

整合 AOA/TDOA 監測定位系統之設計實現

巫季霖^a、張耀堂^b、鄭旭志^a
 國立虎尾科技大學光電與材料科技研究所^a
 高苑科技大學資訊科技應用系^b

摘要-基於國內近年來傳播事業的蓬勃發展，大量建設使得原始監測站周遭地形地物的快速變化，暨先進的通訊技術更加多元與繁複，本研究進行相關電波監測定位新技術評估，例如訊號到達時間差 (Time Difference Of Arrival, TDOA)、信號到達角度(Angle of Arrival, AOA)/TDOA 等。為評估與探討 TDOA 監測定位系統在解決都會區干擾的可行性，先進行軟體模擬驗證，以探討監測定位技術服務涵蓋範圍，並完成分析定位準確度與監測站位置分佈，接著運用實測及科學分析的方法完成「TDOA-based」的實測模擬驗證情境。

一、簡介

隨著無線電通信傳播事業發展以及寬頻無線新技術的發展，加上無線電干擾源趨向微波頻段與高速寬頻網路，導致干擾查測的困難度與複雜度增加。以飛航干擾、低功率無線電設備干擾、突發干擾源及都會區干擾問題等特殊干擾處理為例，對於各國電信監理機關而言已成爲干擾處理上急迫的議題。因此將對電波監測定位技術進行評估（如：TDOA、AOA/TDOA 等），並於大台南都會區建置 TDOA 實測環境以探討邊境特殊干擾的辨識、分析與防制的可行性與解決方案。

在國內監測計畫方面，以無線電頻譜監測系統 (Radio Spectrum Monitoring System, RSMS) 爲主要架構 [1]，輔以無線電定向系統 (Direction Finding Location System, DFLS) 和無線電頻譜管理系統 (Spectrum Management System, SMS) 從事監測作業，以構成全天候、即時、自動化的全國電波監測網 [2]。但有鑑於該監測網自建置迄今已歷時多年，系統維護不易，且原監測功能無法滿足新寬頻通訊技術之發展，導致干擾查測的困難度與複雜度也在增加。

本文研究整合 AOA/TDOA-based 監測定位系統的可行性，階層管理組織、網路、軟體架構與系統設備規格，建構更多元的電波監測定位技術以補償現有電波偵測網的盲點與死角，達成未來處理相關干擾案件及優化電波監測網之目標 [3]。首先利用 TDOA、AOA/TDOA-based 進行分析，分析內容爲適用監測信號類型(待測信號頻率、頻寬、信雜比、功率與持續時間之關係)、網路頻寬需求、天線型式、增益接收天線、高度與增益、接收機同步需求、定位範圍與精確度、自動監測定位演算法與系統架構、地理環境與電波環境需求、電源、系統建置規模等，完成以上建置分析後，接著進行軟體模擬驗證，以探討 TDOA-based 監測定位技術服務

涵蓋範圍，並完成分析定位準確度與監測站位置分佈及監測信號類型之間的關係。

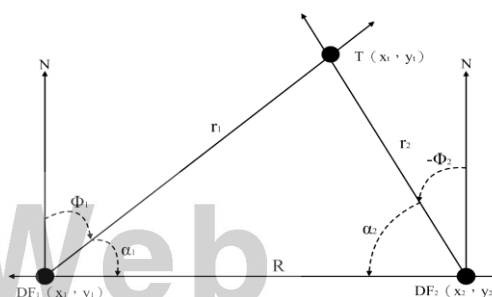
其中模擬 TDOA-based 監測定位的環境建置設計，必須先分析接收機規格的特性，包括：(1)發射源、發射功率、SNR。(2)接收天線組態(3部接收機)、高度與增益。(3)接收機性能(靈敏度、動態範圍、IP3)。(4)可完成 TDOA 正確定位的最小接收功率。(5)TDOA-based 自動監測定位演算法 [8]。爲實測驗證 TDOA-based 技術定位精確度，定位精確度指標 Circular Error Probability (CEP)=50% 與均方誤差(RMSE)作爲估算。

實測結果顯示：在都會區多路徑的傳輸效應下，TDOA-based 監測定位在三角形內最大距離誤差約 950 公尺內 (CEP=50%)。在協同都會區的 TDOA-based 監測定位站的應用下，可提昇以往既有的 AOA 固定(行動)監測定位站的服務涵蓋、定位精確度。藉由本研究可結合 TDOA、AOA/TDOA 等不同定位技術，做爲未來優化電波監測網之參考依據，可提升處理相關干擾案件之能力 [4][5]。

二、TDOA 與 AOA 定位技術

2.1 AOA 定位技術原理

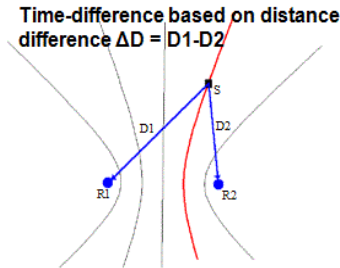
AOA 測向定位方法是基於交叉定位法。雙站交叉定位法是常用的定位方式，此法的基本原理是由兩個測向站對同一目標進行測向，利用三角數學公式計算出（或用幾何學的方法在地圖上交會出）目標的所處位置。如圖一所示，通常兩測向站 DF_1 及 DF_2 的位置坐標已知，設兩測向站座標爲 $DF_1(x_1, y_1)$ 與 $DF_2(x_2, y_2)$ ，則兩測向站對目標進行測向後得到的方向角分別爲 (Φ_1, Φ_2) ，因此兩條方向線的交會點 T 被認爲目標所處的位置座標 (x_t, y_t) [6][7]。



圖一：雙站交叉定位示意圖

2.2 TDOA-based 定位技術原理

TDOA-based 定位法又稱為雙曲線定位法，利用發射源的信號到達三個或多個已知位置接收機的時間差，反求出發射機到接收機的距離，由這些時間差可以繪製兩組或更多組雙曲線，其交點就是發射源的座標位置。定位方法如圖二所示。利用三個以上接收機，以其到發射器的距離畫曲線，三個曲線的交點即為發射源。



圖二：曲線交叉定位示意圖

假設發射機(待定位物)的座標為 (x_T, y_T) ，三個接收機 A、B、C 的座標分別為 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) ，而 d_A 、 d_B 、 d_C 分別為接收機 A、B、C 到發射機 T 的距離，其數學式表示為：

$$d_A = \sqrt{(x_A - x_T)^2 + (y_A - y_T)^2} \quad (1)$$

$$d_B = \sqrt{(x_B - x_T)^2 + (y_B - y_T)^2} \quad (2)$$

$$d_C = \sqrt{(x_C - x_T)^2 + (y_C - y_T)^2} \quad (3)$$

測量信號到達時間差與距離的關係式為：

$$\begin{cases} d_{AB} = ct_{AB} = c(t_A - t_B) = d_A - d_B \\ d_{AC} = ct_{AC} = c(t_A - t_C) = d_A - d_C \end{cases} \quad (4)$$

其中 d_{AB} 為接收機 A 與 B 到發射源的信號傳播距離差， c 為傳播速度， t_{AB} 為接收機 A 與 B 到發射源的測量信號到達時間差，根據雙曲線的原理可得聯立方程組：

$$\begin{cases} d_{AB} = \sqrt{(x_A - x_T)^2 + (y_A - y_T)^2} - \sqrt{(x_B - x_T)^2 + (y_B - y_T)^2} \\ d_{AC} = \sqrt{(x_A - x_T)^2 + (y_A - y_T)^2} - \sqrt{(x_C - x_T)^2 + (y_C - y_T)^2} \end{cases} \quad (5)$$

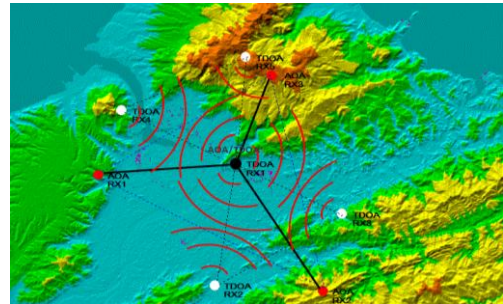
求解 (x_T, y_T) 即為待定位物位置座標。

因此，在 TDOA 定位法則中可分為兩個步驟，首先利用各種接收信號技術，由三個接收機得到與待測物的到達時間差，再將其轉換為距離，並代入公式以得到一組或多組雙曲線方程式。接著則是選擇高效率與高精確度的運算法則求解聯立方程組，便可取得待測物之位置 [6][7]。其中量測到達時間差的準確性非常重要，通常取決於多重路徑效應(multipath effect)與測量通道頻寬。一般來說， N 個接收機將會得到 $N-1$ 個獨立數值，若使用兩個獨立雙曲線將可得到平面定位位置，但若其中一數

值有誤差即無法準確定位，因此增加接收機之數目，也會因為得到更多測量數據而提高定位的準確度，並且還可將平面定位延伸至空間定位。

結合 AOA 與 TDOA-based 如圖三，AOA/TDOA-based 在電信網路系統中運作機制為：首先運用到達時間差 (TDOA) 的前向鏈路(forward link)測量導引信號(pilot signal) 以解算使用者的地理位置。接著，運用建置於接收站的智能天線(smart antenna)與反向鏈路(reversed link)的導引信號，解算蜂巢架構(macro-cell configuration)內準確的 AOA 測量角度。如此，當 TDOA 定位產生混淆問題時，3G 電信網路的定位系統可藉助 AOA/TDOA 的互補機制以提高 TDOA 的定位精確性。

本研究實現 AOA/TDOA-based 監測定位系統的設計與實測並完成定位精確度的分析。結果顯示在 TDOA 監測定位的範圍內誤差在 950m 以內。並且此研究的 TDOA 監測站台的雛型架構，可克服 AOA 定位技術多路徑傳輸下定位效能不彰的瓶頸，完成都會區干擾辨識、分析(定位)與防制之之基本需求。再者，本研究可協同通傳會(NCC)現行 AOA 監測定位系統以實現升級 AOA/TDOA 的整合。此應用情境可在單一 AOA/TDOA 監測定位站與單一 TDOA 行動監測車運用下，完成發射干擾源位置的干擾辨識、定位與防制功能。



圖三：AOA/TDOA-based 定位系統

三、實測 TDOA 監測定位系統設備架構之設計

TDOA 監測定位系統在電波監測與定向能力上，需針對各種訊號類型與各項所要達到功能需求，進行系統的規劃設計。本研究實測軟體架構雛型，為了易於快速建立針對所需要的待測訊號，採取開放性軟體架構，硬體採用模組化設計。其中重要規劃設計如圖四所示。

若發生干擾案件，將接近干擾源位置之三個站台(或三個站台以上)所偵測與側錄到的三組信號(或三組以上)回傳至 TDOA 管理中心站台(Central Control Station)。接著，將偵測與側錄的信號數據在 TDOA 管理中心站台回放，最後，運用時間差相關性演算以解算出之時間差，並結合電子地圖將干擾源的經緯度顯示於電腦螢幕上。

在 TDOA 系統軟體分為兩界面介面，底層介面從單一監測站的接收機獲取各項資訊。上層控制介面將每個

監測站點搜集到的訊號與時間數據，利用接收波型進行比對分析，再進行時間差相關演算[9]。但 TDOA 控制模式通常仍要視各種接收訊號的訊號源，其頻率、頻寬、調變模式，進行取樣的最佳化。

本研究的 TDOA 站台雛型架構，可克服 AOA 定位技術多路徑傳輸下定位效能不彰的瓶頸，完成都會區干擾辨識、定位功能之基本需求。藉由 TDOA 定位系統在站台選址與天線架設的簡易性，其站台建置的成本約為 AOA 站台建置的 10%~20%，在系統成本與定位功能的考量下，可採行 AOA/TDOA 整合監測定位系統的架構，如圖五所示。當選擇的是各站台最佳效能 15km~20km 服務涵蓋面，其非常適合導入都會區作為干擾防制。

四、 TDOA/AOA 監測定位系統之實現與實測

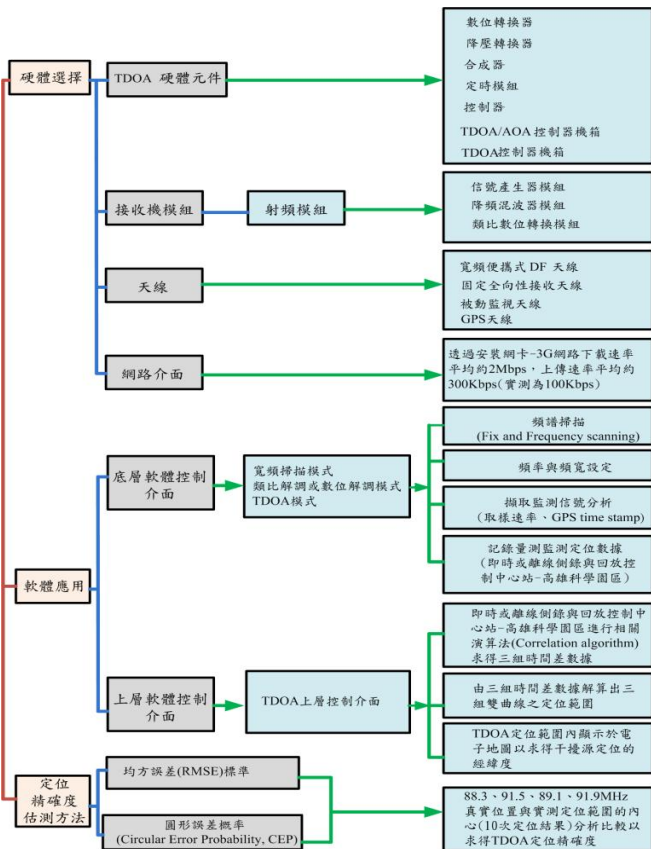
4.1 TDOA/AOA 監測定位系統實驗設計

為克服高大建築物阻隔的障礙，並且減少地面反射或反射波影響，本研究進行實測過程中使用三角形佈置方式，分別在台南健康站(台南都會區)、台南高鐵站(交通大學南分校)與路竹科學園區內。三角形三個點中高鐵到路科距離約 9.94 公里、健康站到路科距離約 20.05 公里、健康站到高鐵距離約 14.27 公里。

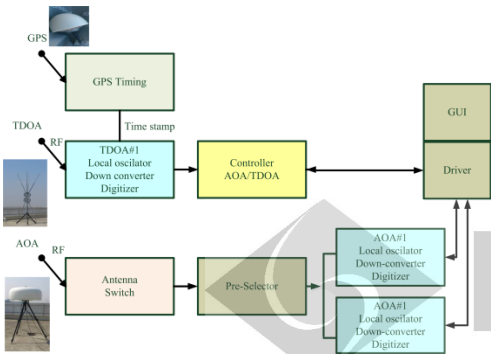
理論上以三角形方式佈置 TDOA 和 AOA 監測站台時，當發射源出現在定位地點的中心，TDOA 監測定位系統可獲得最精確的定位。反之，當信號源遠遠超出周邊，TDOA 在測量區外的定位效能會劣化的更加迅速。

為了更加瞭解與證實監測定位系統與發射干擾源幾何地理位置在定位效能的關係與影響的確切數據，本研究實測設計將待測點選擇靠近正三角形中心部分的 FM 88.3MHz 長榮之聲，再選擇逐漸遠離正三角形的 FM 91.5MHz 自由之聲電臺、FM 89.1MHz 南都廣播和 FM 91.9 MHz 嘉南廣播，如圖六所示。監測站點與廣播站台的相關位置如表 I 所示[11]。

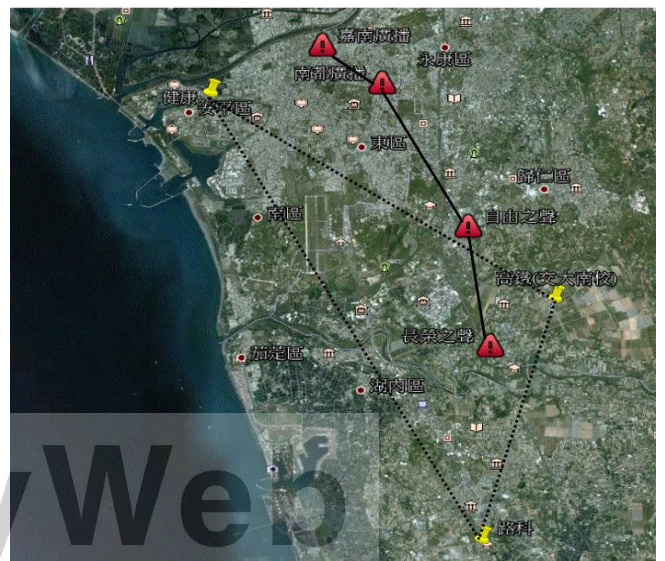
本研究利用 3G 行動(無線)網路，並在三個站點收集數據並進行分析解算。在實際測試過程中，將由定位系統重複測試所判讀出的信號發射源，與實際發射源所在位置由多次的重複測試以進行分析比較，並確認 TDOA-based 定位系統的定位精準度。頻率設定為 88.3MHz，取樣頻寬為 20MHz 利用軟體濾波器取 400KHz，再取 1 毫秒時域變化做訊號相關解析，兩個站之間可解析出一條雙曲線。因此，路竹-健康、路竹-高鐵、健康-高鐵共構成三條雙曲線，如圖七所示。



圖四：AOA/TDOA-based 整合監測定位系統架構



圖五：整合 AOA/TDOA 監測定位系統的接收機架構



圖六：偵測站點與實驗待偵測點選擇

表 I 監測站點與廣播站台的相關位置

監測站點和廣播站台	經度	緯度
TDOA 監測站 1	120° 15'42.41"	22° 50'21.70"
TDOA 監測站 2	120° 17'9.00"	22° 55'29.00"
TDOA 監測站 3	120° 10'14.60"	22° 54'15.15"
88.3MHz 廣播電台	120° 15'56"	22° 54'23"
91.5MHz 廣播電台	120° 15'29"	22° 56'55"
89.1MHz 廣播電台	120° 13'45"	22° 59'57"
91.9MHz 廣播電台	120° 12'33"	23° 0'45"

表 II 各廣播電臺定位準確度分析

廣播站台	定位精準度 @CEP50% (m)	平均距離誤差 (m)	標準差(m)
88.3MHz 廣播電台	235	230.31	22.24
91.5MHz 廣播電台	230	260.50	76.97
89.1MHz 廣播電台	550	515.22	137.25
91.9MHz 廣播電台	950	929.26	275.76

五、結論

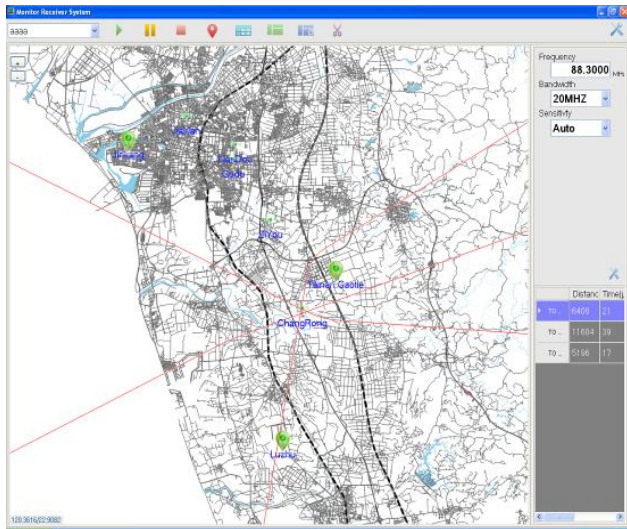
先進的通訊技術將朝增加頻譜使用效率的發展，使得頻譜配置更加密集與壅塞，而易於互相干擾。並且由於多路徑的傳輸效應，導致都會區的干擾源更加難以辨識與定位。本研究選擇台南都會區完成「TDOA-based」的實測模擬驗證情境，與 TDOA 定位精確度分析。實測結果顯示：在都會區多路徑的傳輸效應下，TDOA 定位在三角形內距離誤差約 950 公尺內 (CEP=50%)。在協同整合都會區 TDOA 定位站的應用下，可提昇既有的 AOA 固定(行動)監測定位站的 2 倍服務涵蓋面與 6 度偏角的定位精確度。因此必需建構整合 AOA/TDOA-based 監測定位技術，以補償現有電波偵測網的死角。

致謝

本研究感謝國家通訊傳播委員會(NCC)「特殊干擾處理技術與方法之評估研究」與國科會 NSC 102-2221-E-244-001 經費補助。並感謝財團法人電信技術中心之技術支援與指正。

參考文獻

- [1] 張耀堂、劉昭育、王建春、梁溫馨，“赴法國實習「無線電頻譜監測系統」報告書”，國家圖書館，冊號 C880877，1999。
- [2] 電波偵測能量計畫，交通部電信總局。
- [3] Report ITU-R SM.2211, “Comparison of Time-Difference-of-Arrival and Angle-of-Arrival Method of Signal Geolocation”, 2011.
- [4] 漳杰銘、許正欣「於蜂巢式網路中巨細胞與毫微細胞共存下之同頻干擾管理的研究」，國立雲林科技大學資訊工程系民國 99 年碩士論文
- [5] 張致維、安仲芳「前置展頻時空塊碼分枝傳送系統在多路徑同頻干擾之效益分析」，立台灣海洋大學導航與通訊系民國 93 年碩士論文
- [6] 無線電測向及交叉定位技術研析(上)，IECC 報導第 52 期，2008。
- [7] 無線電測向及交叉定位技術研析(下)，IECC 報導第 53 期，2009。
- [8] <http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=information&rlink=rhome&lang=en>
- [9] Azaria, M. Rafael Israel, Haifa, Israel Hertz, D. ,“Time delay estimation by generalized cross correlation methods”, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Apr 1984, Vol.32, Issue. 2 ,PP.280 – 285.
- [10] <http://scholar.lib.cku.ac.kr/A-QCode~dianxjs200503031.html>
- [11] http://www.ncc.gov.tw/chinese/content.aspx?site_content_sn=582&is_history=0



圖七：FM 88.3MHz 廣播電台定位雙曲線的解算結果

4.2 TDOA 監測定位實測精確度分析

原 TDOA 實驗設計欲利用 3G 行動通訊網路，進行即時 TDOA 定位，但由於實際在三個監測站點的 3G 網路即時頻寬一直無法達到穩定 100kbps 的傳輸資料量，因此本實驗使用該電波監測接收機具有的訊號錄製與回放功能，利用三個監測站點在同一時間進行訊號錄製，再將各站資料攜回控制中心後回放。模擬三個監測站台即時同步狀況，進行 TDOA 定位量測。本次以 200MHz 頻寬、1 毫秒資訊預錄訊號每個頻率點取 200 秒，檔案大小約 3-4Mbyte。

實驗證明以 TDOA 監測定位的可行性，其明顯受到幾何影響定位判斷錯誤誤差。各個實測頻率數據整理如下表 II 所示。

