

多準則評估法應用於都市交通現場設備 之無線通訊網路方案評選

EVALUATION OF WIRELESS COMMUNICATION NETWORK ALTERNATIVES FOR URBAN TRAFFIC DEVICES BY USING MULTI-ATTRIBUTE EVALUATION METHODS

陶冶中 Chi-Chung Tao¹
劉文龍 Wen-Lung Liu²

(95 年 10 月 13 日收稿，96 年 4 月 10 日第一次修改，96 年 5 月 24 日
第二次修改，97 年 2 月 27 日定稿)

摘 要

近年來，許多先進國家皆發展無線通訊技術以降低有線通訊之高昂建置成本以及應用於交通資訊之傳輸，因此無線通訊網路之評選方式遂成為研究重點之一。本研究為改善以往單一指標與單一評估方法之缺點，將比較不同性質（質化、量化與綜合）之評估方法並以擁有較成熟之交通現場設備的臺北市為實證對象，評選出最佳的無線通訊網路方案。本研究提出功能、品質、成本與系統四項層面及十六個準則，以建立評估架構與評估方法之評選流程。研究結果發現，在考量整體現場設備的情況下，目前最佳方案為 A8 方案 (2.5G/3G 搭配 WLAN/WiMAX)，評估方法中則以 MEQQD 表現最佳。本研究最後提出一規劃時程決策及整體評估流程。未來即使出現新一代的無線通訊技術，仍可依本研究之評估架構與決策流程，針對不同現場設備的通訊需求，尋求最佳的無線

-
1. 淡江大學運輸管理學系助理教授（聯絡地址：25137 臺北縣淡水鎮英專路 151 號；電話：02-26215656 轉 3503；E-mail：cctao@mail.tku.edu.tw）。
 2. 淡江大學運輸科學研究所碩士（E-mail：94alanlau@gmail.com）。

通訊網路方案。

關鍵詞：無線通訊網路；模糊集合理論；多準則評估

ABSTRACT

Recently many developed countries have deployed wireless communication technologies to overcome the drawbacks of high costs of wired line construction and transmission for traffic information services. It is anticipated that several wireless communication technologies with high mobility and data rate (WiMAX, WiBro) will be soon available for urban traffic control and management. The main purpose of this paper aims at proposing an evaluation process to identify feasible wireless communication network alternatives for urban traffic field devices. Taipei has been chosen as the empirical case study by using a hierarchy framework including 4 objectives (function, quality, cost and system) and 16 criteria. It is found that weight of cost is the highest and weight of system is the lowest for each alternative. So far the alternative A8 (2.5G/3G+WLAN/WiMAX) is regarded as the most comprehensive wireless communication network for the long-term development. Considering standard conditions with quality and quantity criteria the most appropriate evaluation method is MEQQD. An evaluation process is also provided to depict the roadmap of deploying wireless communication networks for urban traffic management devices. This evaluation structure and decision process will be still useful to seek the most appropriate wireless communication network focusing on the communication demands of different site equipment even though new wireless communication technologies will appear in the future.

Key Words: Wireless communication network ; Fuzzy set theory ; Multi-attribute evaluation

一、緒 論

智慧型運輸系統 (intelligent transportations systems, ITS) 不僅讓行的服務更具有智慧特質，在空中無形的交通資訊傳輸亦因資訊通訊科技突破而進展神速。對照以往鐵路運輸的發展歷程，從蒸汽機車到電氣機車的演進，運輸科技發展的 S 曲線必將出現「破壞性技術」(disruptive technology)，而進入成熟階段。當前傳輸網路從有線(限)邁向無線(限)即為最佳例證。以往 ITS 在資料蒐集、傳送、交換及管理的過程，常藉由有形的纜線為主要的傳輸媒介。但自 1997 年 IEEE 制訂 802.11 無線網路標準以來，因其具有不受地形限制、移動性高、建置容易、與其他技術整合性強等優點，相較於有形纜線的高昂建置成本，遂成為世界各國紛紛採用的無線寬頻通訊技術標準。所謂的 E 化係建置一個可獲取更豐富資訊及更多連結端點的整體環境，以取代部分實體運輸而節省運輸成本；所謂的 M 化則是強調在任何地點 (any place) 及任何時間 (any time) 均可使用各式隨身的終端設備 (any de-

vice) 而連上網路，因此無線寬頻通訊技術乃成為不可或缺的傳輸媒介。

國際間 ITS 與無線通訊結合之應用情形日趨普及，從利用全球衛星定位系統 (global positioning system, GPS) 與無線封包數據網路 (general packet radio service, GPRS) 的智慧型公車動態系統到使用無線區域網路 (wireless local area network, WLAN) 及全球互通的微波存取 (worldwide interoperability for microwave access, WiMAX) 的區域無線交通管理與控制系統，如：無線交通號誌控制、無線即時交通資訊等，皆為成功案例。然而隨著無線通訊科技的日新月異，具有良好移動性、通訊成本較高、通訊頻寬較小的蜂巢式無線通訊系統 (如 2.5G 與 3G) 已非唯一的選擇。當前 WLAN (IEEE802.11 系列) 雖無法提供高速移動之通訊服務，但其具有低通訊成本與高頻寬的優點，仍受交通管理單位的重視。展望未來三至五年，蜂巢式行動通訊雖仍是快速發展的主流產業，但崛起的無線寬頻通訊技術 (WiFi/ WiMAX) 則將扮演市場的挑戰者角色。若再加上短距離通訊技術 (UWB, ZigBee) 的日趨成熟，更將促使無所不在的無縫隙 (seamless) 通訊網路時代及早到來^[1]。

由於無線通訊技術種類繁多，其不同特性與優缺點未必能符合每一項 ITS 設備之要求，因此本研究將基於都市交通現場設備之管理者立場，依據現場設備的應用對象及可選擇的無線通訊技術，同時考量質化與量化的準則，運用多準則評估方法以尋求最佳網路方案。有鑒於臺北市為目前國內發展 ITS 相關現場設備較為完善的都市，因此本研究乃選定臺北市為驗證對象。所謂的都市交通現場設備，大多包括交通資訊蒐集、傳輸、發佈以及交通控制與管理等功能，依其所處位置，則可分為固定式與移動式兩種：

1. 固定式

- (1) 交通控制及管理：號誌控制器 (traffic controller)、車輛偵測器 (vehicle detector)、資訊可變標誌 (variable message sign, VMS)。
- (2) 公車動態資訊系統：智慧型站牌。
- (3) 停車資訊顯示系統：資訊可變標誌。

2. 移動式

公車動態資訊系統：公車車上單元，亦稱為車機。

無線通訊可分為蜂巢式網路、個人性、區域性和廣域式網路等類型，而目前各現場設備資料傳輸距離則大致以 100 公尺以上的區域範圍為主。本研究參考文獻^[2,3]將現行的無線通訊網路分類如下：

1. 蜂巢式網路：2.5G (GPRS)、3G (CDMA)、3.5G (WiBro)
2. 區域/廣域網路：WLAN (IEEE802.11a/b/g)、WiMAX (IEEE802.16-2004, IEEE802.16e)
3. 無縫隙網路 mesh network：主要以上述兩項為基礎，並以一主一輔的方式接替訊號不間斷傳輸工作，目前大致分為雙網 (2.5G/WLAN)、三網 (2.5G/3G/WiMAX) 與四網 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX)。

二、文獻回顧及現況分析

2.1 無線通訊系統簡介與國內外運用於 ITS 之相關案例

2.1.1 無線通訊系統類別

移動式無線技術和固定式有線技術最大的差異即在於傳輸媒介之不同。無線技術可同時接取多方傳輸，有線則礙於有形線路，無論在鋪設與維修上均不及無線技術為優。

無線通訊網路一般係以距離 (distance)、資料傳輸量 (data rate) 與移動性 (mobility) 三項準則進行分類^[2,3]，由圖 1 可看出圓形由小漸大即表示此三項準則之關係，依序分為 (1) 特定短距通訊 (dedicated short range communication, DSRC) 與無線射頻識別 (radio frequency identification, RFID)：在短距離下快速偵測反應，主要提供物品追蹤與辨識；(2) 無線個人通訊網路 (wireless personal area network, WPAN)：如 Bluetooth、UWB、ZigBee 等主要是提供個人 10 公尺內的無線通訊服務；(3) 無線區域網路 (wireless local area network, WLAN)：以 WiFi (wireless fidelity) 為主的 100 公尺範圍內之通訊服務，傳輸速度介於 11~54Mbps 之間，亦較適合固定點的資料交換；(4) 無線都會網路 (wireless metropolitan area network, WMAN)：主要提供 50 公里覆蓋範圍內的通訊服務，其中 WiMAX 傳輸速度最高可達 70Mbps；(5) 無線廣域網路 (wireless wide area network, WWAN)：主要服務區域在 150 公里覆蓋範圍內，如：2G/3G 與 IEEE802.20，具有 2Mbps 的傳輸速度，亦是目前高速移動下最為穩定之通訊系統。茲將各類技術簡介如下：

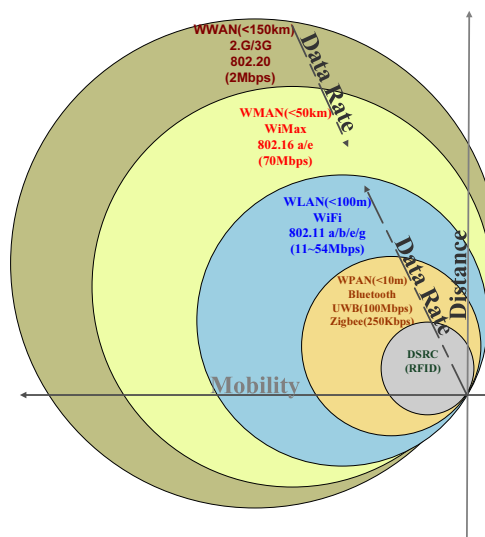


圖 1 無線通訊技術之比較^[2]

1. 特定短距通訊 (DSRC) 與無線個人網路 (WPAN)

DSRC 係利用裝置於路旁的定點通訊感應設備，以微波或紅外線與車上單元（車機）進行辨識、通訊及收費扣款，主要應用於道路電子收費（electronic toll collection, ETC）的機制。另外在短距範圍內，RFID 亦是一種非接觸式自動識別系統，此係利用無線電波來傳送識別資料，其一般皆由標籤與讀取機所組成。短距離 RFID 可運用於工廠自動化、貨品銷售，長距離 RFID 則可用於車輛識別或收費系統。

WPAN 其服務範圍距離約為 10 公尺內，可分為藍芽 (bluetooth)、超寬頻 (UWB) 與 ZigBee^[3]：(1) 藍芽是一種小範圍的無線電頻率技術，裝置間透過晶片可互相溝通，毋需再經由纜線傳輸。目前低功率的無線傳輸仍以紅外線為主，應用的層面侷限於行動電話、PDA、電腦及其相關產品。(2) 超寬頻是一種無線傳輸實體層技術，因其利用短脈衝方式進行傳輸，因此耗電量明顯低於現有的無線技術，其中心頻率大於 2.5GHz 者至少需要 500MHz 與-10dB 的頻寬，而中心頻率在 2.5GHz 以下者則需要至少 20%的頻寬比。因其具備高速與服務品質 (quality of service, QoS)，故較適合於多媒體應用。(3) ZigBee 是一種短距離、架構簡單、低消耗功率與低傳輸速率之無線通訊技術，網路架構具備主從 (master/slave) 屬性，並可達到雙向通信功能，因其具有低消耗功率與低成本的特性，故較能符合工業、家庭及醫學等控制與感測的要求，對資料速率和 QoS 的要求不高。

2. 無線區域網路 (WLAN)

無線區域網路即電腦透過無線網路卡 (wireless card)，結合無線寬頻數據機 (access point) 進行區域無線網路連結。無線區域網路與一般傳統的乙太網路 (ethernet) 的概念並無太大差異，只是 WLAN 將用戶端接取網路的線路傳輸部分轉變成無線傳輸之形式，但卻缺乏移動性。WLAN 是一種規格以 IEEE802.11 的短程無線傳輸技術，能在數百公尺範圍內支持網際網路接入的無線電信號，通訊技術包括「編碼」、「展頻」與「調變」等三種，其可各自相互配合發展。目前已商品化的子規格主要分為三種，即 IEEE802.11a、802.11b 與 802.11g，其中 IEEE802.11b 的規格稱為 WiFi。WLAN 網路較常使用 IEEE 802.11b 或 802.11a 規格，可提供安全、可靠、快速的無線連通性，並可利用毋需付費的 2.4 GHz 或 5 GHz 無線電頻帶，資料傳輸速率可達 11 Mbps (802.11b) 與 54 Mbps (802.11a)^[4]。表 1 為 WLAN 子規格之比較一覽表。

3. 無線都會網路 (WMAN)- WiMAX

WiMAX 屬於 IEEE 802.16 的無線傳輸規格，係於都會地區所採用的新興無線傳輸技術，其傳輸速率高達 70Mbps。若將其整合在筆記型電腦等移動型電腦設備上，一般亦可輕鬆在戶外、家裡，無線接取寬頻影音、娛樂等各種資訊。WiMAX 較目前使用之 WiFi 技術，可提供更快速且發送範圍更廣及達到更遠的距離。WiMAX 可傳達 50 公里之遠的範圍並能提供足夠頻寬給多媒體使用，解決部分銅線佈放之限制，達成寬頻 3A (anytime, anywhere, any content) 的目標，其已被視為當前取代固網最後一哩 (last mile) 之最佳媒介^[5]。

表 1 各類 WLAN 子規格比較^[4]

網路技術	制訂時間	應用範圍	使用距離(公尺)	傳輸速率	資料加密	數據傳輸	語音傳輸
IEEE802.11b	1999/9	室內	100	1~11Mbps	有	有	選項
IEEE802.11a	1999/9	室內/戶外	100/300	6~54Mbps	有	有	有
IEEE802.11g	2003/7	室內	100	54Mbps	有	有	有
IEEE802.11a+g	—	室內/戶外	100/300	54Mbps	有	有	有

目前 WiMAX 兩個主要的 802.16 標準為：(1) 802.16d，亦稱為 802.16-2004，係針對固網業務而設計；(2) 802.16e，可支援兩種模式的移動性，一方面可於大樓內部利用可攜式設備進行無線通訊，另一方面則可於步行或行進中的交通工具（可達時速 120 公里）使用無線通訊服務。但此兩種標準目前尚無法相容，未來發展趨勢係以具高度移動性的 802.16e 為主，此對於 ITS 採用 GPRS 或 3G 的無線通訊技術現況，將成為更具成本效益的替代方案。

4. 無線廣域網路 (WWAN)– 蜂巢式行動通訊

第一代行動通信系統 (1G) 為類比式的通訊技術，僅能進行語音的傳遞，可分為 AMPS、TACS…等多種技術規格。第一代行動通訊技術有很多不足之處，例如容量有限、制式太多、互不相容、保密性差、通話品質不高、無法提供數據業務與自動漫遊等。

第二代行動通信系統 (2G-GSM) 則是數位行動通信系統，主要技術規格有 GSM (含 DCS)、TDMA、CDMA，並以數位及信號處理技術為基本功能。數位電路單元為基本模組，提供以語音、簡訊與數據的通訊服務。但由於仍採用不同的技術型式，行動通訊標準不統一，用戶只能在同一技術型式覆蓋的範圍內進行漫遊，再加上第二代行動通訊系統的頻寬有限，因此數據業務的應用有限，亦無法提供高速的行動多媒體服務。

2G 網路的連線主要是採用電路交換 (circuit-switch) 方式，而一般有線網際網路上的資料傳遞則是採封包交換 (packet-switch) 的方式，此兩種不同的交換架構，導致彼此間的網路幾乎都是獨立運作，並不互相連接。但自無線封包數據 (GPRS/2.5G) 技術標準制定之後，即改變此兩種網路各自獨立的狀況。GPRS 是在現有的 GSM 網路上，加上幾個數據交換節點，蓋因數據交換節點具有處理封包的功能，故促使 GSM 網路能與 Internet 互相連接，而達成彼此共享的目標。

第三代行動電話 (3G) 主要是 CDMA 技術的延伸，其在室內或固定時，傳輸速率可達 2Mbps，步行時，傳輸速率可達 384kbps，若車行速度達 90 km/h，傳輸速率亦可達 144kbps。目前全球的 3G 技術主要分成 WCDMA 與 CDMA2000 兩大規格，中國大陸則另有 TD-SCDMA 規格。第三代行動通訊系統之目的在於整合所有第二代系統不同的服務，納入更廣泛的寬頻服務，包括語音、數據、視訊、網際資料存取以及多媒體等服務，期能與固定式通訊網路技術相容，實現全球漫遊的最終目標。3G 的特色在於數據導向

(data-oriented)，資訊包裝採數據封包方式，傳輸網路則採 IP 架構。

2.1.2 國內外應用無線通訊系統於 ITS 之概況

參考相關文獻^[6-9]與本研究之搜集整理，近年來各國無線通訊網路技術在 ITS 上的應用實例可彙整成表 2。從表中可看出，在技術和現場設備選擇上，以現行 GPRS 和 WLAN (IEEE802.11) 居多，但已有部份國家導入與 WiMAX 或異質網路之結合應用，如：GPRS+WLAN、3G+WiMAX。

表 2 各國應用無線通訊系統於 ITS 之案例

國 家	年份	計畫名稱	通訊技術	ITS 應用
1. 亞洲				
新加坡	2004	IDA(STMD)	WLAN	交通監控、大眾運輸、警政消防以及計程車
韓 國	2004	IT839(U-Korea)	3G/GPRS /RFID	車用資通系統、停車資訊系統、智慧型站牌、公車管理系統
日 本	2004	KDDI's Telematics Services	WLAN+3G	無縫隙行動網路服務
臺 灣	2004	都會區 GPRS 與 WLAN 應用於即時交通資訊整合平臺之系統規劃計畫	GPRS+WLAN	路口監視器影像傳輸、號誌控制器、車輛偵測器、資訊可變標誌及智慧型站牌無線傳輸
	2006	無線寬頻網路與 ITS 整合應用暨 ATIS 資訊系統建置計畫	3G+WLAN	號誌控制器、車輛偵測器、資訊可變標誌及移動載具資訊顯示
2. 美洲				
美 國	2004	MTA's ATMS Project	WLAN	智慧公車系統
		NYC Wireless	WLAN	無線公共安全資料傳輸、無線車輛自動定位系統、無線緊急救援系統、無線交通控制系統、停車資訊導引系統、重要路口交通監控
加拿大	2004	WiTec Alberta	WLAN	支援移動式顯示看板，提供路況即時消息或告知剩餘車位
3. 歐洲				
英 國	2004	SMARTLINK	WLAN	提供車輛偵測器與交控中心的即時通訊
德 國	2004	巴伐利亞交通通訊計畫	WLAN+3G	無線車輛自動定位系統、無線緊急救援系統、無線交通控制系統、停車資訊導引系統、智慧型可變標幟、大眾運輸電子票證
法 國	2005	WCAM	WLAN	搭配 WLAN 技術，使 CCTV 可離線監視，亦可提供即時資訊
荷 蘭	2006	S@TMAX 計畫	WiMAX	將 802.16d 與 802.16e 應用於車輛資通 (Telematics) 平臺
義大利	2007	Trento 實驗計畫	WiMAX	以 WiMAX 為主的生活應用實驗計畫，其中包括測試車載生活資訊服務的無線傳輸

資料來源：本研究整理

2.2 臺北市交通現場設備之資料傳輸概況

臺北市目前有許多前端現場設備，其中大部分以輔助先進交通管理系統 (advanced traffic management systems, ATMS)、先進大眾運輸系統 (advanced public transportation systems, APTS) 及先進旅行者資訊系統 (advanced traveler information systems, ATIS) 等服務項目為主，主要功能在於資料蒐集、處理、發佈或輔助交通控制與管理之用。在有關現場設備通訊協定方面，臺北市係以交通部頒布的 92 年版都市交通控制系統通訊協定 (目前以都市交通控制系統通訊協定 3.0 版稱之) 為主^[10]。每一種終端設備皆須有相同的協定，始能成功達成彼此之間傳輸資料的目的。通訊協定雖有多個層次，但大致可分為兩個部分：資訊內容碼及通訊外框碼，如圖 2 所示。所欲傳送的資訊內容 (data) 被包在頭尾兩個通訊碼之內，即稱為外框碼。為使資訊內容 (data) 能在無線網路系統元件中傳送順暢，則必須處理外框碼的問題。

頭碼	資訊內容碼：Data	尾碼
----	------------	----

圖 2 通訊協定內容格式示意圖

在系統規劃上，對不同通訊協定的處理方式，一般是將通訊外框碼隱藏，進行一對一的轉換，或是先將許多不同的通訊外框碼集中處理後，統一格式再傳送至控制中心。參照相關文獻^[6,7]以及與實務經驗豐富之交通管理人員訪談結果得知，絕大多數的交通現場設備之通訊命令係依操作需求而傳送，每一命令傳送頻率並不同，且大多屬於隨需 (on demand) 指令，若有週期性的回報則皆依據通訊協定之通訊命令設定之。因此為精簡計算流程起見，本研究乃依據相關通訊協定^[10,11]計算各現場設備之資訊量，而僅限於資訊層並未考慮網路層與傳輸層等資訊量。另外，針對每一交通現場設備所傳送之資訊量，除了計算固定週期之傳送量外，亦應考慮各現場設備於同一時間點上同步傳送資訊之極端情形，前者可稱為正常情形之最小通訊量，後者則稱為極端通訊量，其可分為上行與下行兩種。以下即針對各現場設備之運行機制、通訊格式與資料量大小進行說明。

2.2.1 臺北市交通控制設施

臺北市 ATMS 之主要控制流程如圖 3 所示。ATMS 所需的路側設施係以號誌控制器、車輛偵測器、資訊可變標誌為主，運作流程為車輛偵測器在現場擷取資料，經由線路傳回交控中心，交控中心依據現場資料，再參考歷史資料檔案即對路口進行交通控制與管理，如下達號誌控制器的命令，或將資訊傳至資訊可變標誌。

1. 號誌控制器

號誌控制器目前在臺北市總數約有 1700 組，每日正常使用約有 1300 組。其中以專線連接的數量約 1500 組，未連線之獨立運作部分約 200 組。其主要的功能包括設定、顯示、

紀錄、異常處理、狀態監視、連鎖、控制、診斷、自動回報、其他等功能。然因地區性之需求不同，目前可概分為臺北市、高雄市及其他縣市等三種控制器類型，臺北市因交通特性異於其他都市，故控制功能尚增加調撥車道控制、公車專用車道觸動控制、高架快速道路下匝道號誌連鎖控制等需求，觸動功能則增加行人觸動控制、左轉專用車道、支道觸動功能及異常狀況之運作需求；在模組單元方面，共分為電源供給、處理器、燈號驅動、故障偵測、面板顯示與通訊等單元。

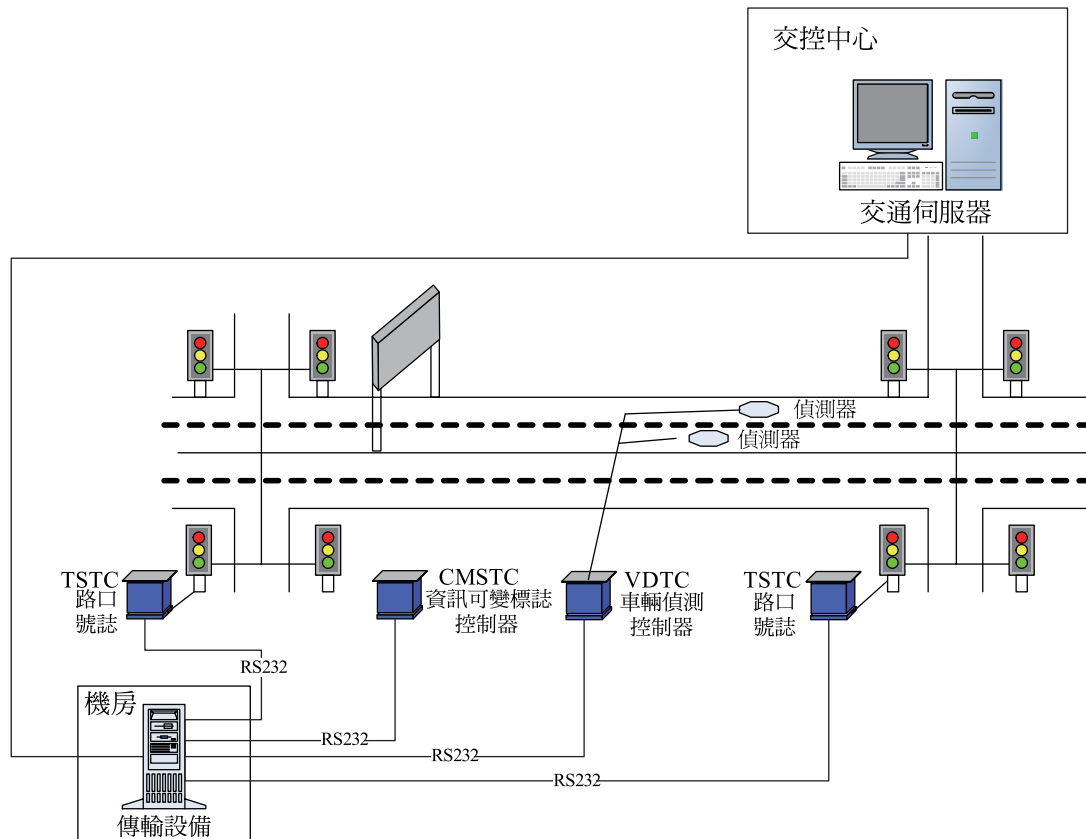


圖 3 目前交通控制各現場設備主要工作流程^[10]

號誌控制器的通訊碼共有 107 條，但除了表 3 中訊息碼說明之三條指令為常態需求，其餘皆為特定需求，因此其極端上行通訊量為 811 Byte，極端下行通訊量為 975 Byte。

2. 車輛偵測器

車輛偵測器依其感應方式的不同，在選用時一般有：偵測性質、環境條件及準確度要求、外觀、造價等考量因素。臺北市主要以環路線圈 (loop)、影像式及三合一的方式為最多，車輛偵測器主要負責蒐集車流特性資料，其包含感測器與終端控制器兩部分。車輛偵測終端控制器除銜接前端感測器之外，並負責車流資料的運算處理以及與交控中心的中央

控制器進行通訊連線，將所蒐集之偵測資料即時或定時傳回交控中心之資料蒐集與處理單元。車輛偵測器的通信訊息碼共有 66 條，其極端上行通訊量為 597 Byte，極端下行通訊量為 522 Byte，主要的指令碼說明如表 3 所示。

3. 資訊可變標誌

資訊可變標誌是交控中心與設置於道路側之終端控制器之間進行資訊傳遞，將欲顯示的中英文資訊或簡單圖案顯示於標誌板上。一般均設置於市區平面道路、市區道路進入快速道路前及快速道路上。資訊可變標誌除了顯示前方路況資訊供用路人參考外，並可配合警示用閃爍警示燈提醒用路人調整其行車路線或採取因應的措施，而有助於行車順暢。另資訊可變標誌亦可配合顯示道路交通安全政令宣導之資訊。資訊可變標誌的通信訊息碼共有 66 條，其極端上行通訊量為 25041 Byte，極端下行通訊量為 25095 Byte，主要指令說明如表 3 所示。

表 3 臺北市交通控制設施主要指令碼^[6,7]

指令碼	指令用途	資訊欄 (Byte)	資料量 (Byte) 【資訊欄+前後碼框】	傳送 週期	發送端
號誌控制器					
0FH+04H	現場設備回報狀態	4	14	1 分	現場
5FH+03H	主動回報步階轉換之資料	10	20	1 秒	現場
5FH+0FH	重複傳輸（回報）路口號誌控制之燈態狀態	5	15	1 秒	現場
車輛偵測器					
0FH+04H	現場設備回報狀態	4	14	1 分	現場
6FH+0FH	重複傳輸 VD 資料	18	28	1 分	現場
資訊可變標誌					
0FH+04H	現場設備回報狀態	4	14	1 分	現場

2.2.2 公車動態資訊顯示系統

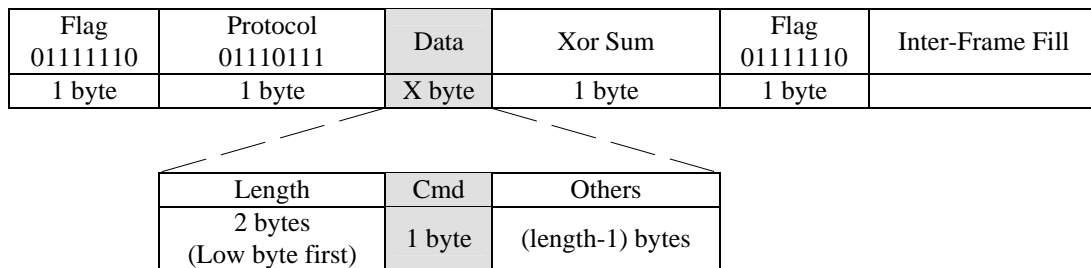
公車動態資訊顯示系統是資訊、通訊及車輛定位等技術的整合應用，由圖 4 可知系統業者藉由通訊及定位技術所得之公車即時資訊，將此資訊彙整後即傳至每一個智慧型公車站牌並顯示給每一位正在候車的民眾，此亦可提供公車業者作為排班調度的依據。一般民眾可透過網際網路得知公車路線、班表與行車位置等。公車動態資訊顯示系統包含兩種最重要的前端設備，分別是移動式的車機及固定式的智慧型站牌。

1. 車機

就車機而言，其主要分為六項元件：無線通訊系統、車輛定位模組、擴充通訊埠、行

表 4 車機傳輸格式^[11]

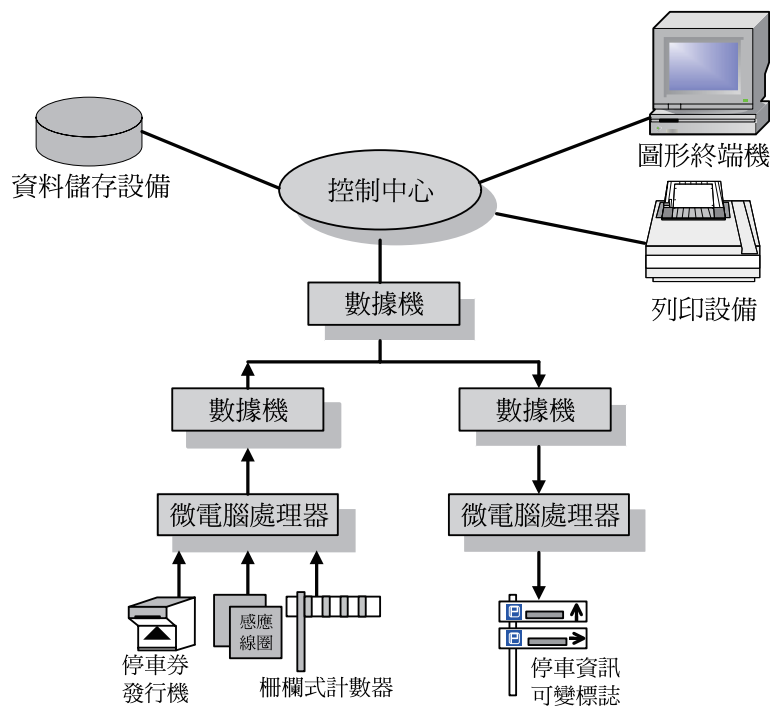
Command	Data	Check Sum	說明
01	Cmp,LLI,X,Y,V,D	Sum(String) 資料長度 XX(Byte) 包括\$,*,逗點	1.01：訊息為各車輛之行車狀況 2.Cmp (String)：通訊業者代碼 (XXX, 3byte) 3.LLI (String)：車輛 Modem 代碼 (XXXXXXXX, 8byte) 4.X (String)：車輛經度座標 (XXXXXXXX, 9byte) 5.Y (String)：車輛緯度座標 (XXXXXXXX, 8byte) 6.V (String)：車輛速度 (XXX, 3byte) 7.D (String)：車輛方位角 (XXX, 3byte) 《各代號間請以“，”區隔》

圖 5 智慧型站牌封包格式示意圖^[11]

2.2.3 停車資訊顯示系統

臺北市停車資訊顯示系統多集中於信義區，顯示立桿含顯示面板，可分為靜態顯示與動態顯示兩種。立桿型態又可分為柱立式與懸臂式兩類，其動態顯示看板以周遭區域的停車場為主，顯示內容為各停車場剩餘的車位格數，但某些顯示看板則是以周遭區域的停車場剩餘格數加總顯示，目前此類傳輸尚無任何統一格式（如圖 6 所示）。

上述各項現場設備之資料傳輸量，可整理成表 5。若使所有的現場設施在同一時間啟用，則極端的上行與下行傳輸值是無線通訊網路選定之重要決策依據。由於目前停車資訊系統方面尚無統一的通訊格式，因此未填入該傳輸資料量。

圖 6 停車資訊顯示流程圖^[7]表 5 各類交通資訊傳輸量概述^[7]

服務類別	項 目	正常使用數量	極端上行通訊量 (byte)	極端下行通訊量 (byte)
交通控制設施	號誌控制器	1300 組	1,054,300	1,267,500
	車輛偵測器	167 組	99,699	87,174
	資訊顯示面板	60 組	1,502,460	1,505,700
公車動態資訊系統	車機	500 組	19,500	N.A.
	智慧型站牌	80 組	N.A.	158,400
停車相關資訊系統	停車資訊顯示面板	47 組	N.A.	N.A.

註：號誌控制器的極端上行通訊量為：瞬間最大同時通訊量 (811 Byte) × 組數 (1300) = 1,054,300，其餘類推；N.A. 表示現況尚無此上行或下行之需求。

2.3 通訊網路方案評選之相關文獻

不同通訊技術適用於不同需求的接收端，在處理多項運具與用路人之間的資訊蒐集、交換與發佈工作時，即須審慎評選最適之通訊網路系統，以達迅速、便利、低廉之多元目標。目前有關通訊網路方案評選之相關文獻，簡述如下：

劉育儒^[12]指出定位與通訊是先進大眾運輸系統之兩項基本而廣泛應用的技術，故應以不同公車定位與通訊技術之組合方案進行評估。方案評估需考慮不同定位與通訊技術的特性、實施環境因素、系統成本等，以層級分析法 (analytical hierarchy process, AHP) 設定評估層級，並根據可行之替選方案建立其評估架構，經由專家學者所填答之問卷來計算各評估準則之權重，再運用質化與量化準則建立評估模式，最後針對臺北市與新竹市已有的示範計畫進行替選方案之評估與比較，以驗證評估架構的合理性。

吳欣易^[13]發現整個無線通訊網路規劃問題乃是由行動電話交換機房配置、基地臺配置、功率控制及頻道配置等子問題所組成。在訊號對雜訊比、使用者需求及基地臺容量等限制條件下，同時考慮此四子問題而求解無線通訊網路之最佳規劃設計。此研究確認建置一個無線通訊網路時所產生的成本，主要包括取得基地臺的土地使用權及建置基地臺的成本、行動電話交換機房的建置成本、連接基地臺與交換機房的成本以及在特定地區使用特定無線通信頻譜的權利金等。除此之外，該研究提出一個數學規劃模式來決定最小建置成本的無線通信網路配置，並發展數個以拉格蘭日鬆弛法為基礎的演算法模組進行解題，模組包括：行動電話交換機房配置、基地臺配置與功率控制及頻道配置。

鐘世忠等^[14]認為 ITS 九大服務領域，無論前端路側設備之資料蒐集、中端之資料交換以及後端資料之命令傳送與管理，未來皆須納入無線通訊網路之考量。ITS 服務之實際通訊量與相關單位之規劃需求將予以量化，以評估不同的無線通訊方案。ITS 通訊的評估架構係以穩定傳輸、完整涵蓋與合理收費為準則。以 APTS 為例，其通訊總需求係將所有路線之通訊需求加總，通訊需求則是單位時間平均傳輸次數乘以每筆傳送之封包大小，並納入通訊系統通訊容量之限制式，若所有路線之實際傳輸量大於通訊系統通訊容量，則可推論該通訊系統不可行。

謝尚行^[15]認為 ITS 涵蓋範疇相當廣泛，往往會因其應用範圍之不同而產生不同之通訊需求，因此選定之通訊網路亦有所差異。若無法對 ITS 應用特性評選出適當通訊網路，則將對 ITS 整體效能產生不良影響。以往的研究主要是以通訊需求為出發點，藉由對各通訊系統的傳輸資料量與頻寬分析來進行模式建構，然後再以此來判斷各通訊系統於不同路網特性的適用程度。然而此類方法並無法考量車輛於路網中的行駛特性，故提出系統模擬的方法，針對大眾運輸車輛行駛特性，探討資訊於不同通訊網路之傳輸行為，最後以平均資料傳輸時間、阻斷率及跳站機率三項指標來評估各通訊網路之效能。

鐘于婷^[16]探討在不同通訊網路特性、限制、成本等前提下，如何選定適用之通訊網路以滿足不同種類之交通資訊需求。交通資訊內容概分為用路人須即時獲得之普遍資訊及符合個人化需求之資訊兩種，其分別利用網路群播及個人化互動型態方式傳送。此研究係運用 AHP 法設計出專家問卷並進行調查，以獲得選用各無線通訊網路適用時機之優先順序，作為相關業者提供應用服務之參考。

王嘉宏^[17]認為通訊網路正處於一個巨大的變革狀態，電信網路將與數據網路整合成一個單一的 All-IP 網路，以支援所有網路應用服務。欲達到整合型網路的理想，仍有許多困難尚待克服，而服務品質問題是其中最關鍵的問題之一。此研究是將網路規劃分成兩個

階段，第一階段是在一筆給定的預算下，以成比例的方式去分配資源給各不同等級而建置網路上的頻寬，使各等級能依其需求取得適當的頻寬。第二階段則是在第一階段已完成的基礎下，進行路徑規劃，指派新進入的使用者到一條較好的路徑，在滿足此使用者的延遲時間要求下，使此系統的壅塞程度越小越好。

從前述文獻回顧可知，通訊網路評選的方式係採取不同的評估方法，其中以量化的數學規劃法居多。然而，經由文獻回顧可發現數學規劃法較傾向方案既定後的執行規劃策略，在方案少且已知的情形下，大部分數學規劃法皆應用在最短路徑求解最大利潤或服務的最適化問題。多準則決策方法則是主張在許多不同方案下做出適當的決策，尤其現實世界的問題同時具有質化與量化的屬性，多準則決策方法可對不同性質的問題而進行設計。

由於通訊網路評選具有傳輸率與涵蓋範圍等量化特性，亦具有資料安全性與系統成熟度的質化概念，若單純使用量化或質化之評估方法皆有偏頗之虞。從前述文獻與多準則評估法之相關文獻（如表 6 所示）得知，在交通現場設備之無線通訊網路評選課題上，迄今尚缺乏較合適之評估方法。有鑒於此，本研究擬先進行不同決策方法之分析比較，以提高最佳方案的確認程度，再進行實例驗證，以不同屬性之決策方法來選定無線通訊網路之最佳方案。

表 6 多準則評選方法論文獻比較表^[18]

作 者	篇 名	方 法	應用對象
Triantaphyllou and Lin, (1996)	Development and Evalution of Five Fuzzy Multiattribute Decision-Making Methods	1.FWSM 2.FWPM 3.FAHP 4.FRAHP 5.FTOPSIS	無
鄭博文(1997)	以競值模式比較四種多準則決策方法之比較—以醫院選擇為例	1.分析層級法 2.ELECTRE III 3.多準則效用理論 4.模糊多準則決策	醫院
陳忠平(2000)	多屬性決策方法之分析比較	1.TOPSIS 2.SAW 3.AHP 4.灰關聯 5.ELECTRE	淡海 新市鎮
邱永德(2003)	多重品質特性實驗設計模式之建立	1.模糊 TOPSIS 2.模糊灰色關聯	無
褚先忠(2003)	語意環境下製造彈性評估之研究	1.模糊評等方法 2.模糊排序方法	無
劉佳鑫(2004)	模擬多屬性決策方法之模擬分析比較	1.模糊簡單加權 2.模糊層級加權 3.模糊 ELECTRE 4.模糊 TOPSIS 5.模糊灰色局勢	電腦模擬

三、多準則評估法

3.1 指標篩選

在準則指標篩選的方法上，有模糊德菲法、專家平均點法、灰色關聯法與灰色統計法。專家平均點法求出的權重大小不具有客觀性，模糊德菲法之平均數概念亦較易受極端值的影響。本研究之指標選取將採取能尊重大多數專家的意見的灰色統計法，因灰色統計評估值能藉由白化函數的生成，可消除平均數受極端值的影響。本研究認為由於不同的專家意見均受到相同的尊重，群體決策的結果與參與決策的專家將直接產生，而不受最終決策者主觀感受的影響。灰色統計法係以灰數的白化函數生成為基礎，將一些具體數據按某種灰數所描述的類別進行歸納整理，其任務是將按灰類作白化函數生成，以確認各決策群體對各決策方案所提出的白化決策值，從整體來說是屬於何種灰類。灰色統計法之操作，首先須給定決策量白化值以及決策灰類的灰數與其白化函數，然後求出決策係數及決策權重，最後再決定決策行向量之後判斷灰數。

3.2 權重訂定

屬性權重求算方式，可根據決策者的主觀意識求得或由評估矩陣量測值所求得，可分為主觀權重與客觀權重^[19]，以及整合決策者之主觀權重及客觀權重而成的折衷權重^[20]。主觀權重是依據決策者主觀認定的偏好而產生，其權重值較為穩定；而客觀權重則由實際的績效值求算出，因此當績效值有所變動時，權重值亦可能隨之變動，具有不穩定性。Hwang 及 Yoon^[20]提出折衷權重的觀念，即是整合前述的主觀權重法與客觀權重法，主要目的是同時考量決策者之主觀權重與客觀權重，以決定屬性權重值，因此該方法的可靠度較主觀權重與客觀權重法為高。

3.3 方案評選與比較

3.3.1 評估方法

多準則評估法可概分為質化、量化與綜合等三種，但尚未有明確之適用對象及範圍。因此本研究擬先就質化、量化與綜合等評估法進行比較，藉以分析各方法之適用性，再配合模糊理論來推論各專家的評估決策過程而找出最適的無線通訊網路方案。本研究之方法概念流程如圖 7 所示，各方法則簡述如下：

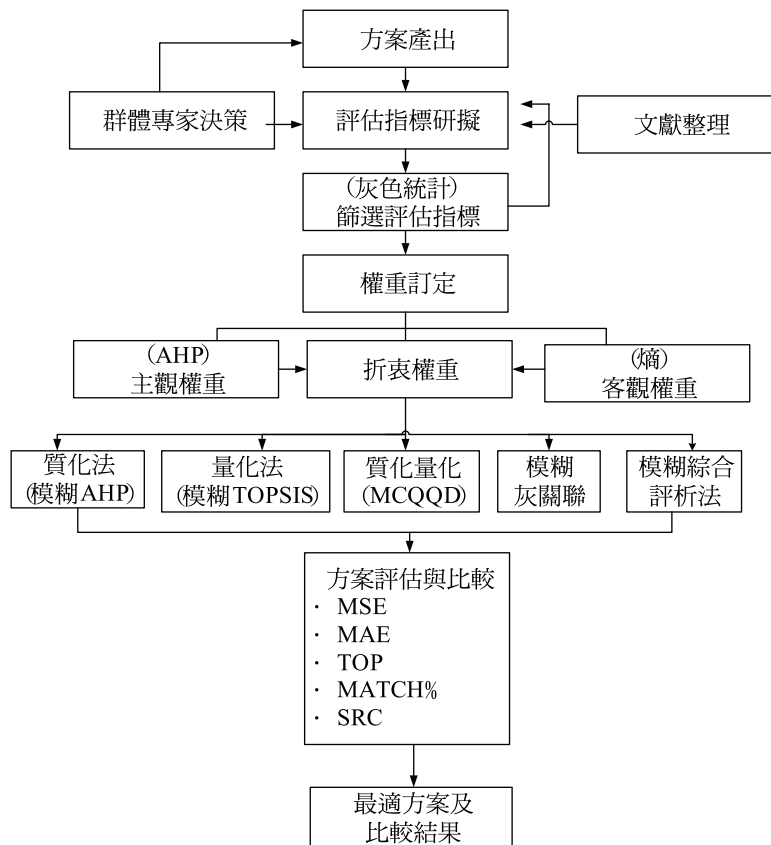


圖 7 方法流程圖

1. 模糊層級分析法 (fuzzy analytical hierarchy process, FAHP)

Buckley^[21]認為層級分析法在準則評價上，並無法適當的呈現評估者的主觀認知與判斷，因此結合模糊理論與層級分析法而提出模糊層級分析法，亦即結合模糊理論解決主觀認知判斷的模糊性以及層級分析法易於分析瞭解問題本質等優點，以反映真實環境下決策分析所遭遇的問題。

2. 模糊理想解類似度偏好順序評估法 (fuzzy technique for order preference by similarity to Ideal solution, FTOPSIS)

TOPSIS 法的基本觀念乃在於先界定理想解 (positive-ideal solution) 與負理想解 (negative-ideal solution)。所謂理想解是各替選方案效益面屬性之評估值最大，成本面屬性之評估值最小者；而負理想解是各替選方案效益面屬性之評估值最小，成本面屬性之評估值最大者。在選擇方案時，可由相對接近度來判定，是否距離理想解最近而距離負理想解最遠。依循原有的 TOPSIS 觀念，本研究係參考 Triantaphyllou 及 Lin^[22]對 TOPSIS 改良的 FTOPSIS 法。

3. 質化量化多準則評估法 (multicriteria evaluation with qualitative and quantitative data, MEQQD)

此方法為荷蘭學者 Voogd^[23] 於 1983 年所提出，此方法不但可考慮質化準則 (即無法量化準則)，又可兼顧量化準則 (即可數量化的準則)，對於目前規劃者所面臨的複雜評估問題，其適用性相當高。質化與量化多準則評估法處理的主要關鍵在於對優越程度量測函數、標準化函數及相對評估函數之假設，不同的函數型態假設，即構成方法上的差異。Voogd 提出相減加總法、相減間隔法、相加間隔法等三種處理技術，以減少此種差異。

4. 模糊綜合評判 (fuzzy synthetic decision, FSD)

在無線通訊網路系統績效評估中，各評估指標的模糊權重與模糊績效達成值，必須透過模糊數的運算加以整合，才能求得整體目標的模糊績效值，此即模糊綜合評判的過程。由於各方案之綜合評判結果乃為一模糊數，難以進行優劣比較，因此若要對各方案進行排序，不能僅以數字進行比較，而須以模糊排序方法將所得到的模糊數進行非模糊化 (defuzzification)。「重心法則」可使問題化繁為簡，同時毋需加入決策偏好，故本研究擬採用重心法則求取各方案之非模糊值。

5. 模糊灰關聯 (fuzzy grey relational analysis, FGRAY)

灰色系統理論是由中國大陸學者鄧聚龍教授^[24] 於 1982 年所創，灰色系統理論是一門研究少數據、不確定性的科學，主要是對系統模型之不明確及資訊不完整之狀況，將系統各個影響因子進行關聯分析及模型建構，並藉由預測及決策分析來瞭解系統^[25]。

3.3.2 比較及相關性

有關模糊多決策分析之衡量準則，其中前四個衡量準則為離散程度的指標，數值越小表示離散度越小越接近，而 TOP 與 MATCH 則屬於一致性指標，數值越大表示一致性越高越接近，Spearman 等級相關係數 (spearman's rank of correlation, SRC) 屬於相關性指標，數值越大表示相關性越強越接近，分述如下：

1. 排序結果的誤差均方 (mean squared error, MSE)

本研究分別針對各種決策方法評估結果的排序結果求算 MSE 來衡量其變異情形，此為離散度的衡量指標，其衡量值越小越好，其計算如式 (1)：

$$MSE = \frac{\sum_{j=1}^m (n-1)s_j^2}{n-m} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_{.j})^2}{n-m} \quad (1)$$

2. 排序結果的平均絕對誤差 (mean absolute error, MAE)

另一種常用衡量變異情形的指標為 MAE，此方法與 MSE 最大的差異在於 MSE 由於誤差須取平方，因此較易受大的預測誤差所影響。本研究除採用 MSE 之外，亦針對各種

決策方法評估結果的權重與排序結果求算 MAE 來衡量其變異情形，此亦為一衡量離散程度的準則，其衡量值亦越小越好，其計算如式 (2)：

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |x_{ij} - \bar{x}|}{n} \quad (2)$$

3. 最佳方案之一致性 (top rank matched count, TOP)

本研究分別比較各方法選取最佳方案的異同，若兩種方法所選取之最佳方案為相同，則兩方法在選取最佳方案方面的結果乃為一致。然後綜合整理各方法選取最佳方案一致的次數，進行敘述性統計，並計算最佳方案之一致性比例，以瞭解各方法選取最佳方案的差異情形。此為一致性衡量準則之一，其衡量值越大越佳。

4. 排序結果相同之方案數比例 (MATCH%)

本研究分別比較各方法最後排序的結果，進行敘述性統計，計算最後排序結果相同之方案數比例，排序結果完全相同則 MATCH%=1。此為另一種一致性之衡量準則，其衡量值亦越大越佳。

5. Spearman 等級相關係數 (spearman's rank of correlation, SRC)

本研究以 Spearman 等級相關係數來檢定各方法之評估結果及同一方法使用不同之屬性權重，以確認所得之評估結果是否有顯著正相關性，其衡量值越大越佳，SRC 之計算如式 (3)：

$$r = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

等級相關係數 r 一般介於 -1 至 1 之間。若 $r = 1$ ，則表示兩變數之等級差距完全一致，若 $r = -1$ ，則表示兩變數之等級差距完全相反；最後，可利用 t 檢定來驗證求得之等級相關係數是否顯著，其計算如式 (4)：

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} \quad (4)$$

本研究將分別採前四種離散指標數值的平均值、TOP 與 MATCH% 衡量指標的平均值及 SRC 指標來分析各多準則評估法的接近度，並以 0.05 之顯著水準檢定各多準則評估法之結果，並嘗試整理出規則，以供決策者參考。

四、問卷設計與調查

4.1 研究設計及資料處理流程

由參考文獻^[6,7]中得知，交通主管單位基於易於安裝與維護簡便之立場，對於現場設備大多要求內建式的無線通訊模組，導致設備提供廠商傾向於研發或代理具備嵌入式(embedded)無線通訊模組之現場設備，因此本研究在訂定評估準則時，即未將現場設備之無線通訊安裝難易程度列入考量。根據文獻回顧與專家初步訪談結果，本研究擬定之評估架構如圖 8 所示。由內往外，最內圓心層為本研究之研究目的一臺北市現場設備之最適無線通訊網路方案；中間四分之一圓形層為達成目標的評估衡量構面，分別為功能面、品質面、成本面與系統面；最外圍長條形層則為衡量構面主要的質化與量化準則。本研究擬定的方案概可分為三類，如表 7 所示。

表 7 通訊網路評選方案分類

無線行動通訊	無線區域／廣域網路	混合無線網路 (mesh network)
方案一：2.5G(GPRS) 方案二：3G(CDMA) 方案三：3.5G(WiBro)	方案四：WLAN(802.11 a/b/g) 方案五：WiMAX(802.16-2004)	方案六：雙網(2.5G/WLAN) 方案七：三網(2.5G/3G/WLAN) 方案八：四網(2.5G/3G/WLAN/WiMAX)

資料來源：本研究整理

本研究首先以功能、品質、成本與系統四個層面為基礎，擬定臺北市現場設備之無線通訊網路評選架構；然後委請專家學者予以篩選並以灰色統計篩選出重要指標；再藉由權重評估、質化及量化指標績效值之計算，最後將權重值與各指標績效值以不同多準則方式，進行方案評估。圖 9 為本研究之問卷資料流程處理示意圖。

本研究依序設計兩階段問卷，分別為「第一階段—準則篩選問卷」及「第二階段—權重及質化準則評估問卷」。在第一階段的問卷中，由於各評估準則的適從性不一，因此第二階段將從第一階段專家篩選過後的準則中，建立質化與量化指標，其中量化指標績效值係取自實地測試及調查結果(如文獻[8,9])。至於所邀之學者專家名單，學術單位係以北部擅長運輸管理、電信與資訊相關領域之大學教授為主，政府單位係以臺北市交工處、公車處與停管處之業務直接管轄人員為主，產業界則以電信業者、ISP 網路業者及電子量測公司之技術專家為主，如表 8 所示。兩階段問卷發放工作皆以親訪與電子郵件等方式完成。

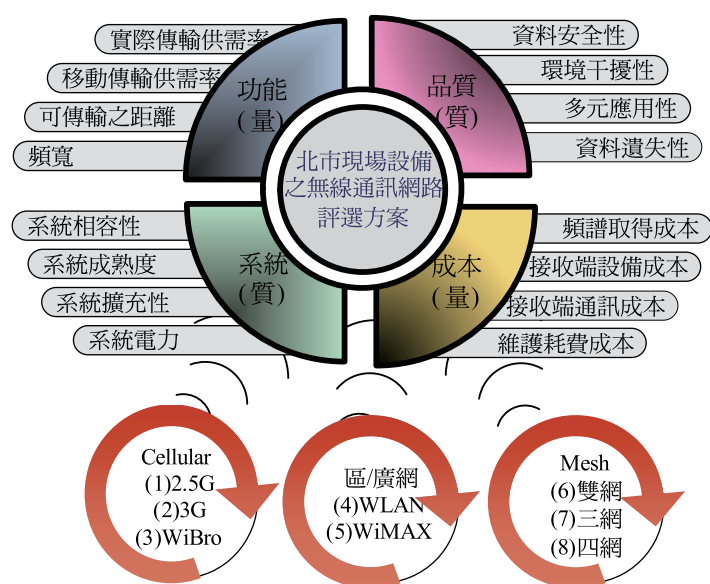


圖 8 本研究之評估架構

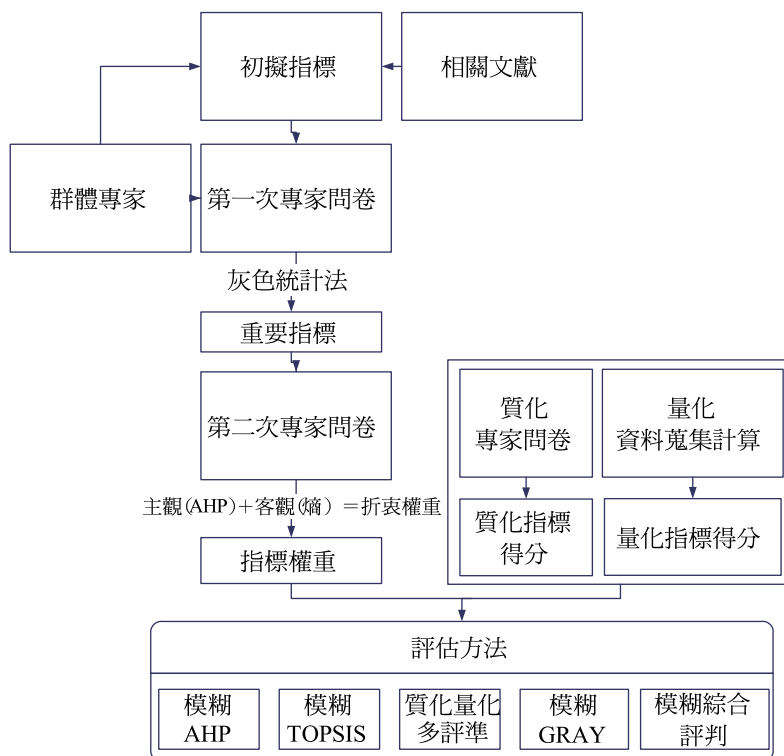


圖 9 問卷資料流程處理

表 8 學者專家領域分布

領 域	人 數	專長領域
學術單位	12 人	運輸、電信與資訊相關系所
政府相關單位	10 人	運研所、電信總局、北市交工處、公車處與停管處
產業界	18 人	電信業者 (中華電信、遠傳、臺灣大哥大等)、ISP 網路業者 (安源、Seednet 等)、電子量測 (電子檢驗中心、NEC 等)

4.2 各構面及準則變數操作定義

本研究係以「功能」、「品質」、「成本」、「系統」四個層面來進行交通現場設備之無線通訊網路評選。各層面之評估準則說明如下：

(一) 功能層面 (C1)

此一層面表示無線通訊技術好壞與強弱的差別，皆為量化指標，包括：實際傳輸供需率 (C11)、移動傳輸供需率 (C12)、可傳輸之距離 (C13) 與頻寬 (C14)。

1. 實際傳輸供需率 (C11)：單位時間內，計算將資訊傳送到接收端皆為固定點的資料傳送速率，單位是位元每秒 (bps)，其值越大代表傳送的信號越準確及傳送的資訊越多。本研究設定此準則為量化指標，若以蜂窩式行動通訊而言，其 2.5G 可達 171.2kbps，但實際大約只有 30~40kbps；WLAN 與 WiMAX 的傳輸率，前者 54Mbps 而後者可達 75Mbps，但實際傳輸僅達一半左右。WiBro 係結合 HSDPA 與 IEEE802.16-e 技術，其傳輸率可達 14Mbps。
2. 移動傳輸供需率 (C12)：傳送或接收端任一者為移動點的資料傳送速率，單位是位元每秒，其值越大代表一定速度下可傳輸的資訊最多。一般依照移動速率大致分為三個等級，分別是固定式、步行狀態和車行狀態。固定式相當於實際傳輸率，因此所謂的移動傳輸皆以步行或車行狀態的標準為規範。本研究設定此準則為量化指標。2.5G 在步行速度的表現為 128kbps，3G 則可達 384kbps；WLAN 與 WiMAX，因其設計本為固定點式，基本上在單向實測中以步行狀態及車速 40 km/h 時尚可順利傳輸資料。WiBro 原本即是一種提升移動性的傳輸率而發展出的新通訊技術，具有 14Mbps 的潛力。
3. 可傳輸之距離 (C13)：電波傳輸資料，因為功率大小、強弱以及空氣中訊號衰減，導致每一通訊技術皆有電波最遠可達的距離。本研究設定此準則為量化指標。2.5G 與 3G 分別有 10 公里與 15 公里之遠，WLAN 與 WiMAX 可分別達 100 公尺與 48 公里，WiBro 則僅有 5 公里。
4. 頻寬 (C14)：頻寬為發射機與傳輸媒介的本質將傳輸信號侷限於某一頻率範圍稱為傳送信號的頻寬，單位是週每秒或是赫茲 (Hz)。本研究設定此準則為量化指標。2.5G 具有 200kHz 而 3G 和 WiBro 皆有 5MHz，WLAN 與 WiMAX 則有 20MHz。

(二) 品質層面 (C2)

此層面皆代表在資料傳輸過程中的好壞狀態，由於通訊技術會產生系統不穩定或斷訊等現象，一般較難以量化，因此本研究乃設定此為質化指標，包括資料安全性 (C21)、環境干擾性 (C22)、多元應用性 (C23) 與資料遺失性 (C24)。

1. 資料安全性 (C21)：對通訊安全而言，基本上包含「用戶身份的識別」、「訊息的完整性」、「訊息的機密性」與「不可否認性」等四項特性，因此對各系統的安全性係以各專家提供的績效值進行處理。
2. 環境干擾性 (C22)：係用於判定各系統在執行環境中，因各介質穿透力之強弱影響程度。
3. 多元應用性 (C23)：係用於判定各系統之額外附加功能，如語音、影像、定位等，此對現場設備可提供更多不同於現況的服務。
4. 資料遺失性 (C24)：係用於判定各系統在傳輸過程中之資料遺漏程度與回報速度。

(三) 成本層面 (C3)

成本估算一直是通訊網路評選極為重要的項目，但在實務上，往往因某些新技術尚未成熟，而無完整的數據資料。因此本研究將接收端設備成本與接收端通訊成本視為可量化項目，而頻譜取得成本與維護耗費成本則以質化項目處理。

1. 頻譜取得成本 (C31)：電波的資訊交換在特定頻段中完成，然而頻段是有限的，因此在某些頻段下為維護品質，即需受到管制且須付出一定的金額才能獲取執照使用權。根據過去 3G 執照競標的資料，共有五家公司出線，分別為遠致電信 (新台幣 101.69 億元)、聯邦電信 (新台幣 77 億元)、臺灣大哥大 (新台幣 102.81 億元)、中華電信公司 (新台幣 101.79 億元)、亞太行動寬頻公司 (新台幣 105.7 億元)。WLAN 使用的頻段則為免費的 2.4GHz，WiMAX 亦以 3G 模式進行執照競標，目前已發放南北兩區各三家，總共六家的營運執照。
2. 接收端設備成本 (C32)：一般現場設備接收無線訊號係加裝無線接收器，然而接收不同的無線訊號所需的無線設備亦有所差異，因此其單位成本亦不同。目前外接式通訊設備之市面價格約在新台幣 990~1000 元左右。
3. 接收端通訊成本 (C33)：通訊費用為重要的變動成本之一，其計算方式有依量定價或以固定價格但限量者。目前許多電信業或 ISP 業者對於大量且長期的使用者皆推行每月固定價且不限量的「吃到飽」方案，例如 2.5G 每月以新台幣 1000 元不限量方式優惠，3G 亦有 750 元不限量的方案，WLAN 則有業者提出每月 399 元不限量的費率方案。
4. 維護耗費成本 (C34)：維修成本大致包括維修所需的時間與財務成本，依其通訊技術不同，所需的維護成本亦不同，此項係依專家意見給予相對績效值。

(四) 系統層面 (C4)

系統代表單一通訊技術整體的關聯性，因此設定為質性指標，包括系統相容性、系統成熟度、系統擴充性與系統電力。

1. 系統相容性 (C41)：此表示不同通訊系統在不同頻段傳送時，其技術性的交換與支持的困難程度。

2. 系統成熟度 (C42)：此表示目前各系統佈設基地臺數量及 ISP 業者之經營規模大小，以及系統整體的完整性。
3. 系統擴充性 (C43)：此表示未來系統的潛力和現場設備增加可能會造成各系統負擔的嚴重程度。
4. 系統電力 (C44)：各系統在使用時，須消耗電力之多寡，此將影響現場設備對於額外提供電力支援之需求。

綜合上述，本研究將各層面之量化與質化資訊彙整成附表 1。

五、方案評選

5.1 指標篩選與權重訂定

指標篩選為評估過程中重要的步驟。本研究從學者專家所提供之專業意見及績效資訊，獲取專家指標篩選績效值後，即應用灰色統計法，依據六個等級^[26]將專家回應值轉化成重要程度敘述，如圖 10 所示。

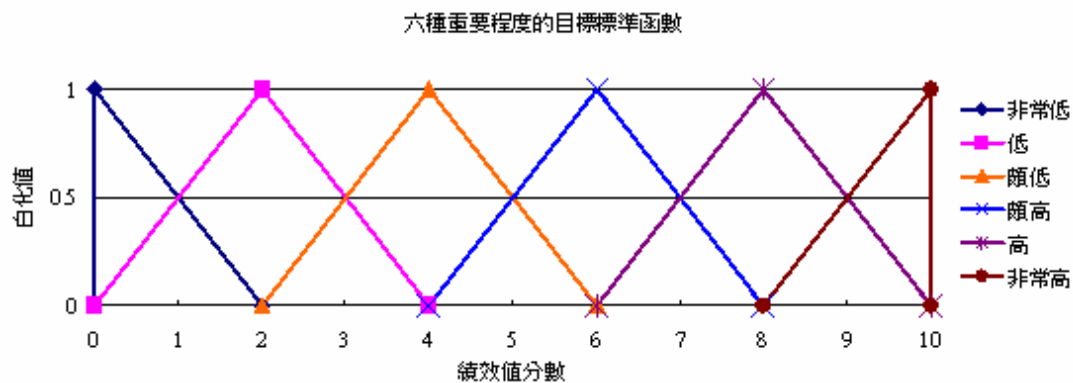


圖 10 六種重要程度的目標標準函數

在計算灰色統計績效值後，從其中取最大者，並參照其六個灰色統計的重要函數。從圖 11 與圖 12 可看出，本研究初步擬定之指標結果皆相同，績效值均為「高」的重要函數。雖 A1 方案 (GPRS) 的灰色統計值為「頗高」，較其他方案為低，但仍在可接受範圍內，因此可歸納第一階段的指標篩選，其灰色統計值均呈現「高」的一致性結果。

然後藉由 AHP 法呈現專家主觀上對於準則的重要程度，其結果如圖 13 與圖 14 所示。學者在層面方面之排序為成本>系統>功能>品質，交通主管單位為成本>功能>品質>系統，產業界則為功能>成本>品質>系統。整體排序結果為成本>功能>系統>品質。

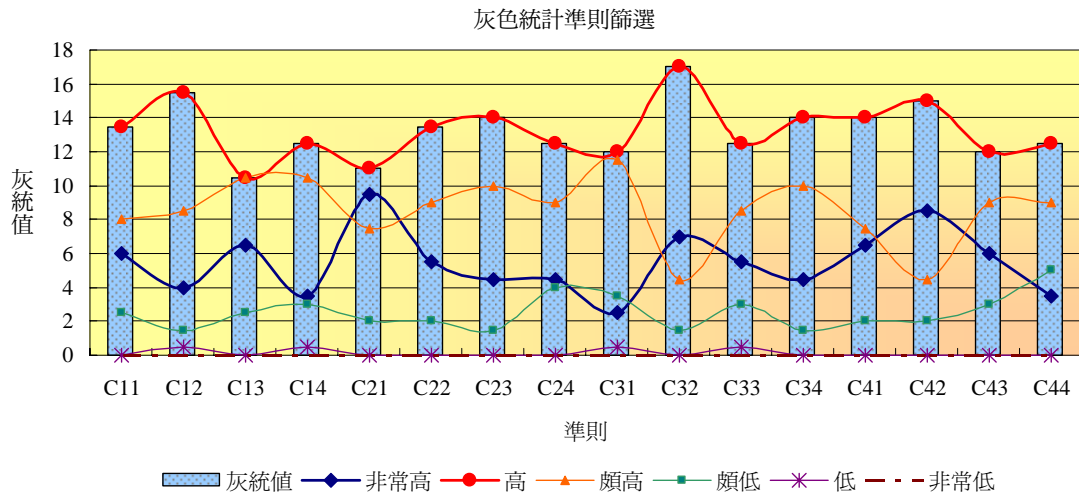


圖 11 灰色統計準則篩選

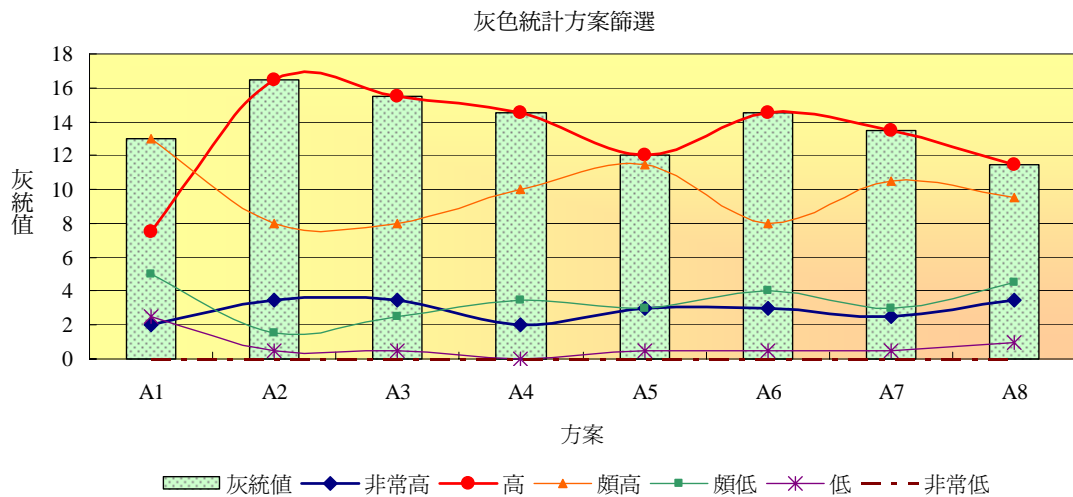


圖 12 灰色統計方案篩選

客觀權重係採用熵值權重法，因其利用各方案在各評估屬性下的評估值所得之相對權重，故可避免決策者主觀因素之涉入其中。從圖 15 可看出：以功能層面而言，客觀權重以頻寬 (0.06152) > 實際傳輸供需率 (0.05950) > 可傳輸之距離 (0.05815) > 移動傳輸供需率 (0.04450)。以品質層面而言，資料遺失性 (0.06602) > 環境干擾性 (0.06601) > 多元應用性 (0.06598) > 資料安全性 (0.06598)。以成本層面而言，維護耗費成本 (0.06572) > 頻譜取

得成本 (0.06441) > 接收端通訊成本 (0.06251) > 接收端設備成本 (0.05656)。以系統面而言，系統電力 (0.06601) > 系統擴充性 (0.06598) > 系統相容性 (0.06594) > 系統成熟度 (0.06520)。

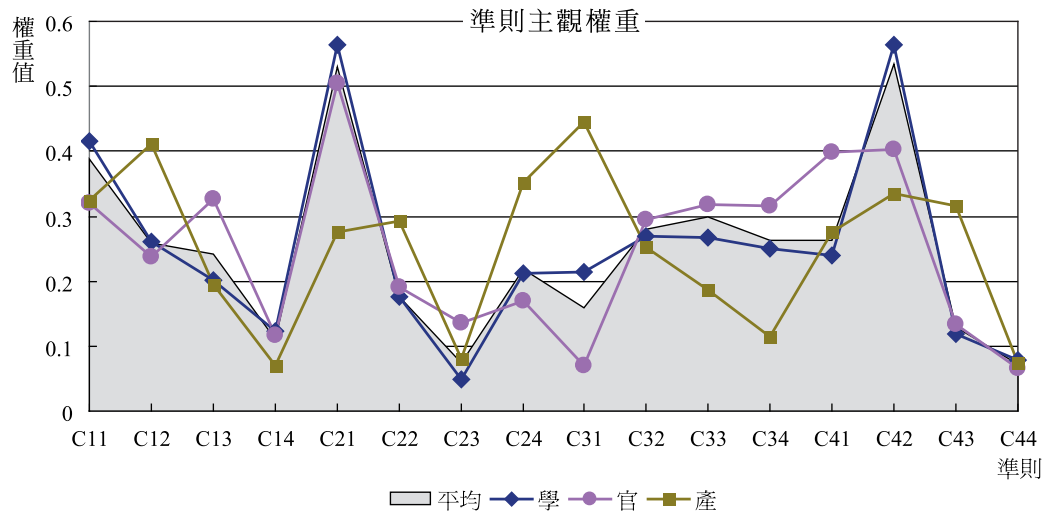


圖 13 準則主觀權重

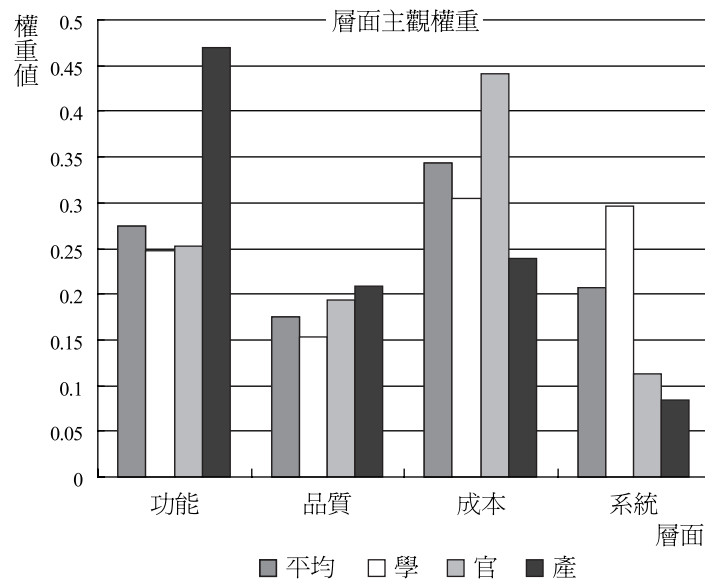


圖 14 方案主觀權重

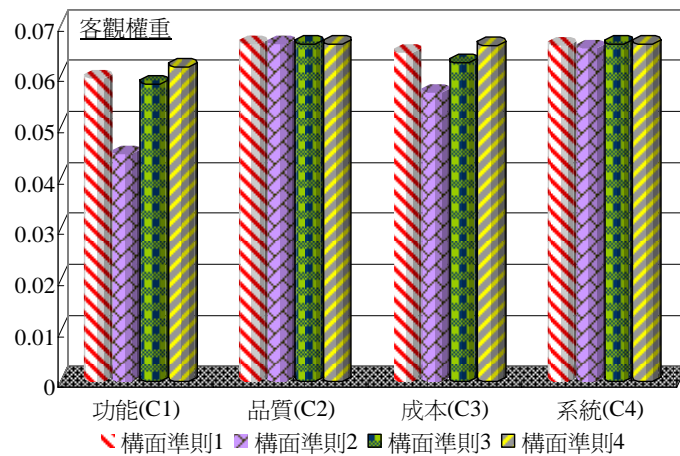


圖 15 準則客觀權重

主觀權重係表達各學者專家之重要看法，客觀權重則展現各方案準則間的重要差距，將此兩者進行折衷權重之計算，結果如圖 16 所示。功能層面以實際傳輸供需率 (0.12031) > 可傳輸之距離 (0.06954) > 移動傳輸供需率 (0.06090) > 頻寬 (0.03252)，品質層面以資料安全性 (0.11434) > 資料遺失性 (0.04770) > 環境干擾性 (0.04053) > 多元應用性 (0.01658)，成本層面以接收端通訊成本 (0.10272) > 維護耗費成本 (0.09931) > 接收端設備成本 (0.08189) > 頻譜取得成本 (0.04884)，系統層面則以系統成熟度 (0.08146) > 系統相容性 (0.05409) > 系統電力 (0.04199) > 系統擴充性 (0.02608)。

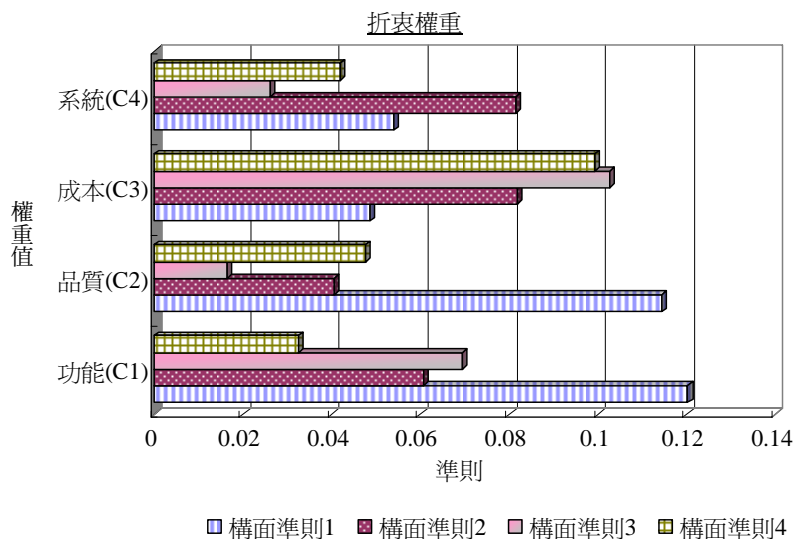


圖 16 準則折衷權重

5.2 通訊網路方案評選及分析比較

臺北市交通現場設備之無線通訊網路方案經由上述量化、質化及綜合多準則評估法之評選，其順序結果可整理成表 9，各方案間績效值則如圖 17 所示。其中可看出 A8 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX) 及 A7 (2.5G/3G/WLAN) 兩方案皆為各評估方法之最優選擇，A1~A3 則屬績效不足之方案。

表 9 各評估方法之方案排序

方法/ 方案	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
內容	2.5G (GPRS)	3G (CDMA)	WiBro (HSPFA+ 802.16e)	WLAN (802.11a/ b/g)	WiMAX (802.16- 2004)	2.5G/WLAN	2.5G/3G/ WLAN	2.5G/3G/ WLAN/ WiMAX
FAHP	8	6	4	7	5	3	2	1
FTOPSIS	6	5	4	3	2	8	7	1
FSD	8	7	6	5	4	3	2	1
MEQQD	7	6	5	8	4	3	2	1
FGRAY	7	5	6	8	4	3	2	1

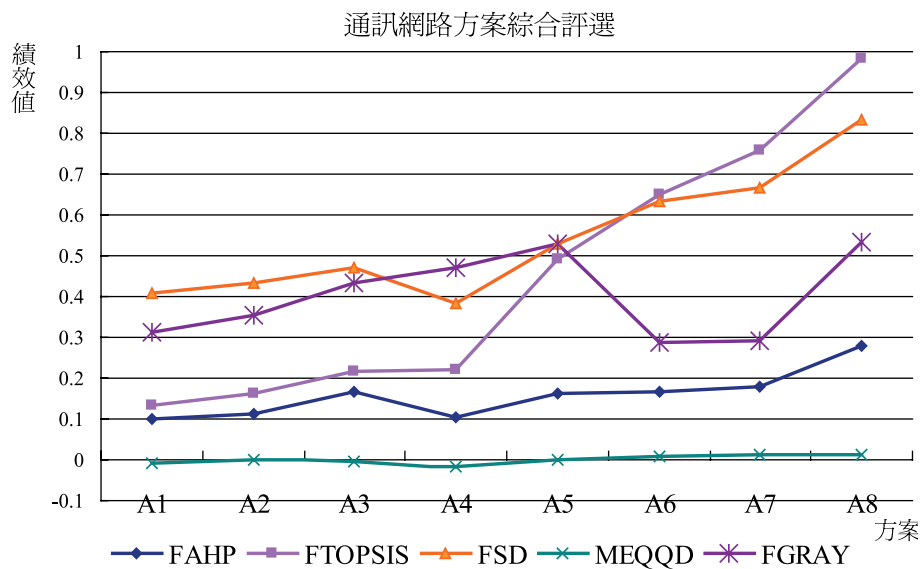


圖 17 排序結果相同之方案數 MATCH(%)示意圖

本研究利用 MSE、MAE、TOP、MATCH(%) 與 SRC 來比較各評估方法對於最後方案結果順序是否有決定性的差異。

1. 排序結果的誤差均方 (MSE)

各評估方法在排序結果以 MSE 值越小越好，依序分別為 MEQQD(0.000216) < FAHP(0.007787) < FGRAY(0.024743) < FSD(0.0564338) < FTOPSIS(0.237546)，故以 MEQQD 表現最佳。

2. 排序結果的平均絕對誤差 (MAE)

各評估方法在排序結果以 MAE 值越小越好，依序分別為 MEQQD(0.007660) < FAHP(0.044015) < FGRAY(0.086274) < FSD(0.124567) < FTOPSIS(0.269254)，故以 MEQQD 表現最佳。

3. 最佳方案之一致性 (TOP)

排序結果中可看出五種評估方法所得結果雖與任兩個評估方法之方案順序未完全一致，但大部分的評估方法皆以 A7 (2.5G/3G/WLAN) 與 A8 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX) 兩者為最優先，若依序累積各評估方法對方案的優先次序，則仍以 A8 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX) 為最優先方案，如圖 18 所示。

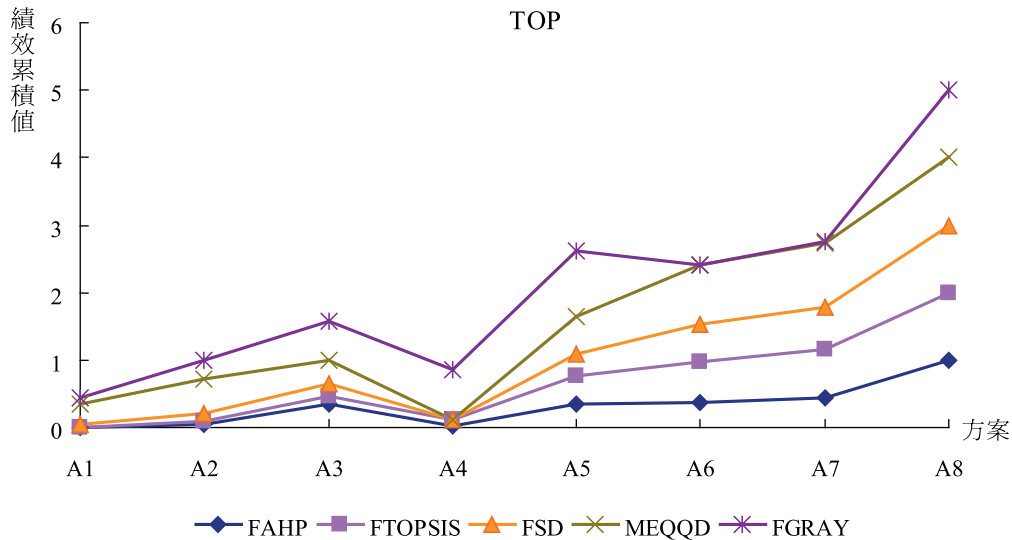


圖 18 最佳方案一致性 TOP 示意圖

4. 排序結果相同之方案數比例 (MATCH%)

在表 10 與圖 19 之比較方案排序結果可看出，以 MEQQD 和各評估方案的結果相合度最高，依序為 FSD、FTOPSIS、FAHP、FGRAY。

5. Spearman 等級相關係數 (SRC)

針對現場設備無線通訊網路系統之評選，經由不同評估方法，應以 SRC 判別評選結果

的一致性，如表 11 所示。表中使用模糊折衷權重，以 FAHP、FTOPSIS、FSD 及 MEQQD 的評估方案排序結果，具有顯著正相關性。

表 10 排序結果相同之方案數比例 MATCH(%)表

MATCH(%)		方法					平均
		FAHP	FTOPSIS	FSD	MEQQD	FGRAY	
方 法	FAHP	100%	50%	50%	38%	25%	53%
	FTOPSIS	50%	100%	50%	63%	13%	55%
	FSD	50%	50%	100%	75%	13%	58%
	MEQQD	38%	63%	75%	100%	25%	60%
	FGRAY	25%	13%	13%	25%	100%	35%

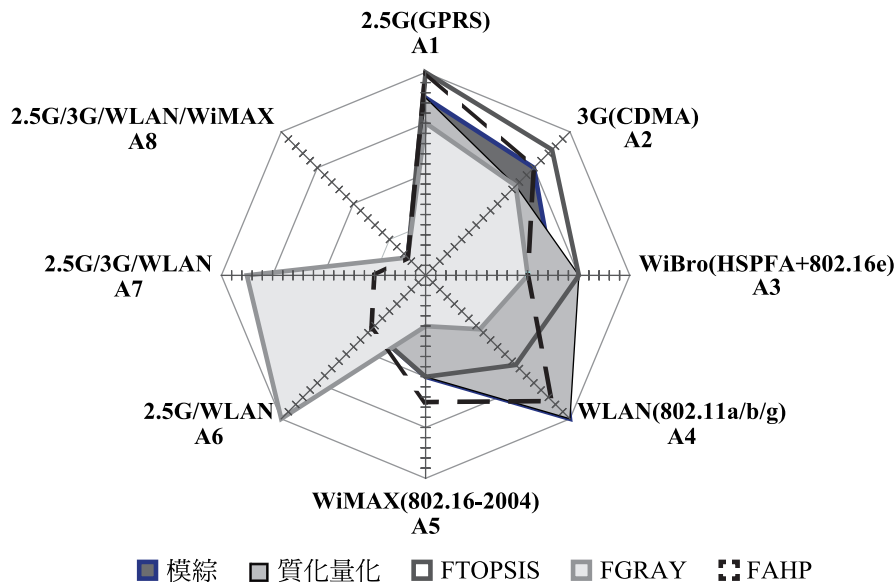


圖 19 排序結果相同之方案數比例 MATCH(%)示意圖

本研究將以上各評估方法之比較結果整理成表 12 與圖 20，發現 MSE 與 MAE 方面以 MEQQD 表現最優，TOP 方面則各方案皆相同，在 MATCH % 方面亦以 MEQQD 表現最優，在 SRC 方面除了 FGRAY 較無正顯著相關之外，其餘方法皆具顯著正相關。若將各評估方法之方案排序，以相對優劣呈現，則數字越小表現越好。本研究發現最適的評估方法為 MEQQD，其各方面表現皆為最優，並以 A8 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX) 為目前之最佳方案。

表 11 不同評估方法之 Spearman 等級相關係數

SRC		方 法				
		FAHP	FTOPSIS	FSD	MEQQD	FGRAY
方法	FAHP	1	0.881 (3.2245)*	0.9524 (5.41)*	0.9048 (3.6793)*	0.0476 (0.0826)
	FTOPSIS	0.881 (3.2245)*	1	0.8571 (2.8823)*	0.8333 (2.6112)*	0.1667 (0.2928)
	FSD	0.9524 (5.41)*	0.8571 (2.8823)*	1	0.9762 (7.7948)*	0.0238 (0.0413)
	MEQQD	0.9048 (3.6793)*	0.8333 (2.6112)*	0.9762 (7.7948)*	1	0 (0)
	FGRAY	0.0476 (0.0826)	0.1667 (0.2928)	0.0238 (0.0413)	0 (0)	1

註：*表在 95%信心水準下，評估水準有顯著相關性。

表 12 不同評估方法和比較結果優劣表

名 次		比 較 項 目				
		MSE	MAE	TOP	MATCH	SRC
評估方法	FAHP	2	2	1	4	1
	FTOPSIS	5	5	1	3	1
	FSD	4	4	1	2	1
	MEQQD	1	1	1	1	1
	FGRAY	3	3	1	5	2

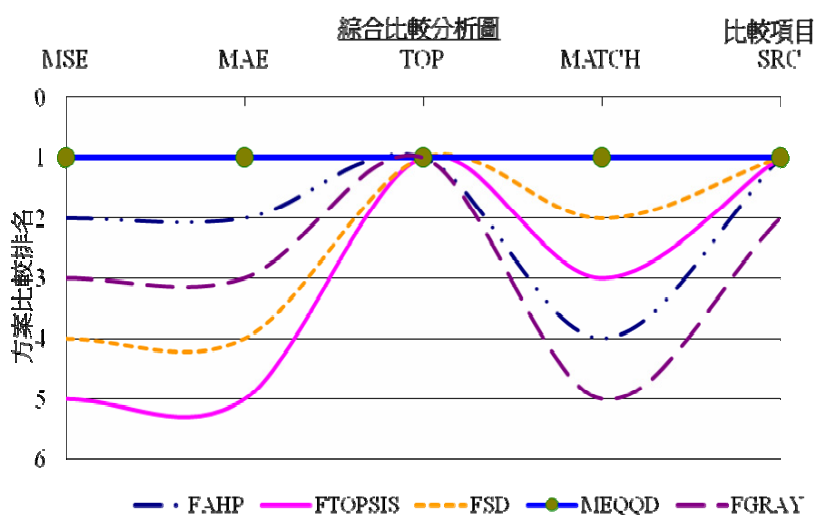


圖 20 評估方法綜合比較項目優劣圖

在實務上，為便於相關單位使用前述之評估方法，本研究乃針對無線通訊網路評選課題，區分為系統界定、評估過程與計畫執行三階段，並提供一簡單明瞭之操作流程，如圖 21 所示，此亦可作為面臨其它類似交通現場設備之無線網路評選課題的參考。

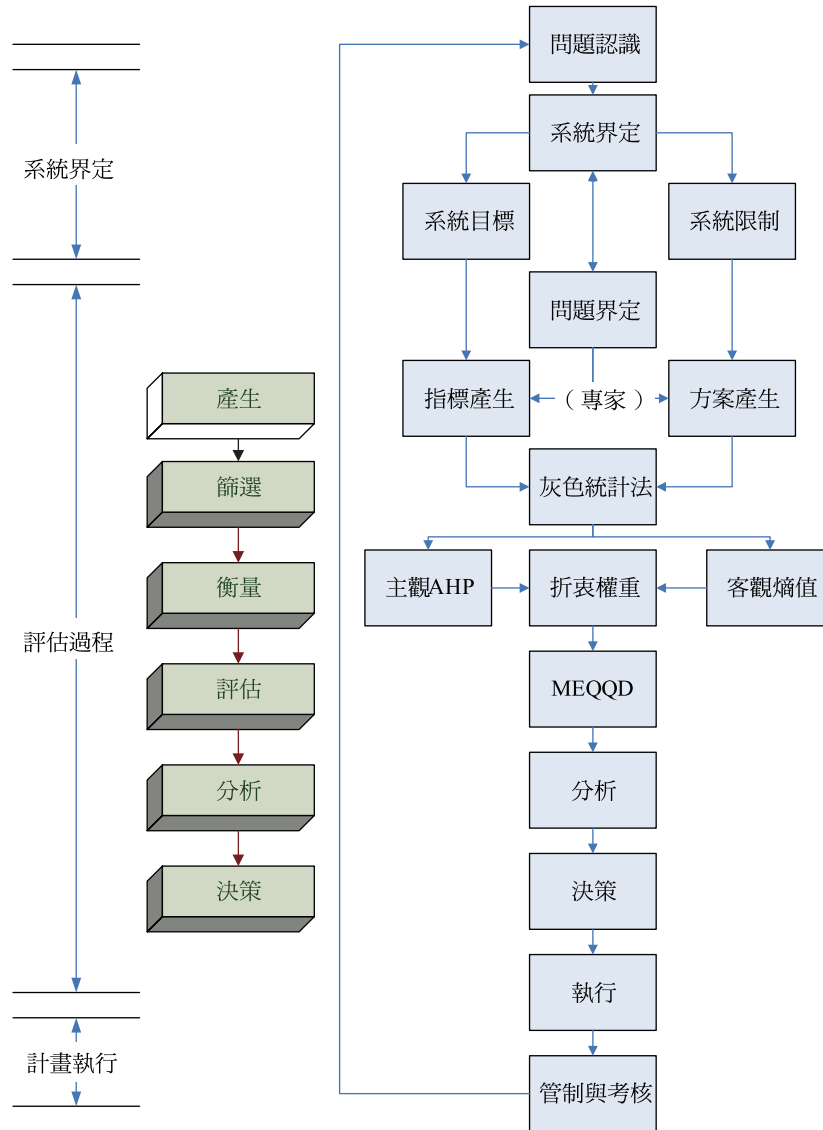


圖 21 無線通訊網路評選之操作流程圖

最後本研究參考波士頓顧問群 (Boston Consulting Group) 所提出的 BCG 圖形概念，繪製出都市交通現場設備無線通訊網路評選之決策向量圖。所謂的 BCG 矩陣圖形係在 1970 年由波士頓顧問群針對不同組合的投資事業，來決定現金流量的投入或對投資組合的

取舍。策略性事業單位 (strategic business unit, SBU) 通常可稱為事業體，是指以一種產品或一產品群所組織起來之事業單位，其目的通常是為了應付競爭者。每一個 SBU 因市場競爭情況及獲利狀況均不同，可將 SBU 歸納出不同的類別而置於矩陣中。基本 BCG 模式即是依據市場成長率及相對於最大競爭對手之市場佔有率的高低，而將 SBU 區分成四部份，分別為明星事業、問題事業、金牛事業、明日黃花事業。

本研究之決策向量圖形係由都市交通現場設備之未來需求趨勢與評估決策方法績效值所組成。縱軸表示都市交通現場設備之未來需求趨勢，即為各地區設備固定端與移動端數量乃按管理目的之不同而表現出對各準則的需求程度。橫軸則表示評估決策方法的績效值，如圖 22 所示。結果說明如下：

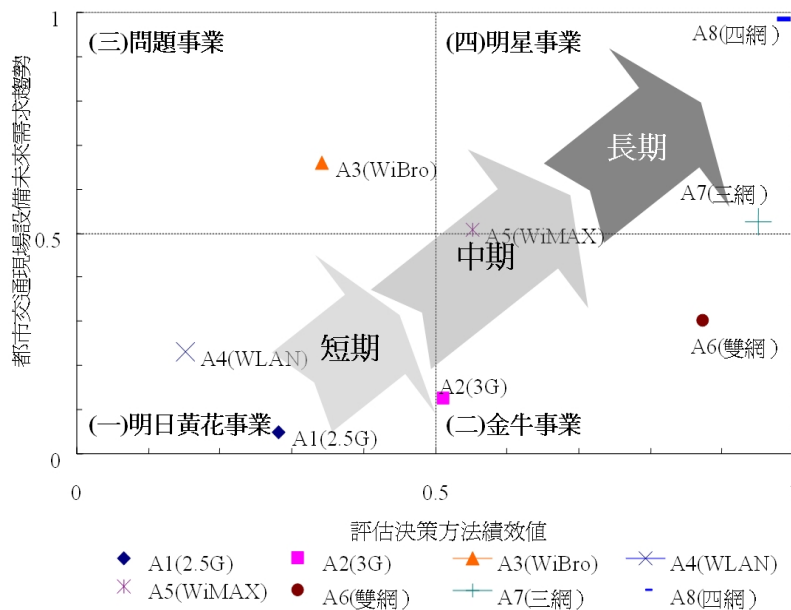


圖 22 都市交通現場設備無線通訊網路之決策向量矩陣

(一) 明日黃花事業

明日黃花事業是指某些都市交通現場設備之未來需求趨小，且評估決策方法績效值亦小之方案。此為 A1 方案 (2.5G) 與 A4 方案 (WLAN)，前者為當前選擇行動通訊網路之第一選擇，但因其頻寬較低，後者雖以價格低廉與頻寬高著稱但缺乏移動性，因此未來將面臨新一代無線通訊技術的挑戰，此乃屬於短期(1~2 年)決策。

(二) 金牛事業

金牛產業是指評估決策方法績效值高但都市交通現場設備未來需求趨小之方案。此為 A2 方案 (3G) 與 A6 方案 (2.5G/WLAN，雙網)，前者雖具漫遊與較大頻寬，但價格偏高，後者雖結合 2.5G 與 WLAN 優勢，涵蓋範圍即使擴大，但其在「換手」(handshaking) 時，

仍無法享有無縫隙之移動性服務品質。展望未來，此乃屬於短中期(2~3 年)決策。

(三) 問題事業

問題事業是指都市交通現場設備之未來需求趨大，但評估決策方法績效值低之方案。此即 A3 方案 (WiBro)，WiBro 技術雖為新興技術且具有高移動性與高傳輸率，但仍處於未商品化階段，市場規模尚無法降低成本，此乃屬於中長期 (3 ~ 5 年) 之決策。

(四) 明星事業

明星產業是指都市交通現場設備之未來需求趨大且評估決策方法績效值亦高之方案。此即 Mesh Network A7 方案(2.5G/3G/WLAN，三網)與 A8 方案 (2.5G/3G/WLAN/WiMAX，四網)。依現況發展，兩者差別在於 WiMAX 主幹網路是否已具規模，A8 方案因可同時考量區域間的現場設備與中心資料的距離、傳輸量及傳輸速度，故可形成一較完整的無線通訊網路架構，此乃屬於 5 年以上的長期決策。

六、結論建議

6.1 結論

1. 針對臺北市都市交通現場設備通訊網路評選課題，本研究首先以四個層面（功能、品質、成本與系統）以及十六項準則作為評估架構之要素，並藉由灰色統計法證明皆有程度相當高之必要性。
2. 以主觀權重而言，整體平均結果以成本面高於功能、系統與品質面，此頗符合交通現場設備主管對於節省公帑之期望。若加入折衷權重，則功能面首重實際傳輸率，其次為可傳輸距離、移動傳輸供需率與頻寬；品質面以資料安全性最重要，依序為資料遺失性、環境干擾性與多元應用性；成本面亦以接收端通訊成本最重要，依序則為維護耗費成本、接收端設備成本與頻譜取得成本；系統面則以系統成熟度為最高，再者為系統相容性、系統電力與系統擴充性。
3. 根據不同的評估方法之比較結果，在 MSE 和 MAE 方面以 MEQQD 表現最優，而在最佳方案一致性 (TOP) 上更是呈現一致性的結果，排序結果的相同方案數比例以 MEQQD 最佳，在 SRC 方面除 FGRAY 評估法之外，其餘方法所得結果皆具顯著正相關。總體而言，以 MEQQD 為無線通訊網路評選方法之最優者。
4. 依據本研究之最後評估結果，臺北市都市交通現場設備之無線通訊網路以 A8 方案 (2.5G/3G 搭配 WLAN/WiMAX) 為目前之最佳方案。然而臺北市有少數現場設備已採用 GPRS 方案，WLAN 或 WiMAX 則仍在發展中。若要實現 A8 方案，則有待 3G 的普及化以及 WiMAX 的技術商品化，因此可歸類於 5 年以上的長期規劃決策。
5. 本研究之最後評估結果與目前各都市交通現場設備習用之無線通訊組合方案相去不

遠，亦符合直覺判斷，此係因用於都市交通現場設備之無線通訊可供選擇方案有限，且囿於政府採購法之相關規定（例如後期系統需考慮與前期系統相容），較難鼓勵更多樣的無線通訊技術進入評選。但若有其他 ITS 的無線通訊應用而不受方案數量限制者，則可採用本研究所提供之簡單明瞭操作流程以及一個近似 BCG 概念之決策規劃矩陣圖，針對該應用之通訊需求而找出最佳的無線通訊網路方案。

6.2 建議

1. 決策者在進行方案評估時往往需要迅速正確的專家意見的蒐集及評估方法的操作，然皆須經由許多階段始能完成，不但費時耗力且成效有限。建議未來可將本研究提出的評估方法予以程式化，並將問卷改成網路問卷，在網路上可顯示較多動態且模擬出不同方案的差異性，以利於瞭解專家真正的權重與決策過程。
2. 交通現場設備依其不同需求大致上可分成固定端和移動端，本研究建議的 A8 方案 (2.5G/3G 搭配 WLAN/WiMAX) 係僅代表目前之整體設施而言。日後可針對不同的無線通訊技術，以各自的優點搭配各現場設備的需求而建構一完整的無縫隙網路。
3. 本研究雖同時考量質化與量化準則的評估法而發現 MEQQD 表現最佳，然而仍有其他量化與質化的標準未納入考量，例如：實際涵蓋範圍、實際訊號衰減率或實際方案執行需要的基地臺數量等，但囿於人力物力，日後應進行實際網路佈建規劃或實際通訊模擬壓力測試，以獲取更細緻的資訊，然後據此更新本研究提出的評估架構與流程。
4. 日後雖可依照無線通訊技術的演進或者現場設備需求的改變，而更新網路評選之流程，但將無線網路應用於創新的交通服務亦是研究重點之一。例如公車動態資訊系統、停車資訊導引系統或都市交控系統利用無線通訊網路的商業模式研究。

參考文獻

1. ICT Branch, "Key Wireless Technology and Developing Trends", Industry Canada, <http://strategis.ic.gc.ca>, 2007.
2. 柯承志，「GPRS/3G/WLAN 之整合與信號含概率的估算」，**電子檢測與品管**，第六十二期，民國九十四年四月，頁 27-36。
3. Dodd A. Z., *The Essential Guide to Telecommunications*, Fourth Edition, Pearson Education Inc., NJ, 2005.
4. 鄭同伯，**802.11 完全剖析無線網路技術**，博碩文化，臺北，民國九十四年六月。
5. Kakroo, U., "The Promise of Connected Communities: WiMAX", *The E-Government Magazine for Asia and The Middle East*, March, 2007, pp. 6-10.
6. 陶冶中、蔡錦榮等人，**智慧運輸系統資訊通訊實驗平臺建構及系統標準之研究—都會區 GPRS 與 Wireless LAN 應用於即時交通資訊整合平臺之系統規劃**，交通部研究報告，臺北，

- 民國九十三年。
7. 臺北市政府交通局，無線寬頻網路與 ITS 整合應用暨 ATIS 資訊系統建置計畫，民國九十五年。
 8. Delft Top Tech, “S@TMAX: Innovation through Telematics, Executive Summary”, Delft University of Technology, The Netherlands, www.delft-toptech.nl, June 2006.
 9. Grasso R., Mandato D., Mayora O., Salvadori E., Szabó C.A., Telesca L., and Woesner H., “CREATE-NET’s Real-Life Service-Oriented Testbed in Trento”, Tridentcom’07, Orlando, USA, May 20-22, 2007.
 10. 交通部運輸研究所，電腦化交通號誌控制系統—通訊系統手冊與通訊協定：通訊系統手冊，民國九十二年。
 11. 交通部運輸研究所，以整合租用方式建置都市公車動態資訊系統之規劃與推動，民國九十年七月。
 12. 劉育儒，「市區公車定位與通訊系統技術評估之研究」，臺灣大學土木工程研究所碩士論文，民國八十七年六月。
 13. 吳欣益，「無線通訊網路之規劃與管理」，臺灣大學資訊管理研究所碩士論文，民國八十七年。
 14. 鍾世忠等人，智慧型運輸系統通訊協定之研究—通訊網路評選模式之建立，交通部運輸研究所，臺北，民國八十九年。
 15. 謝尚行，「智慧型運輸系統中無線通訊網路評選之研究—以先進大眾運輸系統為例」，交通大學運輸科技與管理學系碩士論文，民國九十一年。
 16. 鍾于婷，「應用路途中資訊內容傳送之無線網路評選」，成功大學電信管理研究所碩士論文，民國九十三年。
 17. 王嘉宏，「數位網路上多重目標規劃的數學模式」，政治大學應用數學系碩士論文，民國九十三年。
 18. 劉佳鑫，「模糊多屬性決策方法之模擬分析比較」，銘傳大學管理科學研究所碩士論文，民國九十三年六月。
 19. 陳勁甫，「折衷權重多準則評估法」，國立交通大學碩士論文，民國七十七年。
 20. Hwang, C. L. and Yoon, K., *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer Verlag, New York, 1981.
 21. Buckley, J. J., Feuring, T. , and Hayashi, Y., “Fuzzy Hierarchical Aanalysis Revisited”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 129, 2001, pp. 48-64.
 22. Triantaphyllou, E. and Lin, C. T., “Development and Evaluation of Five Fuzzy Multiattribute Decision-Making Methods”, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 14, 1996, pp. 281-310.
 23. Voogd, H., *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London, 1983.

24. 鄧聚龍，灰色系統基本方法，華中理工大學，中國，1985 年。
25. 鄧聚龍，灰色系統理論與應用，高立出版社，臺北，民國八十九年，頁 2-4。
26. Chen, S. J. and Hwang, C. L., *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.

附表 1 各方案準則特性總彙整表

方案	A1	A2		A3		A4	A5
說明	2.5G(GPRS)	3G(CDMA)		WiBro(HSDPA+802.16-2005)		WLAN	WiMAX
規格	GPRS	WCDMA(FDD)	CDMA2000	TDSCDMA	HSDPA/HSUPA	802.11 a/b/g	802.16-2004 (a,b,c,d)
描述	General Packet Radio Service	Wideband Code Division Multiple Access(Frequency Division Duplex)	Code Division Multiple Access 2000	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access	High-speed Downlink Packet Access/High-speed Uplink Packet Access	Wireless Local Area Network	Wireless Metropolitan Area Network
地理	全世界 (韓日除外)	日、歐	美、南韓	中	日、韓、歐	全世界	全世界
商業化年	2001	日 2002、歐 2004	2003	2005 後	D:2006 ; U2007	1999~2002	2005~2006 (Fix)
多工存取技術	TDMA	CDMA	CDMA	TDMA/CDMA	TDMA /CDMA	CSMA-CA	TDMA
主要服務	High-mobility cellular(packet switched data)	High-mobility cellular(voice , SMS , packet&circuit switched data)	Fixed&mobile data	High-mobility data&voice	High-mobility cellular ; High speed packet data	Low-mobility data	Last mile, backhaul mobile broadband wireless access
資料交換	packet switched	circuit & packet switched	Packet switched	circuit & packet switched	Packet switched	Packet switched	Packet switched
標準發展單位	3GPP	3GPP	3GPP	3GPP/CCSA	3GPP	IEEE	IEEE

附表 1 各方案準則特性總彙整表 (續)

方案	A1	A2	A3	A4	A5
說明	2.5G(GPRS)	3G(CDMA)	WiBro (HSDPA+802.16-2005)	WLAN	WiMAX
頻段	850~900~1800~1900MHz	2000MHz	1800~1900MHz	2.4GHz/5GHz	3.5GHz(Fix)
Data Rate	171.2kbps(21.4kbps with 8 slots)	2Mbps	14Mbps	11Mbps/54Mbps	75Mbps
Throughput	30~40kbps	384kbps	7Mbps	27Mbps	35Mbps
Distance	10km	15km	1~5km	100m	48km
頻寬	200kHz	5MHz	5MHz	10/20/25/30MHz	1.25~20MHz (Fix)
頻譜取得成本 (新台幣)	70 億~100 億元/家	70 億~100 億元/家	70 億~100 億元/家	0	70 億~100 億元/家
接收端設備成本 (新台幣)	1000 元	990 元	990 元	1000 元	1000 元
接收端通訊成本 (新台幣)	1000 元	750 元	750 元	399 元	500 元
系統電力	0.5~1W	0.8~1W	0.5~1W	0.4~0.1W	0.4~0.1W
安全性	佳	佳	佳	尚可	尚可
技術可行性	佳	可	測試中	測試中	佳

資料來源：本研究整理

