

在感知無線電網路植基於 QoS 選擇機制之頻譜交易

*陳偉業¹、黃淑玲²、曾郁庭¹

¹南臺科技大學資訊管理系

²南臺科技大學休閒事業管理系

*cwywy@stust.edu.tw

摘要

在感知無線電網路的研究大都聚焦於技術方面議題，較少有研究探討頻譜交易議題。本論文提出一個在感知無線電網路植基於非授權使用者之服務品質(quality of service, QoS)需求匹配與差別定價(Matching requirements and Differential pricing)資源選擇機制，稱為 Q-MD 選擇機制。探討隨機選擇、優化非授權使用者之選擇機制與 Q-MD 選擇等三種選擇機制，在不同情況下執行頻譜交易所帶來的總收益與非授權使用者之符合度 (coincidence)。模擬結果顯示，當頻譜資源數少於非授權使用者人數時，Q-MD 選擇機制可取得與跟優化非授權使用者差不多的收益，且滿足非授權使用者 QoS 需求；在頻譜資源數多於非授權使用者人數時，Q-MD 選擇機制的累計收益雖略低於優化非授權使用者之 QoS 選擇機制，但對於不同類型的頻譜資源利用率最理想。

關鍵詞：感知無線電、頻譜交易、頻譜利用率、選擇機制

The Spectrum Trading Based on QoS Selection Mechanism in Cognitive Radio Networks

*Wei-Yeh Chen¹, Shu-Ling Huang², Yu-Ting Tseng¹

¹Department of Information Management, Southern Taiwan University of Science and Technology

²Department of Leisure, Recreation, and Tourism Management, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Most of the previous researches emphasized the technical aspect of spectrum sensing and spectrum sharing. Few researches focused on the economic aspect of spectrum trading. In this paper, we propose a spectrum selection mechanism which is called Q-MD selection mechanism. It is based on non-authorized users' quality of service (QoS), matching requirements and differential pricing. The selection mechanisms discussed in this study include random selection mechanism, optimization of authorized users' selection mechanism and proposed Q-MD selection mechanism. We investigate the cumulative gains and coincidence of spectrum trading execution in different situations. The Q-MD selection mechanism can earn an income similar to optimization of authorized users' selection mechanism, and meet the QoS needs of non-authorized users. When the number of spectrum resources is larger than the number of non-authorized users, the Q-MD selection mechanism has the best spectrum utilization for different types of spectrum resources.

Keywords: Cognitive Radio, Spectrum Trading, Spectrum Utilization, Selection Mechanism.

Received: Feb. 6, 2017; first revised: Jun. 19, 2017; accepted: Jun, 2017.

Corresponding author: W.-Y. Chen, Department of Information Management, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan, Taiwan.

壹、前言

無線通訊技術已從最早的單純語音功能發展到現在豐富的資料訊息、音頻甚至視頻等多媒體功能，都可以透過無線傳輸。手持式設備的普及與行動商務的興起使得相關技術蓬勃發展，無線網路的應用服務越來越豐富多元，導致無線電資源的需求大增而不敷使用，其主要原因則是因為現有的頻譜分配政策的關係(Liang et al., 2011)。傳統頻譜配置方式是以靜態配置，即頻譜資源只有特定的使用者(授權者)才能使用，當使用者沒有在使用時也不能分配給其他未授權的使用者來使用，導致頻譜資源未能有效地被利用(Hyoil et al., 2010)。圖 1 為美國獨立無線電產業企業調查該國 30MHz 至 2900MHz 頻譜利用率分布圖，圖中明顯可見頻譜利用率普遍都不到 20%，只有少數超過 60% (SCC, 2010)。表明無線資源並非不敷使用，而是利用率極度不平均，一些授權頻段時常擁擠，而有些非授權頻段則經常空閒甚至無人使用(Hyoil et al., 2010)。為解決此問題而延伸出感知無線電網路(cognitive radio)技術。

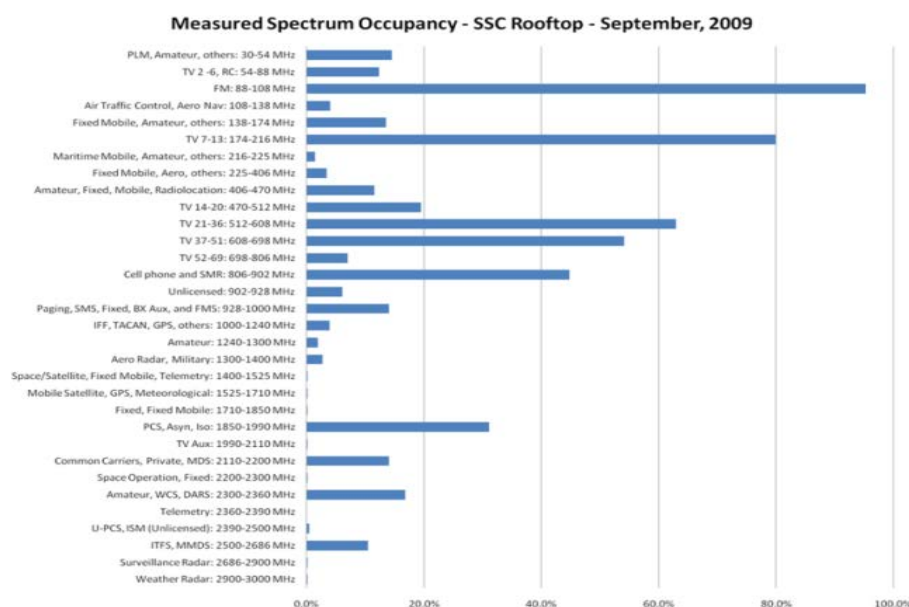


圖 1 30 至 2900MHz 頻譜利用率分布圖

一、研究動機

另外，目前在感知無線電網路的研究大都聚焦於頻譜感測(spectrum sensing)、頻譜分配(radio spectrum allocation)、頻譜移動(spectrum mobility)及頻譜管理(spectrum management)等技術方面議題，對於在經濟方面議題(economic aspect)的頻譜交易較少被討論。相關研究證實市場導向的頻譜交易為實踐此技術的最有效途徑，在市場機制為基礎的理想情況下，授權者藉由租借空頻頻譜資源賺取營業外額外的獲利，能激勵授權者主動釋放多餘資源，且非授權運營商有機會取得部分授權頻段的頻譜使用權，增加整體市場的競爭力、靈活性，改善頻譜利用率(Benmammam et al., 2013)。近年商用頻譜創造的經濟效益顯著，市場導向的頻譜資源管理模式漸漸受到重視，可將頻譜授權者與非授權者視為賣方與買方，透過制定交易機制，能讓賣方獲得比沒有頻譜自由化時更多的收益，而買方能滿足他們對頻譜資源的需求。

過去的研究中，我們利用交易機制來取得頻譜管理的效果，分析英式拍賣、公開申購以及契約等不同競價策略在市場不同供需情況下的頻譜使用率及頻譜收益(Chen, et al., 2013)，並提出一簡易分析模型探討在不同的流量負載情況下對主要系統執行頻譜交易的總收益與頻譜利用率的影響(Chen, et al., 2014)。不過之前的研究對空閒頻譜的定價策略都是採用單一定價，即不考慮頻譜的傳輸品質，空閒頻譜出售的價格都是相同價格。比起一般的統一價格(uniform pricing)，採差別定價(discriminatory pricing)的定價策略能創造更高的總收益(Weber, 2014)。本論文提出一個在感知無線電網路植基於非授權使用者之服務品質

(quality of service, QoS)需求匹配與差別定價(matching requirements and differential pricing)資源選擇機制，稱為 Q-MD 選擇機制，依據授權使用者所提供的頻譜資源與非授權使用者的 QoS 需求做選擇匹配，透過差別定價讓非授權使用者選擇符合自己需求的頻譜資源。對頻譜 QoS 需求較高的非授權使用者支付較高的價錢購買符合其需求的頻譜資源；對頻譜 QoS 需求較低的非授權使用者主動選擇較低的頻譜資源。根據所提出的價格，分配符合的頻譜資源類型給相應需求的非授權使用者，可以提升頻譜市場整體的效益。在頻譜資源的定價上亦結合保險(insurance)的概念(Si et al., 2011)，對於不同風險(傳輸失敗可能的機率)的傳輸情況調整需支付的價格。本論文將探討隨機選擇、優化非授權使用者之選擇機制與所提出的 Q-MD 選擇等三種選擇機制，在不同的頻譜資源數與非授權使用者人數下執行頻譜交易所帶來的累計收益與非授權使用者之符合度(coincidence)。

二、研究限制

目前頻譜資源的配置仍屬於靜態配置，即頻譜擁有者從頻譜管理單位(在台灣為國家通訊委員會，NCC)獲得頻譜資源後，在營運時即使有些頻譜資源的利用率很低甚至是空閒狀況，在法規的限制下，這些未充分利用的頻譜資源不能暫時租借給有需要頻譜資源的使用者(非授權使用者)。本論文假設，頻譜擁有者(授權使用者)可以將空閒的頻譜暫時租借給有需要頻譜資源的使用者(非授權使用者)，當授權使用者有頻譜需求時，非授權使用者須歸還租借來的頻譜資源，即授權使用者有優先權使用自己的頻譜資源。

貳、文獻探討

一、感知無線電

感知無線電(Mitola, 1999)是由學者 Mitola 於 1999 年提出的概念，感知無線電網路中存在兩類使用者，依存取資源權限分別為授權使用者或稱主要使用者(primary user, PU)與非授權使用者或稱次要使用者(secondary user, SU)，兩者能透過(dynamic spectrum access, DSA)共享頻譜資源，是一種擁有能感測周遭環境並自我重置的智慧型無線電(Mitola, 2000)。非授權者必須在不影響授權使用者頻譜資源使用的前提下，才可透過向主要系統租借空閒的頻譜使用，來保障原本的授權使用者優先使用權。基於這樣的觀念，感知無線電被視為提升頻譜利用率的重要技術，利用感知無線電技術能動態地共享頻譜，提升頻譜使用的效率。

二、頻譜交易現況與類型

英國傳播管理局(Office of Communications, Ofcom)於 2005 年公開發布頻譜交易計畫書。從經濟的角度來看，藉由降低對頻譜的管制，取消不必要的監管限制，能鼓勵各界實施高效率的頻譜分配。Ofcom 將頻譜使用權轉移的形式分成兩種(Ofcom, 2011)：頻譜轉讓(Spectrum Transfer)與頻譜租賃(Spectrum Lease)。頻譜轉讓是授權使用者完全放棄其授權牌照或尋求監管機構同意後修改其執照內容去轉移頻譜的使用權。頻譜租賃是直接由授權使用者與非授權使用者進行頻譜交易，能短時間的轉移頻譜使用權，不會影響原本授權牌照的所有權。礙於效率與資源流動性，頻譜租賃對市場的整體效益較佳。因為頻譜租賃的特性，能縮短交易時間、提供客戶更大的選擇空間，促進行動通訊市場競爭，所以本論文採用的是租賃模式，以授權用戶與非授權用戶直接進行頻譜的存取權轉移。

Chen 等學者(Chen, et al., 2013)在研究頻譜交易的不同競價策略，並探討此競價策略在供不應求、供過於求、供求相等所得到的頻譜使用率及收益結果。研究結果顯示英式拍賣雖然使用的競標次數最多但可獲得最高的頻譜利益；公開申購策略對於短期的頻譜使用率為最好；契約策略所使用的競標次數最少且對於長期的頻譜使用率為最好。Chen 等學者(Chen, et al., 2014) 透過二維馬可夫鏈(two-dimensional Markov chain)分析模型探討感知無線電網路在不同的流量負載情況下對主要系統執行頻譜交易的總收益與頻譜利用率的影響，並討論預留通道機制對系統的收益及頻譜利用率的影響。

三、頻譜轉讓相關議題

Ji 等學者(Ji & Liu, 2008)探討市場中有多位頻譜擁有者與多位非授權使用者的多層模式中使用抵抗共謀價格的頻譜配置，透過底價分佈式的動態定價來抵制自私用戶的共謀行為，加強市場之穩定性以達到最佳的頻譜利用率。Caicedo 等學者(Caicedo & Weiss, 2011)提及頻譜交易市場由頻譜授權使用者、頻譜授權需求者、頻譜調整者、市場製造者、頻譜交換這五個參與頻譜交易的群體所組成。Alptekin 等學者(Alptekin & Bener, 2009)提出了一個基於遊戲理論的定價模型，利用非博弈均衡的方式取得授權使用者與非授權使用者之間的買賣價平衡，達到最大利潤和高水平的顧客滿意度。Abji 等學者(Abji and Leon-Garcia, 2011)以基於拍賣的服務供應商頻譜交易法，讓服務供應商在頻譜市場中買賣並同時與客戶競爭相同資源池(Pool)，利用強化學習方案應用在客戶節點與服務供應商於市場上的動態管理，分析了四種不同彈性的頻譜管理環境，證實頻譜分配是有效且公平的，對於不同大小的客戶和服務供應商皆受益，顯著增加頻譜的利用率。

四、頻譜租賃相關議題

Jin 等學者(Jin et al., 2012)認為各個用戶的需求喜好不同，所以全部用戶都選擇最佳 QoS 項目，但這是不必要的。主要是計算用戶的使用偏好並且確保資源不被浪費也讓使用者可以獲得他們所需的服務，依照 QoS 不同需求配對適合的頻譜，而不是所有非授權者盲目選擇 QoS 最高的頻譜。Yi 等學者(Yi et al., 2012)考慮一個 FSP(femtocell service provider)與 MSP(macroc cell service provider)組成的頻譜共享市場，透過 Stackelberg 博弈取得價格平衡來模擬無政府的狀態，研究結果顯示透過混和存取的模式，能使買賣雙方透過頻譜交易獲得更大的利益。Jin 等學者(Jin, Sun, Wang, & Zhang., 2012)在頻譜交易中融入保險(insurance)概念，即使在過低的訊號雜訊比(SNR)導致傳送失敗情況下仍然能獲得使用頻譜的機會增加系統頻譜效率。Xu 等學者(Xu et al., 2010)以每個使用者皆可當作買賣方的基礎下，在二級市場中提出一個動態雙向拍賣的交易模式，模擬股票市場的動態定價動態結合多通道與多用戶，實踐頻譜利用率最大化的目標。

參、研究方法

一、頻譜交易系統環境

在本論文中，感知無線電網路環境為：

- (一)授權使用者：能辨識非授權使用者的身分，當非授權使用者選擇資源時，能取得其相關資訊，計算頻譜資源售價回傳給非授權使用者。
- (二)非授權使用者：每個非授權使用者皆具備本身辨識(ID)並能提供該頻譜資源的 QoS 需求值給授權使用者，且市場上非授權使用者對頻譜資源 QoS 需求高與 QoS 需求低的人數是平均的。

表 1 為本論文中所使用到的符號說明，後面章節將會詳細介紹。論文考慮有損通道(channel impairment)的情況對頻譜交易的影響，使用兩狀態馬可夫鏈(two-state markov chain)來塑模(model)訊號在通道內的減損情況(天氣或其他的訊號干擾的影響)。如圖 2 所示， P_a 和 P_b 分別表示通道良好與通道不良的狀態機率，而且 $P_a + P_b = 1$ 。假設 α 代表由良好的狀態 0 轉換成不良的狀態 1 的轉換機率， β 為由不良的狀態 1 轉換成良好的狀態 0 的轉換機率，因此可得在傳輸品質不良的狀態的機率為 $\alpha/(\alpha+\beta)$ 。假設傳輸的數據在通道良好狀態下不會有傳輸失敗的狀況發生，而在通道不好的情況下，可以因為使用不同的調變及編碼方法(modulation and coding scheme)，即使在環境惡劣的情況下還是會有一些機率傳輸成功。所以在通道狀態不好的情況下，傳輸成功的機率為 $(1-b) \times 100\%$ ，其中 b 為在通道不好狀態下傳輸失敗的比率。當 $b=1$ 時，所有的傳輸都會失敗。

兩個狀態的轉換機率分別為：

$$P_g = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \quad \text{and} \quad P_b = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \tag{1}$$

表 1 符號表示表

符號	說明	符號	說明
PU_i	第 i 個授權使用者	T	SU 選擇執行頻譜交易時, PU 系統的服 務時段
SU_j	第 j 個非授權使用者	H	服務的時段為尖峰時段
$Q1$	PU 所提供品質較佳之空閒頻譜資 源類型	L	服務的時段為非尖峰時段
$Q2$	PU 所提供品質較差之空閒頻譜資 源類型	n	當 $T=H$ 時 SU 選擇 $Q1$ 類型的個數
$P1$	$Q1$ 類型頻譜資源價格	m	當 $T=H$ 時 SU 選擇 $Q2$ 類型的個數
$P2$	$Q2$ 類型頻譜資源價格	t	尖峰時段的頻譜售價加權值
qos	SU 之 QoS 需求值	c_0	頻譜使用權轉移時所消耗的成本
N	PU 擁有的 $Q1$ 類型頻譜數量	c_f	傳輸失敗時增加的成本
M	PU 擁有的 $Q2$ 類型頻譜數量	$COST$	總消耗成本
N_s	$Q1$ 類型完成頻譜交易的數量	$coincidence$	SU 獲取資源符合其需求的比率
M_s	$Q2$ 類型完成頻譜交易的數量	$SU_{coincidence}$	取得符合 QoS 需求值的 SU 數目
P_g	通道良好的狀態機率	SU_{all}	完成頻譜交易的 SU 數目
P_b	通道不良的狀態機率	b	通道不良狀態下傳輸失敗的比率

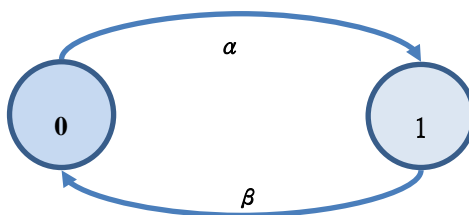


圖 2 兩狀態馬可夫鏈

二、Q-MD 選擇機制

(一)服務品質參數設定

在本論文中授權使用者為頻譜市場上的供應商，可以依據頻譜資源的品質設定其價格，並根據無線環境的特性分成 $Q1$ 和 $Q2$ 的兩種類型。 $Q1$ 類型訊號強，通道的傳輸品質穩定，能提供的 QoS 高，因此定價較高； $Q2$ 類型相對 $Q1$ 類型訊號差，傳輸品質不穩定，提供的 QoS 低，所以給予較低的定價。因考慮有損通道，假設傳輸品質好的 $Q1$ 類型傳輸過程一定會成功，而 $Q2$ 類型傳輸過程中會有失敗的機率發生。非授權使用者之 QoS 需求值參數設定為 $qos \in [0, 1]$ ，介於 0~1 之間，而數值大小為非授權使用者對頻譜資源的 QoS 需求所定，如圖 3 所示，當該 QoS 需求值 ≥ 0.5 時，表示非授權使用者較重視傳輸品質的服務，希望傳輸過程盡可能避免錯誤，在選擇上會要求空閒資源為 $Q1$ 類型頻段，若當下該類型資源皆已有人使用就會放棄不選擇，另尋找鄰近其他擁有該類型的授權使用者空閒頻譜，若無符合則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。QoS 需求值 < 0.5 者則會傾向於選擇 $Q2$ 類型頻段，表示該非授權使用者比起傳輸品質更注重資源的價格高低，當下該類型資源皆已有人使用時，若市場上還有空閒的 $Q1$ 類型資源時則會折衷選取，若無任何可用資源則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。

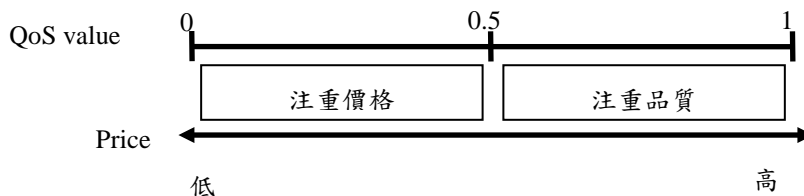


圖 3 QoS 需求值設定

(二) 頻譜資源選擇匹配

頻譜資源的選擇方式主要基於二分匹配圖(bipartite graph)的概念(Jin et al., 2012)。本論文探討三種頻譜資源的選擇方式：隨機選擇機制、優化 SU 之選擇機制以及 Q-MD 選擇機制，說明每個選擇機制選取資源的優先順序，比較選取的結果對於系統的累計收益與非授權使用者取得資源的符合度(coincedence)的情況。在本論文中，非授權使用者取得資源的符合度定義為：

$$coincidence = \frac{SU_{coincidence}}{SU_{all}} \tag{2}$$

其中 $SU_{coincidence}$ 為取得符合 QoS 需求值的 SU 數目， SU_{all} 為完成頻譜交易的 SU 數目。

非授權使用者 SU 若有頻譜需求時，會主動去選擇欲進行頻譜交易的 PU 資源，但頻譜資源選擇會因地理位置因素而無法感測到所有頻譜市場上的資源。例如在圖 4 環境中， SU_1 和 SU_3 在地理位置上能同時感測到 PU_1 和 PU_2 ， SU_2 、 SU_4 和 SU_5 因位置只在 PU_1 能訊號的涵蓋範圍內，因此只能感測到 PU_1 的頻譜資源，而無法感測到 PU_2 的頻譜資源。

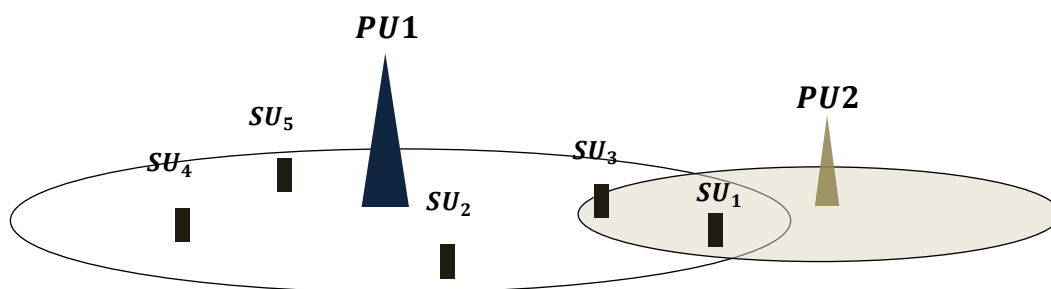


圖 4 範例環境示意圖

在本論文中，以圖 5、圖 6 及圖 7 來說明三種選擇機制對頻譜資源的選擇及取得資源的符合情況。假設 PU_1 有 2 個單位的 Q1 類型資源和 2 個單位的 Q2 類型資源， PU_2 有 1 個單位的 Q1 類型資源和 1 個單位的 Q2 類型資源， $SU_1 \sim SU_5$ 的 QoS 需求值分別為 0.2, 0.6, 0.3, 0.5 及 0.4，並以需求值 0.5 作為門檻值。假設 SU_1 距離 PU_2 較近， SU_3 距離 PU_1 較近。虛線連接線表示該 $SU_j, j=1 \dots 5$ ，所有可能選擇的情況，實線連接線為該選擇機制之條件所選擇的結果。

1. 隨機選擇

隨機選擇為最簡單的選擇方式，SU 的選擇只受地理限制的約束，當 SU 產生頻譜需求時，便會從感測到的空間頻譜資源中隨機選取可用的資源進行交易。 SU_1 的 QoS 需求值為 0.2，能同時感測到 PU_1 和 PU_2 的資源，因較靠近 PU_2 ，理論上有較大的機率選擇 PU_2 的資源，所以隨機選擇了 PU_2 的 Q2 類型資源。 SU_2 的需求值為 0.6，地理位置上只能感測到 PU_1 ，則選擇 PU_1 的 Q2 類型資源。 SU_3 的需求值為 0.3，與 SU_1 一樣，能同時感測 PU_1 和 PU_2 的資源，但比較接近 PU_1 ，則選擇 PU_1 的 Q1 類型資源。 SU_4 和 SU_5 的需求值分別為 0.5 和 0.4，地理位置上都只能感測到 PU_1 ，則從剩餘的資源中分別隨機選擇 PU_1 的 Q1 類型資源和 PU_1 的 Q2 類型資源。頻譜資源選擇的結果如圖 5 所示。

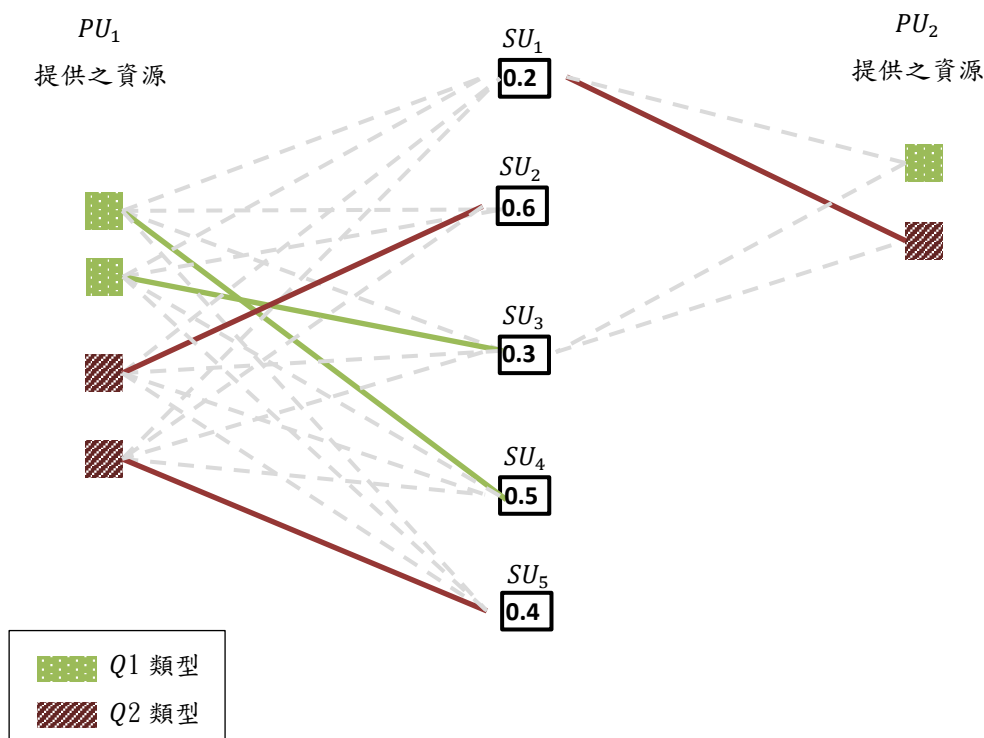


圖 5 隨機選擇機制匹配

因為 SU 獲取資源之符合度不在隨機選擇資源的條件中，所以根據隨機選擇到的資源與系統環境給予 SU 的 QoS 需求值比對，非授權使用者獲取資源是否符合其 QoS 需求值 (meeting QoS requirement of SU) 的結果，如表 2 所示。

表 2 隨機選擇機制匹配的符合情況

SU_j	SU_1	SU_2	SU_3	SU_4	SU_5
Meeting QoS requirement of SU	○	×	×	○	○

2. 優化 SU 之選擇機制

此選擇機制只單方面考慮 SU 資源選擇， SU 追求以最低的價格取得傳輸品質最好的頻譜資源，來達到傳輸量最大化與成本最小化的目的(Niyato & Hossain, 2007)，我們將此機制稱為優化 SU 之選擇機制。在此機制下不管 SU 本身的應用服務類型為何，都希望可以得到目前市場上所提供最高的 QoS 資源(即 $Q1$ 類型資源)，來獲得良好且穩定的傳輸品質，減少傳輸失敗時所造成的成本，以確保自身最大的利益。由 SU 角度看來是個理想的選擇機制，但若市場上每個 SU 都如此的話，就會影響到 PU 的整體效益。

在優化 SU 選擇機制中，為滿足其選擇機制的條件，需選取到 $Q1$ 類型資源才會滿足 SU 對獲取資源之符合度。 SU_1 的 QoS 需求值為 0.2，在地理位置上能同時感測到 PU_1 和 PU_2 的資源，根據該機制的選擇順序， SU 會優先選擇 $Q1$ 類型的資源，不會去選擇比較符合其服務需求的 $Q2$ 類型。當 PU_1 和 PU_2 皆有 $Q1$ 類型資源時，則會先選取離本身較近的資源，所以 SU_1 選擇 PU_2 的 $Q1$ 類型資源。 SU_2 的 QoS 需求值為 0.6，所在地理位置只能感測到 PU_1 的資源，因此選擇 PU_1 的 $Q1$ 類型資源。 SU_3 的 QoS 需求值為 0.3，能同時感測到 PU_1 和 PU_2 的資源，因其距離 PU_1 較近，所以與 SU_1 一樣，雖本身的需求值不高，仍希望能取得品質較穩定 $Q1$ 類型資源，所以選擇 PU_1 的 $Q1$ 類型資源。 SU_4 和 SU_5 的 QoS 需求值為分別為 0.5 和 0.4，但此時兩者能感測到的資源只剩下 PU_1 的 $Q2$ 類型資源，只能選取剩下傳輸品質未達期望的 $Q2$ 類型資源。此機制非授權使用者頻譜資源選擇的結果如圖 6 所示。

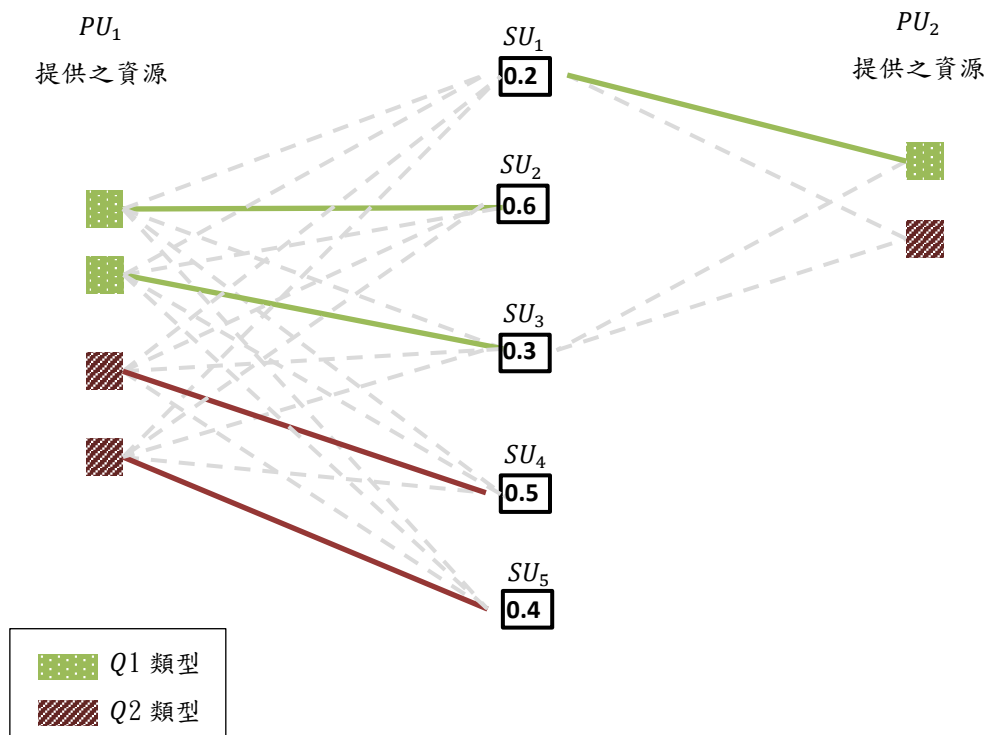


圖 6 優化 SU 之選擇機制匹配

根據優化 SU 選擇機制， SU_1 選擇到 Q1 類型資源，滿足了其追求的傳輸品質，所以判定 SU_1 獲取符合其需求的資源， SU_2 和 SU_3 的情況與 SU_1 相同。但是當市場上的 Q1 類型資源被選擇完後，剩下的 SU 則都無法得到滿足，如 SU_4 和 SU_5 。SU 獲取資源是否符合其 QoS 需求值的結果，如表 3 所示。

表 3 優化 SU 之選擇機制匹配的符合情況

SU_j	SU_1	SU_2	SU_3	SU_4	SU_5
Meeting QoS requirement of SU	○	○	○	×	×

3. Q-MD 選擇機制

Q-MD 選擇機制是根據每一位 SU 所提出之 QoS 需求值去選擇適當的頻譜資源。如圖 7 所示， SU_1 的 QoS 需求值為 0.2，在地理位置上能感測到 PU_1 和 PU_2 的資源，因不需要高 QoS 的頻譜資源，會選擇 Q2 類型，當 PU_1 和 PU_2 皆有 Q2 類型資源時，則會先選取離本身較近的資源，所以選擇 PU_2 的 Q2 類型資源。 SU_2 的 QoS 需求值為 0.6，所在地理位置只能感測到 PU_1 的資源，配合需求值條件，會選擇 PU_1 的 Q1 類型資源。 SU_3 的 QoS 需求值為 0.3，能同時感測到 PU_1 和 PU_2 的資源，但距離 PU_1 較近，所以選擇 PU_1 的 Q2 類型資源。 SU_4 的 QoS 需求值為 0.5，只能感測到 PU_1 的資源，因需要高 QoS 的頻譜資源，會選擇 PU_1 的 Q1 類型資源。 SU_5 的 QoS 需求值為 0.4，也是只能感測到 PU_1 的資源，因需求值較低，會選擇 PU_1 的 Q2 類型資源。

在 Q-MD 選擇機制中，SU 根據本身對 QoS 的需求去選取資源，若獲取的資源能提供的 QoS 大於等於 $SU_j=qos$ 時，即滿足 SU 獲取資源之符合度。如表 4 所示， SU_1 的 QoS 需求值為 0.2，根據其需求選擇 Q2 類型資源，獲取了符合其需求的資源。 SU_2 的 QoS 需求值為 0.6，選擇 Q1 類型資源，獲取符合需求的資源。 SU_3 、 SU_4 及 SU_5 也都依據自身的 QoS 需求選擇符合需求的資源。表 4 是 Q-MD 選擇機制之符合情況。

表 4 Q-MD 選擇機制之符合情況

SU_j	SU_1	SU_2	SU_3	SU_4	SU_5
Meeting QoS requirement of SU	○	○	○	○	○

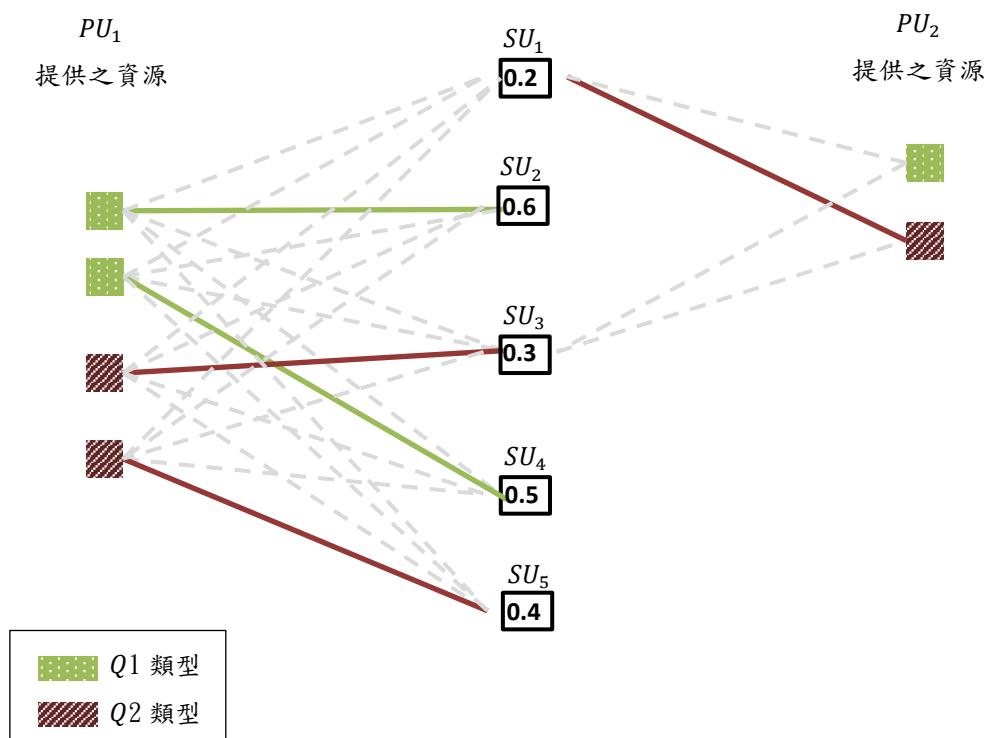


圖 7 Q-MD 選擇機制匹配

圖 8 為 Q-MD 機制演算法流程圖，步驟說明如下：

步驟一：

設定頻譜資源數量 N 及 M ，其中 N 表示 PU 提供之 $Q1$ 類型資源數量， M 表示 PU 提供之 $Q2$ 類型資源數量。

步驟二：

SU 感測當前位置的空間頻譜資源並根據本身的 QoS 需求選擇不同類型的頻譜資源。

步驟三：

當 QoS 需求值 $qos \geq 0.5$ 時， SU 會選擇符合其需求的 $Q1$ 類型頻譜資源。若無 $Q1$ 類型頻譜資源， SU 則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。

當 $qos < 0.5$ 時， SU 會選擇符合其需求的 $Q2$ 類型頻譜資源，因 $Q2$ 類型資源為傳輸品質較差的資源，資料傳輸可能會失敗。若傳輸失敗時，傳輸失敗成本將會增加，且 SU 需重新感測感測頻譜資源。若無 $Q2$ 類型頻譜資源，但市場上還有空閒的 $Q1$ 類型資源時則會折衷選取，但會取得不符合其需求的資源。若無任何可用資源，則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。

步驟四：回傳頻譜售價給非授權使用者，出售頻譜資源。

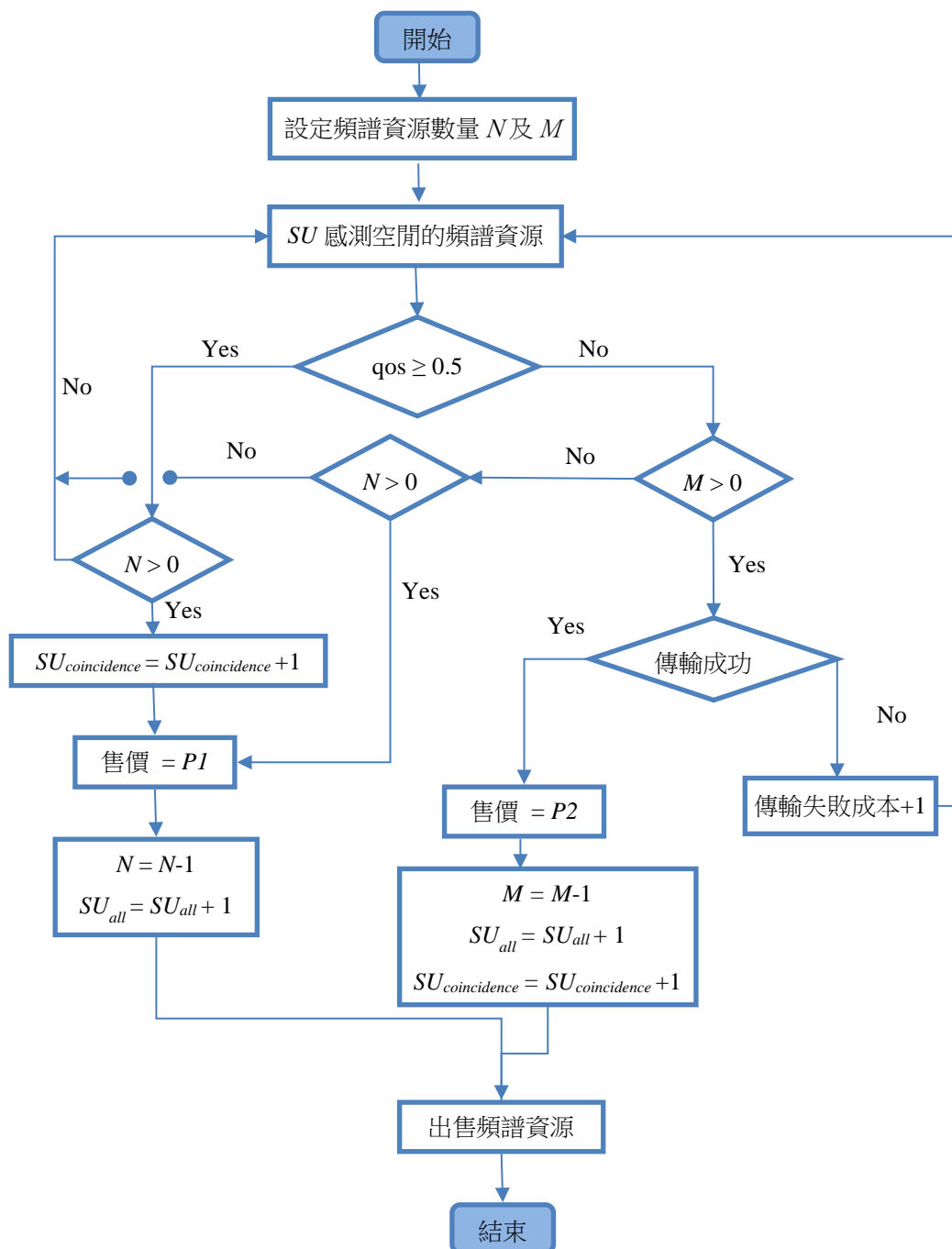


圖 8 Q-MD 選擇機制演算法流程圖

頻譜資源的價格除了與頻譜的傳輸品質有關外，也會與頻譜使用的負荷(load)有關。頻譜使用的負荷大，表示有多人同時在使用頻譜資源，因此在此尖峰負荷時段，可以提高頻譜資源的價格，除了可以達到平抑頻譜的尖峰負荷，亦可以增加出售頻譜的增益。根據時段不同差別定價可以達到分散頻譜的負載流量也有增加收益之效果，而尖峰期間判定取決於各個授權使用者本身之歷史紀錄自訂時段。本論文所提出的 Q-MD 機制可以結合依據尖峰負荷與非尖峰時段之差別定價，來達到提升整體頻譜利用率與經濟效益的目的，我們稱之為 Q-MD(含時段)機制。每個非授權使用者感測頻譜的時候，會將其 QoS 需求傳送給授權使用者，授權使用者會根據其使用時段進行時段加權來調整售價。例如，假設基本售價為 P_{bp} ，時段加權 t ，時段參數 $T=\{H, L\}$ ，其中 H 代表尖峰時段、 L 代表非尖峰時段。當非授權使用者提出頻譜需求的時段 $T=H$ 時，頻譜售價 $P=P_{bp} \times (1+t)$ ；而當時段 $T=L$ 時，頻譜售價 $P=P_{bp}$ 。

圖9為Q-MD(含時段)演算法流程圖，步驟說明如下：

步驟一：

設定頻譜資源數量 N 及 M ，其中 N 表示 PU 提供之 $Q1$ 類型資源數量， M 表示 PU 提供之 $Q2$ 類型資源數量。

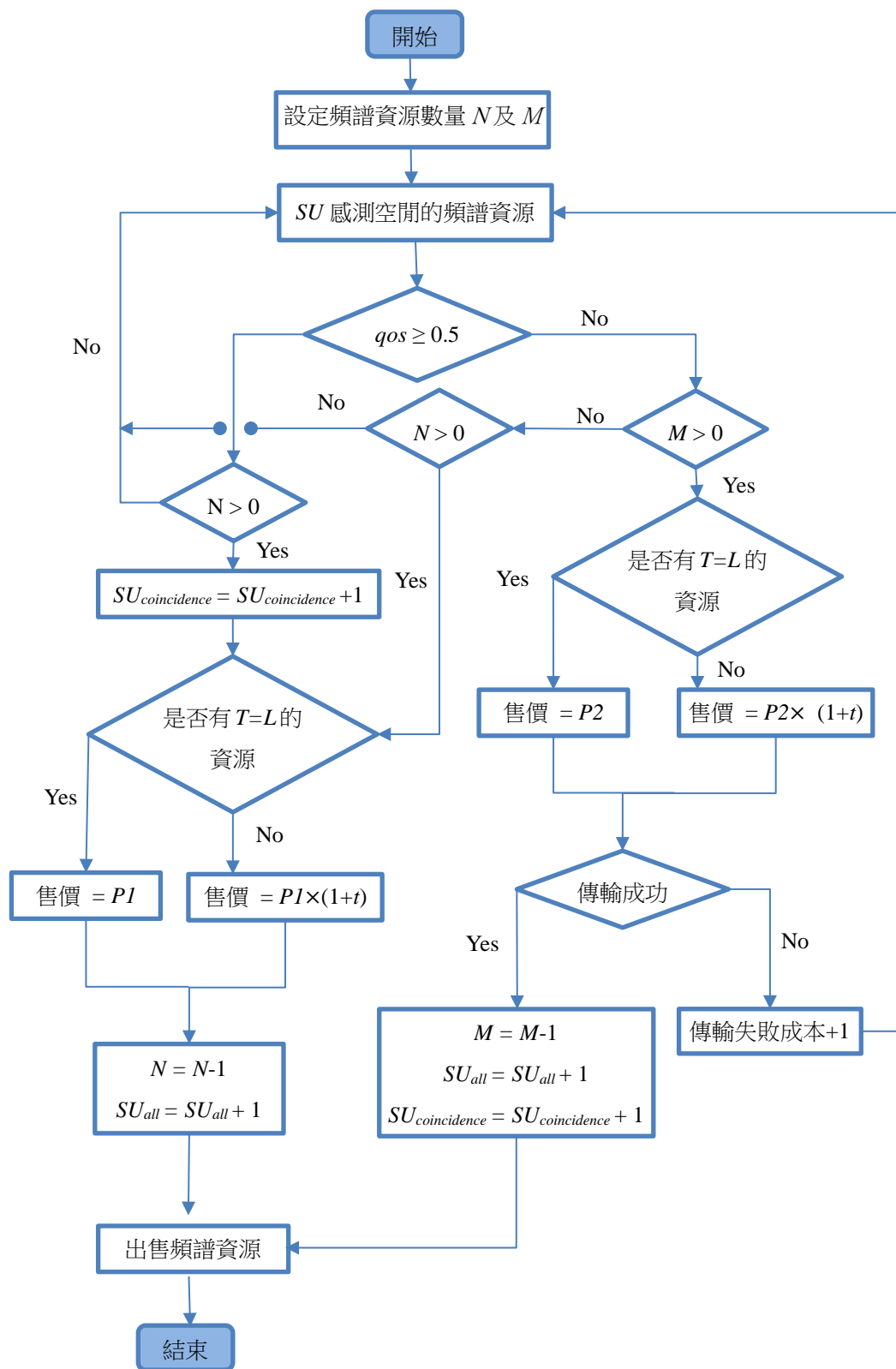


圖9 Q-MD 選擇機制演算法(含時段)流程圖

步驟二：

SU 感測當前位置的空間頻譜資源並根據本身的 QoS 需求選擇不同類型的頻譜資源。

步驟三：

當 $qos \geq 0.5$ 時，*SU* 會選擇符合其需求的 *Q1* 類型頻譜資源，並優先選擇非尖峰時段的頻譜資源。若無 *Q1* 類型頻譜資源，*SU* 則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。當 $qos < 0.5$ 時，*SU* 會選擇符合其需求的 *Q2* 類型頻譜資源，並優先選擇非尖峰時段的頻譜資源。因 *Q2* 為傳輸品質較低的資源，當傳輸失敗時，傳輸失敗成本會增加，*SU* 需重新感測感測。若無 *Q2* 類型頻譜資源，市場上還有空閒的 *Q1* 類型資源時則會折衷選取，但會取得不符合其需求的資源。若無任何可用資源則等待後再次感測，直到取得符合條件之資源。

步驟四：

回傳頻譜售價給非授權使用者，出售頻譜資源。

(三)頻譜資源定價與效益計算

假設 *PU* 擁有 N 個 *Q1* 類型資源， M 個 *Q2* 類型資源， N_s 和 M_s 分別為兩者完成頻譜交易的個數， $N \geq N_s$ ， $M \geq M_s$ 。令 n 與 m 分別為當 $T=H$ 時 *SU* 選擇 *Q1* 類型與 *Q2* 類型的個數，授權使用者維持訊號傳輸與頻譜使用權轉移時所消耗的成本為固定成本 c_0 ， c_f 為傳輸失敗時增加的成本。*PU* 提供兩種 QoS 類型的空間頻譜資源 $Q = \{Q1, Q2\}$ ，價格分別為 $P = \{P1, P2\}$ ，而兩種類型的定價標準則是以 *PU* 提供給 *SU* 的 QoS 高低為主，傳輸品質穩定的 *Q1* 類型售予較高的價錢，理論上 $P1 \geq P2$ 。因此 Q-MD 機制執行頻譜交易所獲取的總收益 *Gain* 可由下式求得：

$$Gain = N_s \times P1 + M_s \times P2 - COST \quad (3)$$

其中 $COST = c_0 + c_f$ ，為總消耗成本。

若考慮尖峰負荷時段來調整頻譜售價，Q-MD(含時段)機制執行頻譜交易所獲取的總收益 *Gain* 為：

$$Gain = n \times P1 \times (1+t) + (N-n) \times P1 + m \times P2 \times (1+t) + (M-m) \times P2 - COST \quad (4)$$

其中等式右邊第二項及第四項分別是當 $T=L$ 時，*SU* 選擇 *Q1* 類型與 *Q2* 類型所獲得的收益。

肆、模擬與效能分析

針對隨機選擇、優化 *SU* 之選擇機制和 Q-MD 選擇機制的資源選擇方式和定價策略進行模擬，比較不同選擇機制對於整體頻譜市場的影響。分析空閒頻譜資源數量與 *SU* 人數比例改變時，對於不同類型資源頻譜利用率的影響。假設授權使用者為 2 位，*PU1* 擁有 2 個單位的 *Q1* 類型資源與 2 個單位的 *Q2* 類型資源，*PU2* 擁有 1 個單位的 *Q1* 類型資源與 1 個單位的 *Q2* 類型資源。非授權使用者為 20 位，非授權使用者的 QoS 需求值介於 0~1 間。*Q1* 類型售價($P1$)為 150、*Q2* 類型售價($P2$)為 100、在通道不好的情況下傳輸失敗的機率(b)為 0.7、固定成本(c_0)為 20、傳輸失敗所增加的成本(c_f)為 5。

圖 10 為三種不同選擇機制在頻譜交易過程中訊號傳輸失敗的累計次數。由圖可知，隨機選擇機制的方式在三種機制裡傳輸失敗的機率最高，這是因為使用隨機選擇選取資源的非授權使用者無法得知授權使用者的頻譜資源相關資訊，不知道頻譜資源所能提供的 QoS 高低，所以選擇的頻譜資源皆有可能為有損通道，因此，對 b 值的敏感高。優化 *SU* 之選擇機制和 Q-MD 選擇機制的傳輸失敗次數明顯低於隨機選擇 2~3 倍，這是因為這兩種選擇機制皆具備感知授權使用者頻譜資源資訊的能力，透過感知環境參數依循 QoS 需求值選擇資源，若選擇到傳輸品質穩定的頻譜資源，在傳輸過程中基本上就不會有失敗情況發生，降低傳輸失敗的機率。

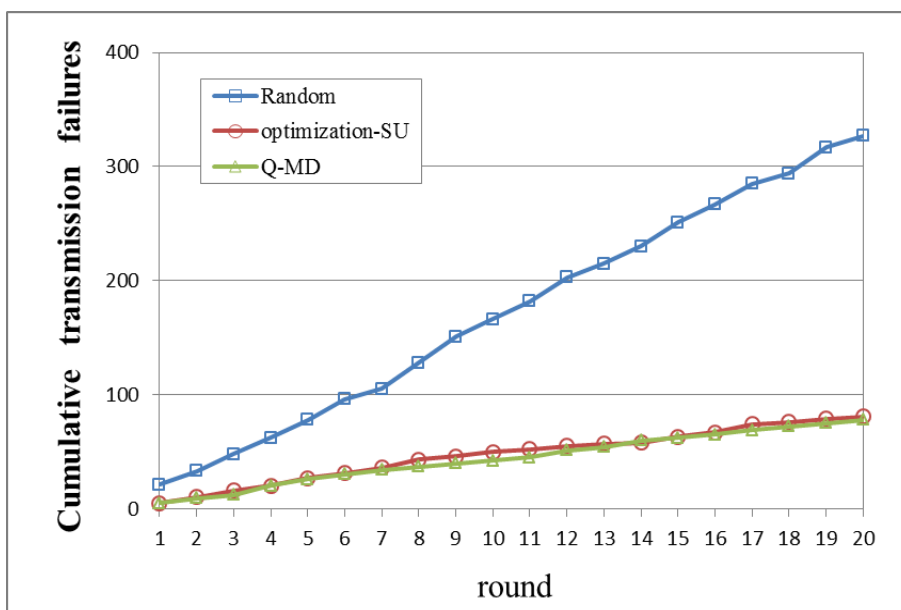


圖 10 不同選擇機制的累計傳輸失敗次數

圖 11 為頻譜資源數少於非授權使用者人數之累計收益。假設授權使用者為 2 位，其 N 與 M 數量設定為 $PU_1=\{2,2\}$ 、 $PU_2=\{1,1\}$ ，非授權使用者為 20 位。由圖可知，隨機選擇機制方法所累計的收益最低，這是因為使用隨機選擇方式選取資源時，因可能選到傳輸品質不好的通道造成傳輸失敗的次數增加，導致累計收益會受到傳輸失敗所造成的額外成本而大幅降低。而優化 SU 之選擇機制與 $Q-MD$ 選擇機制中 SU 能辨別空間資源的類型，當選擇到傳輸品質高的 QI 類型資源，就能降低傳輸失敗的機率。所以當出售的頻譜數量相同的時候，優化 SU 之選擇機制與 $Q-MD$ 選擇機制兩者取得的收益是差不多的。

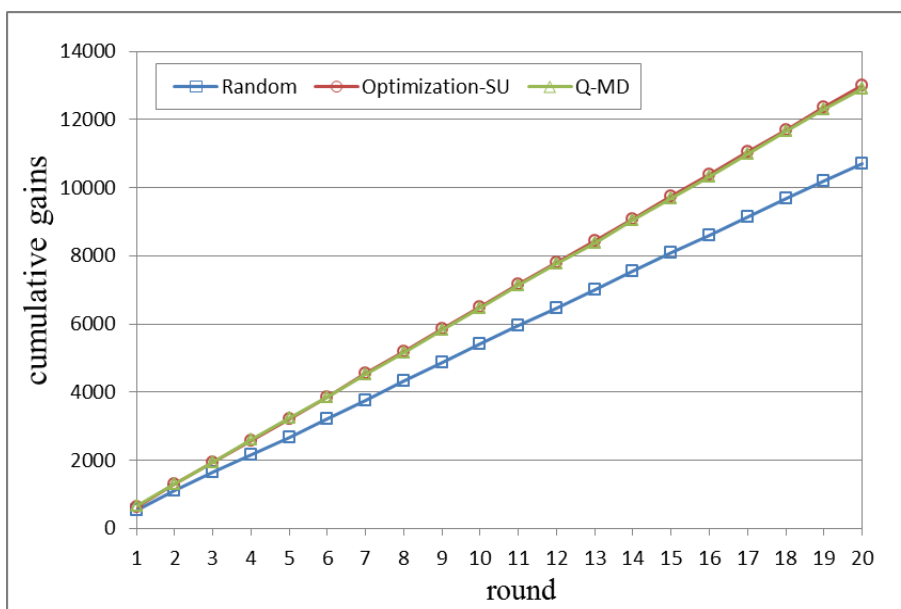


圖 11 資源數少於非授權使用者人數之累計收益

圖 12 為頻譜資源數多於非授權使用者人數時三種不同選擇機制所得之累計收益。為比較在頻譜資源多於非授權使用者人數的情況下累計收益的變化，假設非授權使用者為 4 位者，其他模擬參數保持不變下進行模擬。由圖 12 可知，當資源數量多於非授權使用者人數時，整體累計收益比起頻譜資源數少於非授權使用者人數時要來的低。這是因為市場上供給大於需求，當所有非授權使用者都選擇完資源後，還

會存在未出售之空間頻譜資源。在此情況中，隨機選擇機制的累計收益仍然是最低。而優化 *SU* 之選擇機制累計收益會大於 *Q-MD* 選擇機制，主要是由於優化 *SU* 之選擇機制為達自身效益最大化，在資源數量足夠的時候，會優先選取售價較高的 *Q1* 類型資源。*Q-MD* 選擇機制是依據非授權使用者的 *QoS* 需求值大小擇選資源，所以累計收益略低於優化 *SU* 之選擇機制。在頻譜資源少於非授權使用者人數時，頻譜資源將會被選取完，所以在資源較少的情況下，三種選擇機制中 *Q1* 類型及 *Q2* 類型的頻譜資源利用率都將會是 100%。

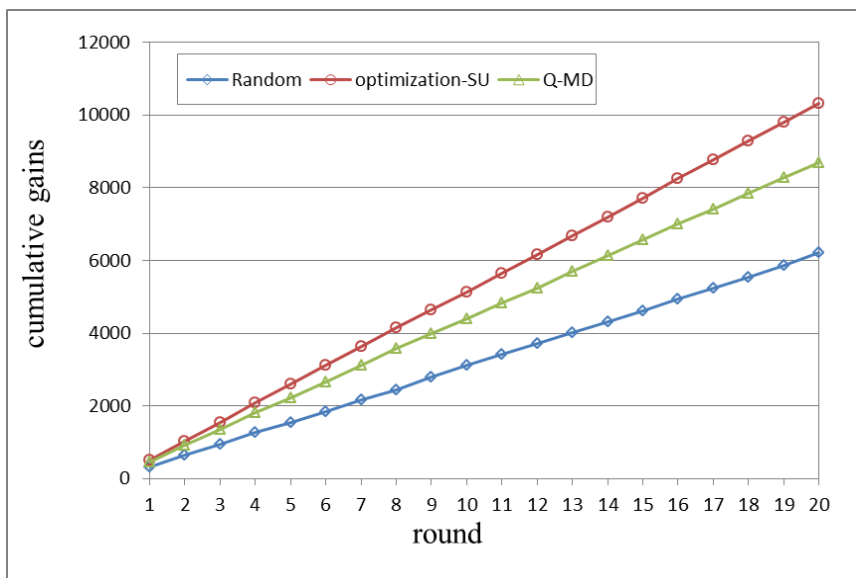


圖 12 頻譜資源數多於非授權使用者人數時之累計收益

圖 13 為不同的資源選擇機制對不同資源類型頻譜利用率的影響。在隨機選擇機制下，因沒有根據特定的需求條件，*Q1* 類型與 *Q2* 類型資源的利用率落於 60~70% 之間。在優化 *SU* 之選擇機制下，因會優先選取 *Q1* 類型的資源，所以 *Q1* 類型資源利用率會達到 100%，反觀 *Q2* 類型只有 28%，*Q1* 類型資源與 *Q2* 類型資源利用率極為不平均。在 *Q-MD* 機制下，非授權使用者根據自己本身的 *QoS* 需求，選擇適當的資源使用，所以 *Q1* 類型與 *Q2* 類型利用率平均落於 75%，相較於隨機選擇機制與優化 *SU* 之選擇機制，*Q-MD* 選擇機制的頻譜利用率能得到較為平均的效果。

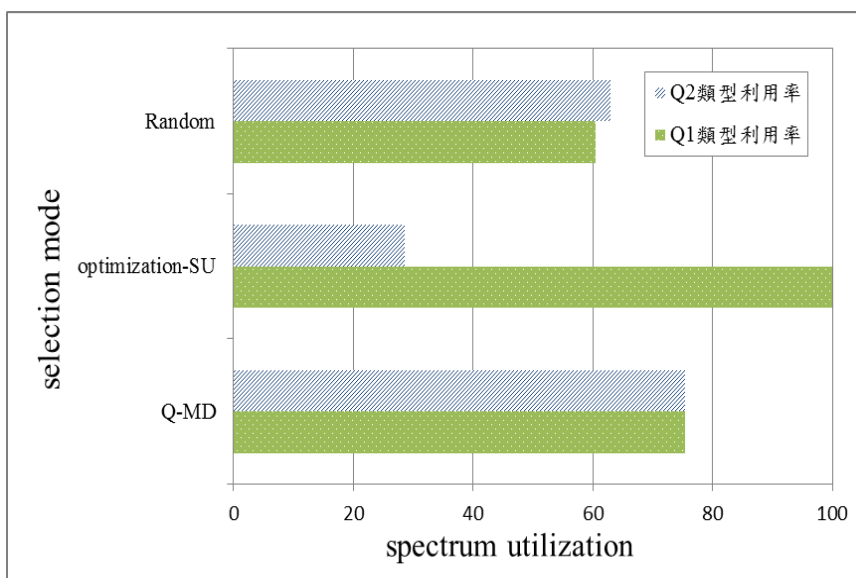


圖 13 不同資源選擇機制的空間頻譜資源利用率

圖 14 為時段差別定價對 Q-MD 選擇機制的影響。由圖 14 所示，含時段差別定價收益明顯高於單純考慮保險概念定價，這是因為當非授權使用者在尖峰時段下執行頻譜交易時，頻譜售價會因時段加權的關係增加，非授權使用者需付出更多的價錢，所以授權使用者能取得較高的收益。可以藉此分散授權使用者系統的負載，並且提高執行頻譜交易所獲得的總收益。

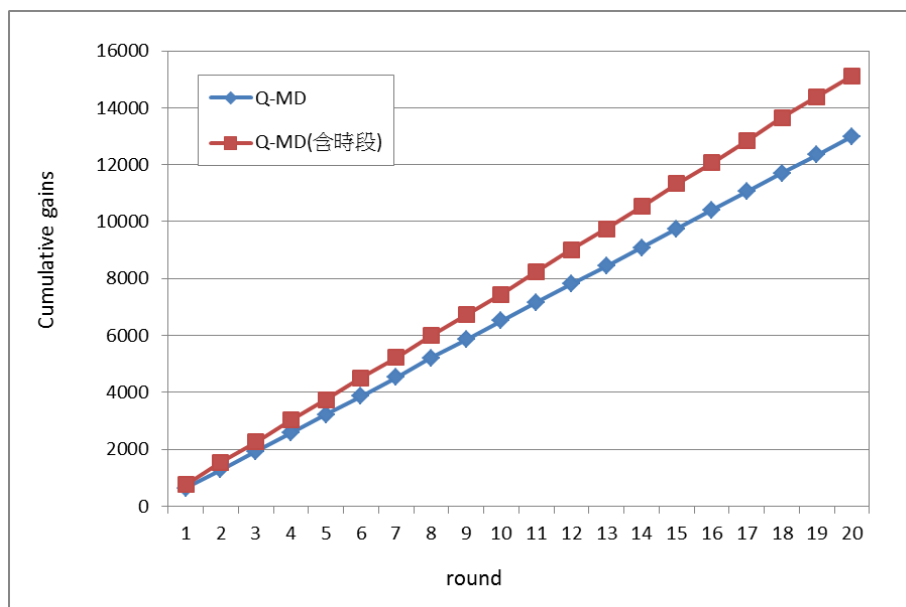


圖 14 時段差別定價對 Q-MD 選擇機制的影響

圖 15 為不同差別定價對 Q-MD 選擇機制下所獲得之累計總收益。不同 $P1/P2$ 比值表示不同的頻譜類型的價格倍率，例如 $P1/P2=1$ ，表示 $Q1$ 類型頻譜的價格等於 $Q2$ 類型頻譜的價格。由圖 15 可知，當倍率越高，授權使用者能獲得的累計收益越多，這是因為倍率越高，非授權使用者選擇 $Q1$ 類型時，需付給授權使用者的價格就會越高，因此授權使用者的累計收益會大幅增加。不過倍率太高將會影響非授權使用者感知頻譜資源的意願，從而影響累計收益。

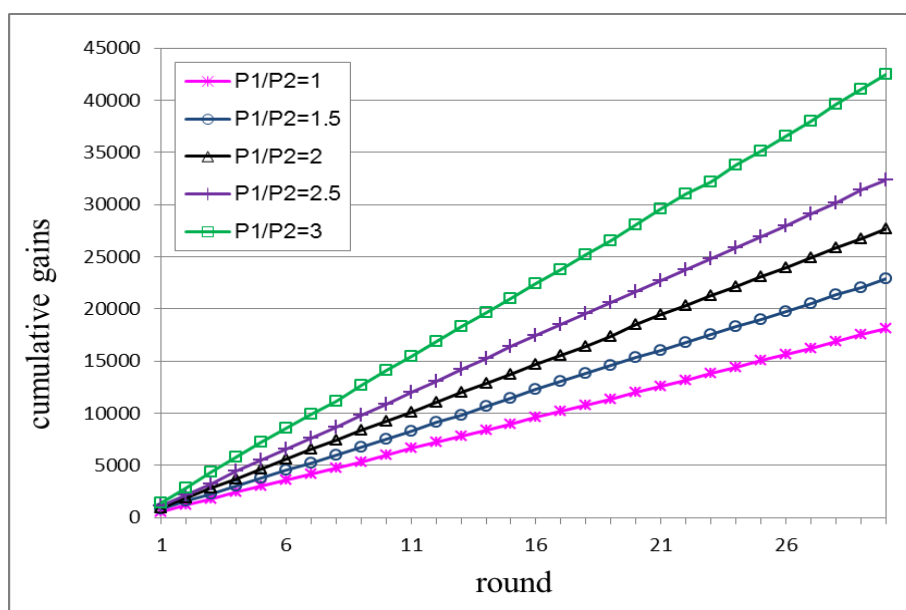


圖 15 不同差別定價所獲得之累計總收益

伍、結論與未來研究方向

感知無線電為未來商用無線電與產業發展重要的關鍵技術之一，因能有效的改善傳統頻譜配置所導致的頻譜利用率低的問題。本論文提出一個在感知無線電網路環境下，基於非授權使用者之服務品質需求匹配與差別定價的資源選擇機制，稱為 Q-MD 選擇機制。本論文的主要貢獻為改善目前多數研究中只考慮單方面的最大效益(以非授權者或授權者角度之最大利益為目標)時，非授權使用者為高 QoS 需求時存取到低傳輸品質資源或為低 QoS 需求時存取到高傳輸品質資源的情況發生。我們藉由 QoS 需求值匹配依據提供予適合的價格與 QoS 給適合的非授權者使用者，差別定價則來分散整體頻譜的利用率來增加授權者的收益，來取得一個頻譜市場上授權使用者與非授權使用者對於資源的平均利用率。

模擬結果顯示，本研究方法相較其他選擇方式能提升授權使用者收益，並且滿足近乎所有的非授權使用者需求條件。隨機選擇方式可以達到一定水平的資源平均利用率，但也因為是隨機分配的關係，無法考量到 SU 的符合度；優化 SU 擇機制能自身的效益最大化，在資源多於非授權使用者人數時，能創造最多的利益，但卻忽略了不同類型頻譜的頻譜利用率。無論 SU 所獲取資源的符合度或是不同資源類型的頻譜利用率，Q-MD 選擇機制皆為最佳的方案。在資源少於的非授權使用者需求數時 Q-MD 選擇機制能滿足所有授權使用者的 QoS 需求，而資源多於非授權使用者需求數時，有平均頻譜利用率之效果。未來研究可基於 Q-MD 選擇機制條件下，考量其他的環境條件(功率、路徑消耗)，配合一些價格模型如：價格敏感度測試模型(price sensitivity measurement, PSM) (Sendegeya et al., 2009)更精準的針對 SU 的需求定價，達到頻譜資源個人化定價的目標。

台灣的第四代行動通訊系統(4G)已分別在 2013 年及 2015 年完成兩次的頻譜拍賣，預計 2017 年底進行第三次的頻譜拍賣。目前國家通訊委員會(NCC)也正在研擬在 4G 系統中啟動頻譜交易機制，屆時本論文所提出的基於非授權使用者之服務品質需求與差別定價的資源選擇機制(Q-MD 機制)可以給相關行動電信業者在進行頻譜交易時的參考，來提昇頻譜資源的利用率及頻譜收益。

參考文獻

- Liang, Y. C., Chen, K. C., Li, G. Y., & Mahonen, P. (2011). Cognitive radio networking and communications: An overview. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 60(7), 3386-3407.
- Hyoil, K. G., Min, K., & Kumar, A. W. (2010). Cognitive radios for dynamic spectrum access: From concept to reality. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 64-74.
- Benmammar, B., Amraoui, A., & Krief, F. (2013). A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio networks. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 5(2), 68-69.
- Chen, W. Y., Tseng, Y. T., & Huang, S. S. (2013). A study on trading strategy for spectrum management in cognitive radio networks. *Journal of Southern Taiwan University of Science and Technology*, 38(2), 23-38.
- Chen, W. Y., Tsai, S. T., & Tseng, Y. T. (2014). Performance analysis of spectrum trading in cognitive radio networks. *Journal of Southern Taiwan University of Science and Technology*, 39(1), 31-45.
- Weber, T. A. (2014, Jan). *Collaborative housing and the intermediation of moral hazard*. 47th Hawaii International Conference on System Sciences (pp.4133-4141). Waikoloa, HI.

- Si, P., Zhang, Y., Yang, R., & Zhang, J. (2011). *Resource allocation policy of primary users in proactively - optimization cognitive radio network*. 2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (pp.343-347). Bali, Indonesia
- Liang, Y. C., Chen, K. C., Li, G. Y., & Mahonen, P. (2011). Cognitive radio networking and communications: An overview. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 60(7), 3386-3407.
- Hyoil, K. G., Min, K., & Kumar, A. W. (2010). Cognitive radios for dynamic spectrum access: From concept to reality. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 64-74.
- General Survey of Radio Frequency Bands—30 MHz to 3 GHz (2010, Sep. 23). Retrieved from http://www.sharedspectrum.com/wp-content/uploads/2010_0923-General-Band-Survey-30MHz-to-3GHz.pdf
- Mitola, J., & Maguire, G. Q. Jr. (1999). Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.
- Mitola, J. (2000). *Software radios: Wireless architecture for the 21st century* (1st Ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Trading Guidance Notes (2015, July). Retrieved from https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0029/88337/Trading-guidance-doc-jul15v0-1-2.pdf
- Ji, Z., & Liu, K. J. R. (2008). Multi-stage pricing game for collusion-resistant dynamic spectrum allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1), 182-191.
- Caicedo, C. E., & Weiss, M. B. H. (2011). The viability of spectrum trading markets. *IEEE Communications Magazines*. 49(3), 46-52.
- Alptekin, G. I., & Bener, A. B (2009, May). *Pricing model for the secondary market architecture in cognitive radio networks*. International Conference on Game Theory for Networks (pp.479-483). Istanbul, Turkey.
- Abji, N., & Leon-Garcia, A. (2011, Sep.). *Spectrum Markets for Service Provider Spectrum Trading with Reinforcement Learning*. IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (pp.11-14). Canada: Toronto, ON.
- Jin, H., Zou, H., Yang, F., Lin, R., & Shuai, T. (2012). *Using bipartite graph for resolving multiple requests conflicts*. 2012 International Joint Conference on Service Sciences (pp.46-50). China: Shanghai.
- Yi, Y., Zhang, J., Zhang, Q., & Jiang, T. (2012). *Spectrum leasing to femto service provider with hybrid access*. 2012 IEEE INFOCOM (pp.1215-1223). Orlando, FL
- Jin, H., Sun, G., Wang, X., & Zhang, Q. (2012). *Spectrum trading with insurance in cognitive radio networks*. IEEE INFOCOM (pp.2041-2049). Orlando, FL
- Xu, H., Jin, J., & Li, B. (2010, March). *A secondary market for spectrum*. 2010 IEEE INFOCOM (pp.1-5). San Diego, CA
- Niyato, D., & Hossain, E. (2007). *Hierarchical spectrum sharing in cognitive radio :A microeconomic approach*. 2007 Wireless Communications and Networking Conference (pp.3822-3826). China: Kowloon.
- Sendegeya, A., Lugujjo, E., Dasilva, I. P., Söder, L., & Amelin, M. (2009). *Application of price sensitivity measurement method to assess the acceptance of electricity tariffs*. 2009 AFRICON (pp.23-25). Kenya: Nairobi.