因可

再開放的無線電頻寬將更加有限，可以預期易於使用的無線電頻道之競標將更為激烈。

四、台灣電信產業概況

由 2020 年 1 月台灣電信公司公布的 2019 年自結營運數據中發現，在 2018 年台灣行動通信業者展開價格戰之後獲利表現明顯大幅衰退，預估業者年獲利能力將減少 60 億台幣以上(如表 4)

表 2 台灣 4G 頻譜釋照每次競標結果匯整表

釋照時間	釋照總頻寬 (MHz)	釋照底價 (新台幣億元)	決標總標金 (新台幣億元)	超過底價比例
首次 2013 年	270MHz	359	1,186.50	230.5%
第二次 2015 年	190MHz	144	279.25	93.3%
第三次 2017 年	150MHz	294	282.65	- 3.9%

資料來源：國家通訊傳播委員會，本研究彙整

表 3 台灣電信公司取得 4G 頻譜執照的成本表

電信公司	頻譜總頻寬 (MHz)	頻譜總成本 (新台幣億元)	平均頻譜成本 (億元/MHz)
中華電信	180	599.65	3.331
台灣大哥大	110	410.43	3.731
遠傳電信	155	469.60	3.030
亞太電信	70	143.86	2.055
台灣之星	70	124.85	1.784

資料來源：國家通訊傳播委員會，本研究彙整

表 4 台灣行動電信公司 2019 年的自結營收數據

電信公司	2019 年 EPS	備註說明
中華電信	4.23	累計營收 2,075.2 億元，年減 3.70%
台灣大哥大	4.51	累計營收 1,244.2 億元，年增 4.82%
遠傳電信	2.68	合併總營收 838.6 億元，年減 2.68%
亞太電信	-1.78	累計營收 142 億元，年減 2.2%
台灣之星	-0.62	全年營收 131.2 億元，年減 2.5%

資料來源：各公司財報，本研究彙整

五、未來 5G 頻譜競標需求

第五代行動通訊系統是由 3GPP 標準組織基於既有 LTE 技術標準持續精進的通訊技術標準，計畫於 2020 年可以開始商業運轉，期望提高 100 倍以上的通訊速率

及降低傳輸延遲時間至 1ms，進而符合 4K、8K 超高畫質影像、AR/VR 虛擬實境、車聯網系統及 IOT 等大量終端裝置的應用需求。

為了提供 5G 的新興應用服務，台灣的電信公司將必須再次爭奪新開放的頻譜資源；並且由於台灣民眾對行動電話基地台非常排斥，基地台住戶抗爭層出不窮，因此在有利於佈建全區涵蓋的低頻段無線電頻道將更顯得重要，在可以指配的頻譜資源愈來愈稀少的情況下，更將是各業者主要的角力重點，預料電信業者勢必又將再次激烈爭奪新開放的 5G 頻譜資源。

表 5 主要啟發式演算法分類與應用領域表

類型	啟發式演算法	應用領域
單行解演算法	禁忌搜尋法 (TS) 模擬退火法 (SA) 變動鄰域搜尋法 迭代搜尋法 (LS)	<ul style="list-style-type: none"> ● 工作排程，包含：工廠排程問題、流程規劃...等 ● 電信工作與通訊系統，包含：頻道指派、路由規劃、網路設計、行動網路規劃、...等 ● 運輸路徑 (Vehicle routing in transport) ● 工程資源分配與物流管理
演化型演算法	基因演算法 (GA) 演化策略法 (SA) 演化策略法 (EA)	<ul style="list-style-type: none"> ● 集合問題，包含：裝箱問題、集合覆蓋問題 ● 工程技術，包含：半導體佈局設計、電力系統分配、結構工程設計、化學工程、訊號處理等 ● 人工智慧應用，包含：神經網路訓練、樣式辨識、群集分析(Clustering)、分類分析 (Classification)...等
群體智能演算法	粒子群最佳化(PSO) 螞蟻演算法(ACO) 蜂群最佳化演算法	<ul style="list-style-type: none"> ● 資料探勘 ● 財務工程、金融市場分析、股價預估、...等 ● 影像處理，包含：壓縮、辨識、...等 ● 彈性製造系統 (Flexible management systems)
生態類型	生態地理優化法 (BBO)	<ul style="list-style-type: none"> ● 空氣流體力學 ● 系統模擬與目標識別系統 ● 決策支援與規劃

資料來源：本研究彙整

六、啟發式演算法

啟發式演算法(Metaheuristic)或稱為萬用演算法，發展至今已有不同學者提出許多概念不盡相同的方法，用以解決各種最佳化問題。Boussaïd, Lepagnot 與 Siarry (2013) 將啟發式演算法歸納為單行解啟發式演算法 (Single-solution based metaheuristics) 與族群式啟發式演算法 (Population-based metaheuristics) 二大類型，其中單行解啟發式演算法包含：禁忌搜尋法 (Tabu Search, TS)、模擬退火法 (Simulated Annealing algorithm, SA)、變動鄰域搜尋法 (Variable neighborhood search)、GRASP method、引導式本地搜尋法 (Guided local search) 與迭代搜尋法 (Iterated local

search)；而族群式啟發式演算法則又可分為三種類型：第一種為演化型演算法 (Evolutionary Computation, EC)，包含：基因演算法、演化策略法 (Evolution Strategy, ES) 及演化規劃法 (Evolutionary Programming, EP)，第二種類型為群體智能演算法 (Swarm Intelligence, SI)，包含：螞蟻演算法 (ACO)、粒子群最佳化 (PSO)、蜂群最佳化演算法 (Bee colony optimization-based algorithms) 與人工免疫系統演算法 (Artificial immune systems) 等等，第三種類型為生態類型 (Ecology)，如：生態地理優化法 (Biogeography-Based Optimization, BBO)。此外，本篇研究也指出單行解啟發式演算通常具有集中搜尋 (Exploitation-oriented) 的能力，可應用在特定區域進行細步搜尋，而群體智能演算法則具備較佳的探索搜尋 (Exploration-oriented) 的能力，適合應用在廣域的搜尋上。

啟發式演算法已被應用在很多最佳化問題上，且在很多應用領域上被驗證表現良好，Blum, Puchinger, Raidl 與 Roli, (2011) 也指出最新的研究的重點已從以演算法本身開始轉變為以問題為中心，用以找到解決問題的最佳可能方法而非提昇某種演算法本身。本研究摘要主要的啟發式演算法與應用領域於表 5 之中；但由於每一種啟發式演算法的執行結果都會受限於其參數的調校，因此本研究將擇一演算法來進行模擬，實現頻譜競標的預測模型。

參、影響頻譜投標的要素

各個頻譜有不同的使用特性及建設成本，因此在決定頻道需求與各頻段投標金額時，電信公司將會考量以下相關營運數據、網路涵蓋與建設成本要素：

一、電信業者的營業狀況

電信業者的營業狀況通常以用戶數及每用戶平均貢獻收入 (Average Revenue Per User, ARPU) 來衡量；同時國內業者的用戶數及 ARPU 資訊亦可由國家通訊傳播委員會公開資訊中取得。

表 6 2019 年國內行動通訊市場統計資訊

業者	目前用戶數	平均貢獻收入(元)
1	10,649,000	477.2
2	7,127,000	464.5
3	7,093,000	482.9
4	2,300,000	391.4
5	2,040,000	314.1

資料來源：國家通訊傳播委員會

二、電信業者投資能力

電信事業是一個長期經營的事業，包含：投資金額鉅大，建設全國行動網路基地台的時間長，而且投資回收時間更久，以台灣電信公司得標的無線電頻道具有 15 年的使用權，業者通常會規劃 2~3 年的建設期，再加上 1~3 年的用戶爭取時間，因此，一個新的行動通訊服務，其有效收益約當是十年的用戶數與 ARPU 的乘積。

隨著用戶不斷提升頻寬需求，電信公司因應網路建設與頻寬擴增產生費用可以分為 2 大類：網路建設成本(Capital Expenditures, CAPEX)，以及電信營運費用(Operating Expense, OPEX)。

張智為(2016) 先前研究以 10 年電信總成本來評估，其中國內業者的 CAPEX 約占 20% ~ 25%，OPEX 將約占 75%~80%，針對未來可投資於新行動通訊系統的建設費用，本研究將以總營收金額可分配於 CAPEX 的比例來推估。

三、網路建設成本(Capital Expenditures, CAPEX)

行動電信公司的 CAPEX 主要分為 2 大部份，一為取得使用無線電頻道的費用，亦即是頻譜競標的標金，另一項目則是網路服務所需要的基地台(Base Station, BTS) 的建設成本，其中基地台的建設成本又可以分為兩類：一則為全新的基地台的建設類型，一則為共頻基地台 (Co-channel BTS, Co-BTS) 的建設類型，相同頻段的共頻基地台設備因為可共用相同的無線電發射機、天線及基礎設施，因此建設成本將較全新的基地台更為經濟。

(一)全新的基地台：

必須建置所有的基礎設施與完整的基地台設備。

(二)共頻的基地台：

每個頻段第 1 個頻道以後的基地台設備，將可使用相同的無線電發射機、天線及基礎設施，因此建設成本將較全新的基地台更為經濟。

四、基地台的服務涵蓋率需求

不同的無線電頻段會有不同的電波衰減率，低頻訊號衰減率較低，不但可以傳送較遠，並且具有較佳的室內訊號穿透率；而高頻訊號衰減率較高因此傳送距離短，同時室內訊號穿透率亦較低。

使用較高頻段的電信公司，必須建設更多的基地台，才能達到與低頻波段相同的網路涵蓋區域，因此基地台的建設數量與成本將會較高。

然而高頻訊號雖然衰減率大，但也相對較少干擾問題，因此電信公司會考量將高頻基地台建置在用戶密集區域，以縮短各基地台的服務距離，並因增加基地台數量而提升系統服務容量；而將低頻基地台建設在郊外開擴地形區域，可以加大基地台的服務範圍，增加網路服務的涵蓋區域(如圖 1)。

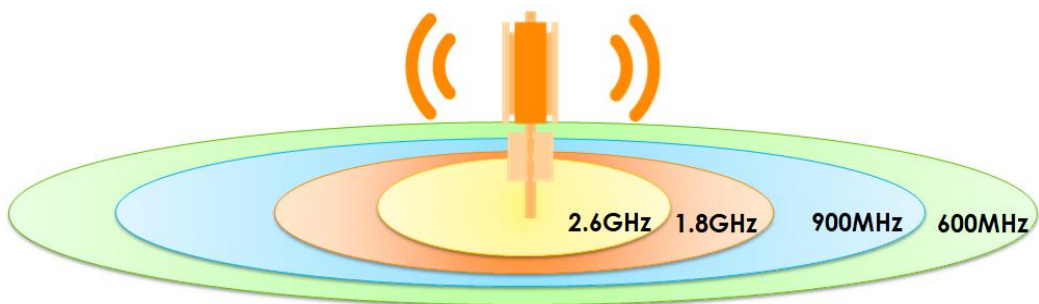


圖 1 不同頻率的無線電波涵蓋示意圖

資料來源：本研究繪製

肆、5G 頻譜競標模擬

一、研究架構

綜整前述頻譜競標的主要影響要素，本研究將從「開放競標頻道」、「競標者的投資能力」、「網路建設成本」以及「競標者的頻道需求」共四個面向來進行頻譜競標模擬，最後並產出各開放競標頻道的得標者與決標金額(如圖 2)。

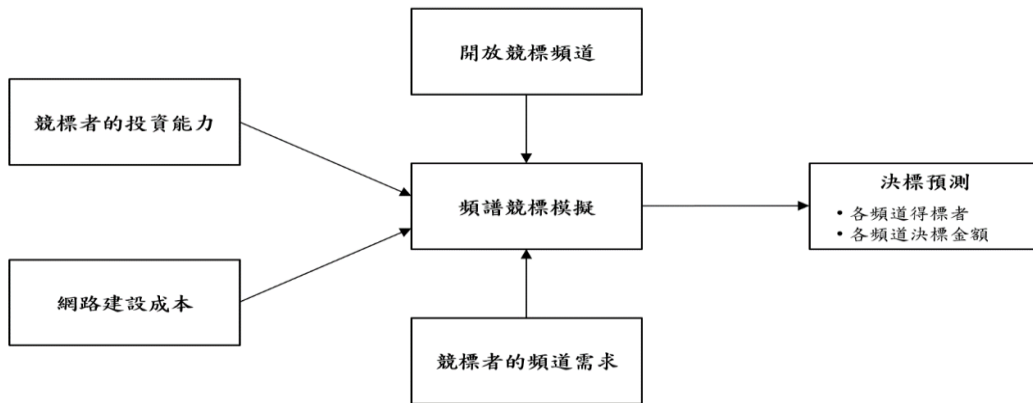


圖 2 本研究架構圖

二、頻譜競標目標與限制

我們將 5G 頻譜競標將定義了以下的目標函數與限制函數：

(一) 目標函數為政府的總標金收入

$$\text{Max}\left\{\sum_{i=1}^n \text{Band Price}\right\}$$

政府標金總收入代表最後競標結果各頻道得標金額的加總。

(二) 限制函數為各競價公司的頻譜投資成本

$$\text{Min}\left\{\sum_k^n \text{Band Price} + \text{Equipment}\right\}$$

$\text{Equipment} = \text{BTS cost} \times \text{number of Band} + \text{Co-BTS cost} \times \text{number of co-channel}$

各競價公司的頻譜投資成本預期應該小於該公司的 CAPEX 建設計畫，其最大 CAPEX 額度將以預期十年的總營收 \times 可投資的比例，其中三大電信公司的預設 CAPEX 比例將以依先前研究之結果 25% 十年總電信營收來估計，另外由於首次 5G 頻譜釋照將開放主要的低頻段頻道，在有限的物理資源條件下，部份業者預期將

會增加投資金額用以競取更多的服務頻道，因此本研究將假設第 2 種模擬條件，部份業者將提高 CAPEX 投資比例來模擬溢價競標的狀況。

再者，各公司的頻譜投資成本應包含所有得標頻道的標金總和與設備建設成本，其中設備建設成本又包括各頻段的第一套基地台 (BTS) 設備建設費用與其他頻道的共頻基地台 (Co-BTS) 設備建設費用。

三、實驗設計

參考國家通訊傳播委員會所公佈的行動通訊市場統計資訊參如表 6，以目前國內各電信公司既有服務用戶數為基準，預先假設各電信公司未來 5G 系統預計服務用戶數以及最少的需求無線電頻道數，請參如表 7，預先假設各競標公司累計需求為 31 個 10MHz 頻道，設定各競價公司的頻譜投資成本，再各進行模擬一千次投標作業，最後依不同假設條件分析模擬的結果。

表 7 各競價業者預估需求頻道數

業者	需求頻道	預計服務用戶數
1	9	10,000,000
2	8	7,000,000
3	8	7,000,000
4	3	2,500,000
5	3	2,500,000

本研究於審稿與修改期間，國家通訊傳播委員會已經公告首次 5G 頻譜競標的頻段、頻道與底價，因此本研究將以模擬結果來驗證競標的狀態，確認此方法具有模擬效用。此外，一個全新的高速行動通訊服務，必須至少要有 2 個 10MHz 以上的無線電頻道以提供足夠的上網服務頻寬，同時為了提供完整的通訊涵蓋區域，電信服務公司也需建置至少涵蓋 90% 以上人口區域的基地台數量，綜整相關資訊如表 8 所示。

又因各頻段的無線電波會有不同的訊號衰減率，由於 5GHz 以上之頻段不易建立全域性的網路服務涵蓋能力，因此本研究將以台灣野村總研諮詢顧問股份有限公司(2017)的頻譜供應規劃與政策規範研究，以及交通部(2018)的頻率供應計畫為

基礎，由此 28GHz 訊號涵蓋限制與開放頻寬太多，預期高頻段將不會有太多競爭，因此本研究規劃著重在 5GHz 以下的之低頻段進行投標模擬。

表 8 競標頻段基本資訊

競標頻段	開放頻寬	起標金額(百萬元)	基地台需求數量
1.8GHz	20MHz	3,300	8,000
3.5GHz	270MHz	900	9,000
28GHz	2500MHz	100	5,000 (只能區域涵蓋)

四、模擬投標作業

Gogna 與 Tayalb(2013)指出可以應用模擬退火演算法(Simulated Annealing algorithm, SA)處理行動網路設計與頻道指派問題；基於 SA 演算法在隨機機率小於冷卻因素(Cooling Factor)時，可接受劣於現有解之鄰近解，以便於搜尋過程中能夠跳出局部最佳解的特性。運用其可接受劣於現有解的機制，本研究將用以模擬非理性的投標行為或本研究未考量到的競標變因，用以產生其他更多的可能競標組合結果。

本研究將使用 SA 演算法模擬各競價業者的投標作業，在每輪競標中每個欲取得的頻道都必須增加 1% 標金，同時每一輪各業者需確定其總頻譜投資成本必須小於 CAPEX 建設成本規劃，才能競標新的頻道，除非隨機機率小於冷卻因素(Cooling Factor)，即為當隨機亂數 $\text{rand} < \exp(-\Delta t' / T)$ 時，將可接受增購一個頻道或 CAPEX 超過預算的競標組合。

由於頻譜競標通常不能確定幾個回合會結束，因此，本研究投標作業模擬將修改 SA 模擬退火演算法由降溫的方式，改為 t 是遞增的數值，以 t 代表競標作業的回合數，而 T 的函數將設計為：

$$T = 1/\log(t)$$

SA 冷卻因素機率設計為：

$$\text{Cooling.Factor} = \exp(-\Delta t/T)$$

Δt 代表競標頻道的標金增幅為：

$$\Delta t = (\text{New price} / \text{Start price}) - 1$$

頻譜競標模擬投標演算法說明如下：

首先建立 `bitamount()` 程式用以計算目標函數的總標金數值，接者先設定模擬投標作業的初始參數值，包含：開放頻道數量、各頻道底價、各競價公司的相關參數，含：需求頻道數、用戶數、平均月收益等。

之後開始進行一千次的投標模擬，每一次的模擬都先隨機產生第一組解，再來進行每一回合的競價作業，使用 5 次迴圈來模擬業者 1 至業者 5 每一輪的各別競價作業；在每一輪的競價作業中，先隨機找到一個可以下標的新頻道，計算此頻道的新標金，並且計算此業者標入此頻道衍生的網路建設成本與最後的總投資金額，如果已標得頻道數小於需求頻道，且總投資金額小於 CAPEX 的投資預算，則理性的接受新解將此頻道標下來；否則隨機產生一個亂數，如果比 `Cooling.Factor` 小，則模擬可以非理性的接受新解標下此頻道。此外，當已標得頻道數已大於等於需求頻道時，再隨機找到一組可以交換的競標頻道，計算交換頻道後的總投資費用，評估如果交換此頻道組合的投資成本比原來的競標組合投資成本更低時，則理性的接受此新解交換此組頻道；最後到達終止條件連續 200 代都未有新解時，則中止本次的模擬作業輸出本次決標結果，整個頻譜競標模擬 pseudo code 詳述如下所示(如表 9)：

表 9 5G 頻譜競標模擬的 pseudo code

```
Objective function bitamount () = sum( Band1, ..., Bandn)
Initialize the matrix Band & bidding Company & TotalBand
for( z in 1: 1000)
  Random generate the first round bidding solution
  for( t < Max number of iterations)
    for( co in 1: 5)
      Generate new bidding band number
      Calculate the new band price & New Investment
      Calculate Cooling.Factor = exp(- $\Delta t / \log(t)$ )
      if ( Band.Qty < Min. Demand)
        if( New Investment < CAPEX or Rand < Cooling.Factor)
          Accept the new solutions
        end if
      else
        if( Rand < Cooling.Factor)
          Add the new solutions
        else
          Generate a new switching band solution
          if( New solution is better)
            Accept the new solutions
          end if
        end for ( co )
      end for ( stop condition)
    end for ( z )
```

資料來源:本研究設計

五、設定模擬的初始值

(一) 頻譜資源 (及資料格式)

在頻譜競標的模擬程式中，我們必須建立一個頻譜資源資料表參如表 10，主要用以記錄各競標頻道目前的暫時標金、得標公司，並附記頻段與類型。

表 10 競標頻譜資料表

投標頻道	B1	B2	B3	B4	...	B29
得標金額(百萬元)	1000	1000	1000	1000		3300
得標電信公司						
頻段 (MHz)	3500	3500	3500	3500		1800

(二) 公司基本參數 (及資料格式)

依各電信公司服務用戶數，預先假設各需求的最少頻道數及 CAPEX 可投資於新的頻譜建設比例(如表 11)。

表 11 競標業者的投資能力資料表

Company (電信公司)	1	2	3	4	5
User (用戶數 K)	10,649	7,127	7,093	2,350	2,030
ARPU (用戶平均貢獻)	477.2	464.5	482.9	391.4	314.1
Demand CH. (需求頻道)	9	8	8	3	3
CAPEX Ratio (投資比例)	25%	25%	25%	25%	25%

(三) SA 參數及程式參數

Cooling.Factor = $\exp(-\Delta t/0.5T)$

SA 冷卻因素調整增加接受劣解機率

iters = 3000

#設定迭代 (代表最多的競標回合數)

cnt = 200

#設定終止條件，連續 cnt 個新解都沒有改變時終止本次競標

#使用 Switch 方式來更換各頻段暫時得標公司

伍、模擬結果

台灣首次 5G 頻譜競標共開放 29 個 10MHz 低頻段頻道，以下將假設研究模擬業者在不同網路投資比例條件下的競爭結果與態勢，第一種為假設各競標業者都使用相同的 CAPEX 投資比例，第二種則是模擬不同業者會增加投資比例來溢價競標，研究模擬結果說明如下。

一、相同投資比例模擬

各競價業者皆採用 25% 的總和營收當作 CAPEX 的條件下進行競標模擬，最後競標結果的總標金分佈狀態參如圖 5-1，其平均與不同分位數的總標金匯整如表 12 所示，預估當各業者採用相同的 CAPEX 投資比例時，總標金將介於 717.41 至 906.88 億元之間，平均總標金將為 805.33 億元。

參如表 13 顯示模擬各競價業者最後可以標得的頻道數量與決標金額。預估業者 1 有 54% 的機會標得 8 個以上的頻道，業者 2 與業者 3 分別有 87% 及 88% 的機會標得 6 個以上的頻道，而業者 4 與業者 5 分別有 86% 與 87% 的機會可以標得 3 個以上頻道。代表所有業者都有很高的機會取得基本的頻道數量來建立 5G 通訊的基礎服務。

二、溢價競標模擬

由於 5GHz 以下的主要 5G 服務頻段可開放的頻道數相當有限，本研究將再模擬部份業者提高 CAPEX 投資比例，進行溢價競標以爭取更多的無線電頻道，用以建置更高速的 5G 服務網路系統。假設業者 1、業者 3 及業者 4 分別將 CAPEX 投資比例提高至 30%、30% 與 40%，最後溢價競標的模擬如下。

最後競標結果的總標金分佈狀態參如圖 4，其平均與不同分位數的總標金匯整如表 14 所示，預估在部份業者溢價競標的條件下，總標金將介於 1092.36 至 1669.90 億元之間，平均總標金將高達 1395.13 億元。

參如表 15 顯示各競價業者最後可以標得的頻道數量與決標金額。預估業者 1 有百分之百的機會標得 9 個以上的目標頻道，業者 2 也有 100% 的機會標得 6 個以上的頻道，業者 3 將有 98% 的機會標得 8 個以上的頻道，而業者 4 將 30% 的機會可

以標得 4 個頻道，以 79% 的機會可以 3 個以上頻道。而業者 5 只 13% 的機會標得 2 個頻道，有 87% 的機會是無法取得任何 5GHz 以下的頻道。

在溢價競標的模擬狀況下，顯示各業者的頻譜競標更加激烈，並且將總標金推到比相同 CAPEX 投資比例更高的標金，而且也將造成投資金額最少的業者 5 有 87% 很高的機會將無法取得 5G 的 2 個基本服務頻道。

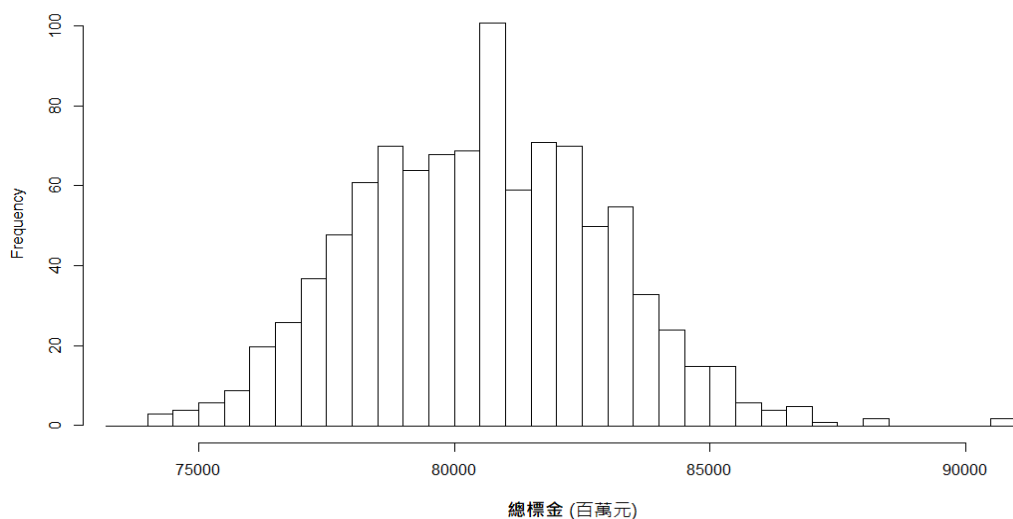


圖 3 各競價公司採用相同投資比例條件下的競標總標金模擬結果分佈圖

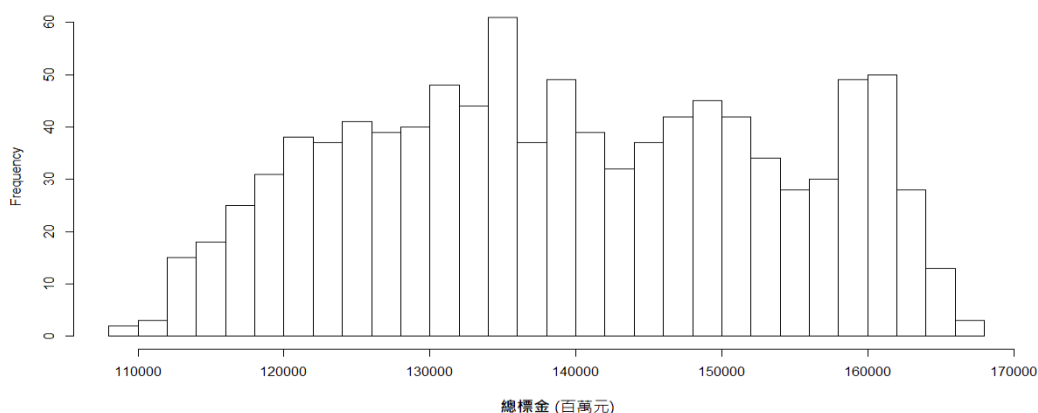


圖 4 在溢價競標條件下的總標金模擬結果分佈圖

表 12 總標金的競標模擬結果

(單位：百萬元)

平均總標金	最少總標金	10分位總標金	25分位總標金	50分位總標金	75分位總標金	90分位總標金	最大總標金
80,533	71,741	77,400	78,804	80,568	82,219	83,573	90,668

表 13 各業者取得競標頻道數量與金額的模擬結果

(金額單位：百萬元)

業者 1	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	6	6	7	8	8	9	10
決標金額	16,690	18,326	20,707	22,924	24,090	25,164	33,580

業者 2	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	5	5	6	7	7	8	8
決標金額	13,285	15,383	17,804	20,356	21,311	23,449	25,531

業者 3	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	5	5	6	7	7	8	8
決標金額	13,997	15,409	17,792	20,234	21,245	22,820	26,115

業者 4	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	2	2	3	3	4	4	4
決標金額	5,527	6,044	8,678	9,013	11,483	12,102	12,858

業者 5	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	2	2	3	3	4	4	4
決標金額	5,593	6,072	8,703	9,026	11,637	12,147	13,099

三、競標模擬分析

台灣首次 5G 頻譜競標以總標金以 1421.91 億元結束，其中 5GHz 以下的黃金頻段決標金額高達 1405.43 億元，各競價公司標得的 5GHz 以下之頻道數與決標金額摘要如表 16。

表 14 溢價競標的總標金模擬結果

(單位：百萬元)

平均總標金	最少總標金	10分位總標金	25分位總標金	50分位總標金	75分位總標金	90分位總標金	最大總標金
139,513	109,236	120,367	128,237	138,636	151,319	159,776	166,997

表 15 各業者在溢價競標模擬的取得頻道數量與金額

(金額單位：百萬元)

業者 1	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	9	9	9	9	9	9	10
決標金額	36,412	40,127	42,752	46,235	50,916	53,776	61,850

業者 2	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	6	6	6	7	7	7	8
決標金額	24,330	28,806	31,172	33,843	35,981	38,644	45,604

業者 3	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	7	8	8	8	8	8	9
決標金額	31,230	35,676	38,090	41,235	45,030	47,570	55,118

業者 4	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	2	2	3	3	4	4	4
決標金額	8,344	10,363	13,185	15,402	18,528	22,833	24,643

業者 5	最小值	10分位	25分位	50分位	75分位	90分位	最大值
標得頻道數	0	0	0	0	0	2	2
決標金額	0	0	0	0	0	9,598	12,365

備註：業者 5 有 87% 機率標不到 5GHz 以下頻道。

在前述 2 種假設模擬條件下，雖然第一種採用相同投資比例的模式，模擬總決標金與實際決標金額仍有一段落差，但也顯示出在此種條件下，最後的總標金也將高達 717 至 906 億元之間，模擬的總決標金額將比底價高出 257% 至 325%，可以預期決標金額將高於國家通訊傳播委員會設定的 440 億元，以及市場預期的 600 億元。其次在第二種假設條件下，模擬業者 1、業者 3 和業者 4 願意增加 CAPEX 投

資比例的模式，不但可以模擬出涵蓋最終競標結果的解，而且總標金落在 54 百分位數的位置，以及業者 1、3、4 和 5 的得標頻道數皆落在模擬的中位數上，且業者 2 的得標頻道數也落在 46 百分位數上也相當接近中位數，代表此假設的模型非常符合實際的競標結果。此點也說明在有限的開放競標頻道下，部份業者將增加投資金額來取得更多的服務頻道，期望建立更好的服務競爭優勢。

表 16 首次 5G 頻譜競標的決標頻道數量與得標金額

(決標金額單位：百萬元)

	業者 1	業者 2	業者 3	業者 4	業者 5	總和
標得頻道數	9	6	8	4	0	27
決標金額	47,755	30,450	42,630	19,708	0	140,543
模擬頻道百分位數	0~93	0~46	2~94	70~100	0~87	0~100
模擬金額百分位數	58	20	59	79	0~87	54

陸、結論

過去一直未有良好的模型可以用來評估無線電頻譜競標結果，本研究成功的建立頻譜競標的預測模型，並且模擬出台灣 5G 首次頻譜競標的結果；在此模型之下，研究人員可以設定開放各競標的頻段、頻道與底價，以及設定競價公司數量和基本營業資訊，並可藉由假設不同的競標條件，包含：競價公司需求頻道數量、CAPEX 投資比例以及網路涵蓋需求基地台數量等要素，即可模擬產出最終各競價公司在各頻段的得標數量與決標金額，可供研究學者和競標業者事前評估，研擬新服務的投入策略及網路規劃，也可以協助政府分析競標者的競爭狀況與可能的競標結果分佈樣態，進而擬訂後續的無線電頻譜策略，制訂符合產業發展需要的頻譜競標規範。

一、研究貢獻

無線電頻譜費用已成為行動電信業者的一大經營負擔，如何評估頻譜競標是一個很重要的議題，但是至今仍未有一個良好的方法可以用來評估無線電頻譜競標結果；本研究成功建立頻譜競標的預測模型，建立 4 大頻譜競標的影響面向，可以針對不同競標狀況進行結果預測分佈，針對擬訂新行動服務的於企業策略將有

很大的助益；並且本模型成功模擬出台灣 5G 首次頻譜競標的結果，確認其模型的有效性。

二、研究限制與討論

如同先前研究沒有豐富的頻譜競標數據資料可供量化研究分析，目前在台灣也僅有一組 5G 頻譜競標結果可供研究，因此，未來運用此模型進行模擬時，仍需在演算法上的參數進行調校，用以減少可能產生的模擬結果誤差。此外，本研究先假設各業者採用相同的網路建設涵蓋率，後續學者運用此模型時，也可以假設各業者採用不同的基地台建設數量，進而模擬不同的運用情境與策略研擬。

三、未來研究建議

發展中的 5G 將會大量應用到 5GHz 以上的高頻的頻譜，但高頻段的電波涵蓋距離非常合短，有效距離可能在 100 公尺以內，非常不易建立全域的通訊涵蓋能力；在台灣嚴重的住戶抗爭基地台建設情況下，高頻的頻譜並無法建立完整的 5G 通訊涵蓋範圍，而且本次開放的 28GHz 頻道非常充足，因此未列入本研究模擬中。未來學者可以針對高頻段之頻譜的使用模式進行相關研究及建立競標模型。

參考文獻

- 台灣野村總研諮詢顧問股份有限公司，(2017)。106 年度「頻譜供應規劃與政策規範研究」研究報告。
- 交通部，(2018)。頻率供應計畫(107)。
- 張智為，((2016)。行動通訊網路系統共享之研究－以無線基地台設施為例，國立政治大學經營管理學程未出版碩士論文。
- 國家通訊傳播委員會，(2017)。106 年開放申請之行動寬頻業務競價作業各得標者名，單、得標標的及其得標金公告。
- 國家通訊傳播委員會，(2021)。行動寬頻業務 5G 釋照電子式競價系統，擷取自 <https://mbb5g.ncc.gov.tw/>
- 國家通訊傳播委員會，(2018)。2018 年第 3 季行動通訊市場統計資訊。
- 國家通訊傳播委員會，(2019)。2018 年第 4 季行動通訊市場統計資訊。
- 國家通訊傳播委員會，(2020)。2019 年第 4 季行動通訊市場統計資訊。
- 國家通訊傳播委員會，(2021)。公告 108 年開放申請經營行動寬頻業務競價作業各得標者名單、得標標的及其得標金，擷取自 https://www.ncc.gov.tw/chinese/news_detail.aspx?site_content_sn=519&sn_f=42756。
- 葉子平，(2018)。4G 頻譜拍賣與次級交易市場制度之研究－以臺灣為例，世新大學法律學研究所未出版碩士論文。
- Adomavicius, G., Gupta, A., & Yang, M. (2018). Designing real-time feedback for bidders in homogeneous-item continuous combinatorial auctions. *MIS Quarterly*, Forthcoming, 19-3.
- Anumandla, K. K., Kudikala, S., Venkata, B. A., & Sabat, S. L. (2013). *Spectrum allocation in cognitive radio networks using firefly algorithm*. Paper presented at the International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing (SEMCCO 2013), Chennai, India, December 19-21, pp.366-376.
- Bichler, M., Goeree, J., Mayer, S., & Shabalin, P. (2014). Spectrum auction design: Simple auctions for complex sales. *Telecommunications Policy*, vol. 38(7), pp.613-622.

- Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G. R., & Roli, A. (2011). Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. *Applied Soft Computing*, 11(6), 4135-4151. December 19-21, pp. 366-376.
- Boussaïd I., Lepagnot J., & Siarry P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237, pp.82-117.
- Gogna A., & Tayalb A. (2013). Metaheuristics: review and application, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 25, No. 4, pp.503-526.
- Jain, R., & Dara, R. 2017. Framework for evolving spectrum management regimes: Lessons from India. *Telecommunications Policy*, vol. 41, Issue 5-6, pp. 473-485.
- Paul, A., Maitra, M., Mandal, S., Sadhukhan, S. K., & Saha, D. (2011). *A metaheuristic based fair dynamic spectrum allocation policy*. Paper presented at the 2011 Fifth IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks (ANTS), December 18-21.
- Weiss, M., Lubin, B., & Seuken, S. (2017). *SATS: A universal spectrum auction test suite*. Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS), São Paulo, Brazil

關於作者

Chih-Wei Chang received his B.S. degree from Soochow University, Taiwan, in 1994 and his M.S. degree from the University of South Australia, Australia, in 2006. From 1995 to 2016, he worked as a system integrator, telecom operator and network vendor where he acquired considerable experience in the telecommunications and network integration fields. Since 2016, he has been a technical director at Zyxel Communication. At present, he is a Ph.D. candidate at the Department of Management Information Systems, National Chengchi University. His research interests are in computer networking, IoT, and cybersecurity.

附錄一、5G 行動寬頻業務競價作業決標結果

國家通訊傳播委員會於 2021 年 2 月 21 日公告辦理 108 年行動寬頻(5G)業務釋照作業競價作業結果，本案於 108 年 11 月 27 日公告第一階段通過資格審查競價者名單；第二階段頻道數量競價作業於 108 年 12 月 10 日開始舉行，並於 109 年 1 月 16 日競價結束，歷經 27 天、總計 261 回合的競價程序、決標金額達新臺幣 1380.81 億元。並於 2 月 21 日辦理頻道位置競價作業，決定各得標者之得標標的，決標金額達新臺幣 41.1 億元，合計最後 5G 首次頻譜競標總決標金額達到 1421.91 億元。其中 3.5GHz 黃金頻段的競價金高達 1364.33 億元，合計頻道位置競價使得總標金更高達 1405.43 億元，決標金額高居世界第三名，各競價者得標明細請參如下表。

表 17 各得標者名單、得標標的及其得標金

得標者名單	得標標的	得標金
中華電信股份有限公司	3500MHz 頻段: F13~F21 (3420MHz~3510MHz)	新臺幣483億7,300萬元
	28000MHz 頻段: G10~G15 (27900MHz~28500MHz)	
台灣大哥大股份有限公司	3500MHz 頻段: F22~F27 (3510MHz~3570MHz)	新臺幣306億5,600萬元
	28000MHz 頻段: G24~G25 (29300MHz~29500MHz)	
台灣之星電信股份有限公司	3500MHz 頻段: F1~F4(3300MHz~3340MHz)	新臺幣197億800萬元
亞太電信股份有限公司	28000MHz 頻段: G20~G23 (28900MHz~29300MHz)	新臺幣4億1,200萬元
遠傳電信股份有限公司	3500MHz 頻段: F5~F12 (3340MHz~3420MHz)	新臺幣430億4,200萬元
	28000MHz 頻段: G16~G19 (28500MHz~28900MHz)	

資料來源：國家通訊傳播委員

https://www.ncc.gov.tw/chinese/news_detail.aspx?site_content_sn=519&sn_f=42756
<https://mbb5g.ncc.gov.tw/>

