

被動式電偵系統之 時差定位法研析

作者／薛吉順上校、陳智宏、鍾長志

提要

- 一、被動式電偵站台有不發射電波的優點，不易被發現與干擾。
- 二、被動式電偵站台搭配時差定位演算法，有增加被動式電偵站台對目標的測距與定位之功能。
- 三、被動式電偵站台在佈建時位址很重要，佈建的位址愈好，則能夠偵蒐目標與對目標定位的能力也就愈好。

關鍵詞：時差定位法、精準度分析、站台佈建。

前言

現階段雷達仍是目前戰爭中不可或缺的因素之一，其功用有預警、偵蒐、測向、測距與定位等，然而隨著科技的進步與反輻射飛彈的興起，戰時雷達陣地易被敵方所摧毀，雷達需要高隱匿性的功能也被突顯出來。

由於被動式電偵站台本身不發射電波，所以不易招致電子干擾及反輻射飛彈攻擊，較能滿足隱匿的需求，且被動式電偵系統具有與雷達相當之預警、偵蒐與測向功能，缺點是電偵站台若無相關演算法搭配則無法有測距與定位的功能。因此，本篇論文主要是將時差定位演算法(Time Difference of Arrival, TDOA)與多個被動式電偵站台結合，讓整個被動式電偵系統具有測距與定位的功能。

時差定位法已經有 62 年以上的歷史，¹因簡單方便且並無龐大的計算，用途非常常見與廣泛，時差定位法在民間也有使用，如地震源的定位²與閃電定位³等，而軍事用途則是利用目標在移動過程中，為了通訊、導航、定位或其他意圖時發射電磁信號的目標物進行定位，例如雷達、通信機與電子干擾等，上述裝置可能會安裝在船艦、飛機、路上載具或建築物等相關目標物上。因此，在對電磁波定位也是在對目標進行定位。

時差定位法已被各國投入軍事研發，主要是因在一般軍事作戰中需大量的使用含

¹ BenoCuttenberg, "Earthquakes and Structure in Southern California," Geological Society of America Bulletin, vol. 54, no. 4, 1943, pp.499-526.

² 同註 1。

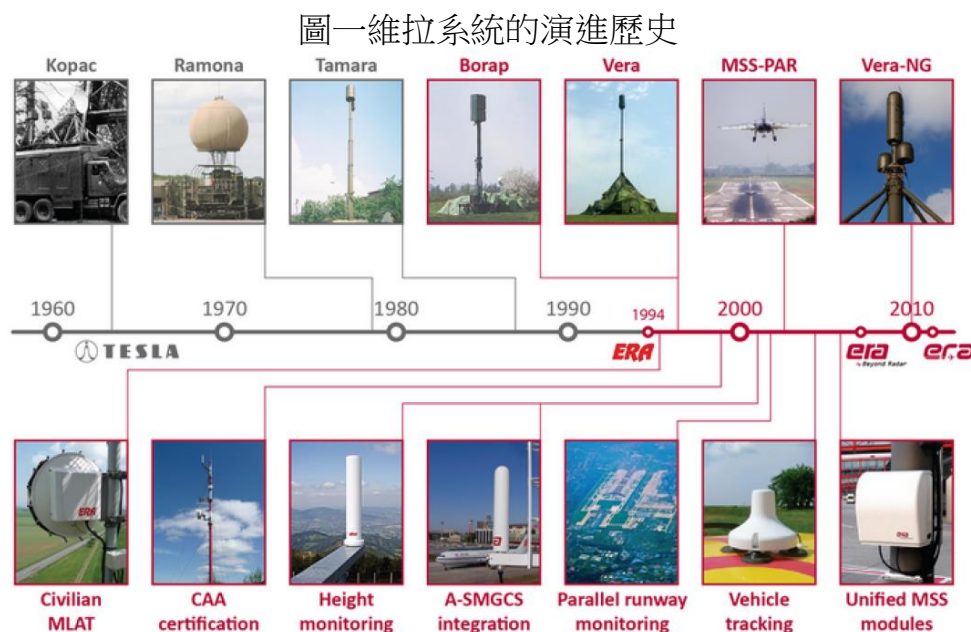
³ 張廣庶、王彥輝、鄧秀書、張彤、趙玉祥、李亞琄、曹冬傑，〈基於時差法三維定位系統對閃電放電過程的觀測研究〉《中國科學地球科學》，第 20 卷第 4 期，2010 年，頁 523-534。

有輻射源的電子設備，例如：通信機、雷達、電子干擾等設備，而這些設備則被安裝在軍事相關的移動載具上或地面的設施上，所以只要有使用相關設備的軍事設施或載具都會產生輻射信號。時差定位法即是利用數個被動式電偵站台以收到信號後再傳送至主站，計算輻射信號到達各電偵站台之時間差，進行目標的定位與追蹤。時差定位法能夠有效偵蒐的距離與精準度取決於被動式電偵站台的天線性能與站台時間的精準度。被動式電偵站台的天線靈敏度愈強，則可以偵蒐較小的輻射信號；被動式電偵站台時間的同步精準度愈好，則時差定位的位置則愈精準。

被動式電偵站台之時差技術研析

一、研究背景與國內外成果簡介

在歐美先進國家中早將時差定位歸納在國防體系中，被動式電偵系統之時差定位法最早的起源是捷克共和國的「科派克(Kopac)」如圖一。



資料來源：ERA, “Company History,” <http://era.aero/>, 2015/10/5.

經過多年的研究與多次的更新，不斷地推出新產品，目前「維拉-NG (Vera-NG)」是該系列的最新型號，⁴它可進行目標探測定位、識別，並且跟蹤空中、地面和海上目標，「維拉(Vera)」系列系統演進的流程圖如圖一。

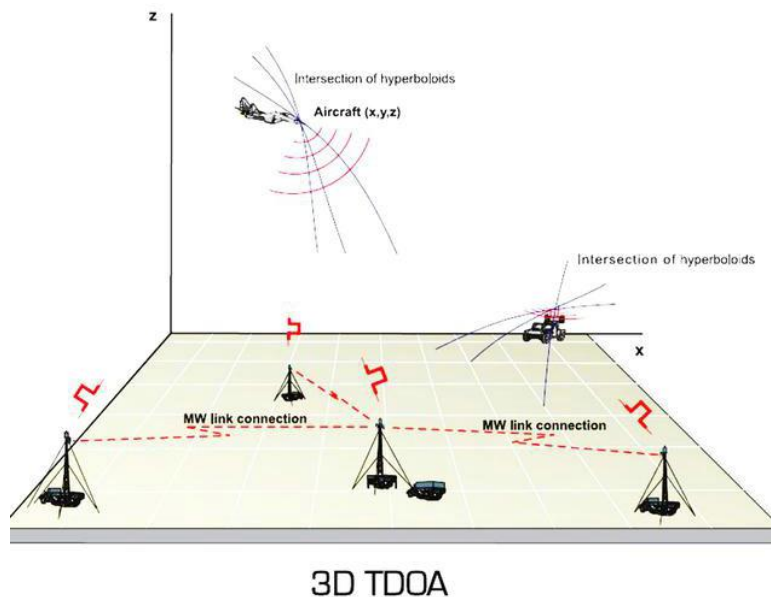
維拉的偵蒐距離取決於天線與接收機的靈敏度與精準時間同步，天線的靈敏度愈好，則可以收到更小輻射源的信號；接收機的時間同步愈好，則定位的位置愈精準。維拉系統由 4 站台組成：1 個主接收站居中，3 個副接收站分布在主站周圍如圖二，主接收站內有完整的電腦系統、通信系統與控制系統，各接收站台包含有圓柱體結構的

⁴ ERA, “VERA-NG,” <http://era.aero/>, 2015/10/05.

天線及接收機，可架設於建築物、車載與支架上如圖三。

而不只有捷克有時差定位系統，⁵美國在 1976 年發射名為海洋監測衛星系統(Naval Ocean Surveillance Satellite, NOSS)的低軌道衛星，題一組由三個衛星所組成的監測系統，衛星互相間隔 30~110 公里高度約 1,100 公里高的太空中，運用時差定位法原理標定並追蹤目標，目的為偵測目標所發出的輻射電波來確定目標位置。

圖二時差定位示意圖



3D TDOA

資料來源：ERA, “VERA-NG,” <http://era.aero/>, 2015/10/5.

英國的「蜂窩」被動式雷達系統可探測、跟蹤和識別陸上、海上和空中的移動目標，包括在樹叢中運動的車輛，它理論上能夠探測野外環境中 10~15 公里的地面目標和 100 公里的大型飛機。當目標進入探測區域後，引起輻射波的反射，這些反射被一部或多部被動式雷達探測到。檢測資料通過通信網路即時傳送到中央控制系統，從而確定目標的位置和速度。⁶該被動式雷達系統除了反射雷達的輻射信號外，還可利用感測器探測到目標輻射出的雜訊，有助於確定目標位置。在用於預警時，可以安裝在坦克中或預警機上。該系統可用於海岸監視、戰場偵察、特種情報收集(例如對機場活動進行秘密的無人監控)、邊防安全及近海作戰等。⁷沿海岸線部署的「蜂窩」被動式雷達可用於艦船檢測、輔助搜救、領航、告警等任務。還可將其安裝在預警機上可探測 100 公里的飛機。^{8,9}

⁵ 林志民、陳以明、廖文照、劉馨勤、鄧俊宏、林宏志，〈無源時差定位電偵系統技術研析(整合型)〉《國家中山科學研究院 103 年度國防科技學術合作計畫成果發表會》，民國 103 年 11 月 13 日。

⁶ 台灣 WiKi，〈無源雷達〉，<http://www.twwiki.com/wiki/%E7%84%A1%E6%BA%90%E9%9B%B7%E9%81%94>，2016 年 3 月 19 日。

⁷ 〈無源雷達〉《Baodu 百科》，<http://baike.baidu.com/view/135441.htm>，2016 年 3 月 19 日。

⁸ 〈無源雷達：英國「蜂窩」雷達〉《鐵血網》，http://bbs.tiexue.net/post2_9743522_1.html，2016 年 3 月 19 日。

⁹ 同註 5。

圖三 維拉-NG



資料來源：ERA, “VERA-NG,” <http://era.aero/>, 2015/10/5.

二、被動式電偵系統之時差定位法執行架構及方法

被動式電偵系統之時差定位法架構流程圖如圖四所示，透過量測目標輻射源到達各站台時間差與各站台之間的距離來定位目標的位置。利用信號到達各地面被動式電偵系統之時差定位電偵站台的時間差，對輻射源進行二維雙曲線或三維雙曲面定位。

設有 1 個主站台與 4 個次站台，雷達目標與雷達站台距離為 D_p $p=1,2,3,4$ 並假設雷達站台 ESM_p $p=1,2,3,4$ 的座標位址是已知的如圖五，依據直角三角形定理可得知下式(1)距離公式：¹⁰

$$D_p = \sqrt{(X - ESM_p)^2} \quad \text{for } p=1,2,3,4 \quad (1)$$

因電磁波的傳輸速度是依據光速來計算 $c = 3 \times 10^8$ m/sec，並可得知目標與雷達站距離的時間

$$\tau_p(k) = D_p / c \quad (2)$$

按照(1)和(2)式假設，然後可得知

$$\Delta \tau_{pq} = \tau_p - \tau_q \quad \text{for } p=1 \sim 3, q=2 \sim 4 \text{ and } p \neq q \quad (3)$$

在根據(1)和(2)式，能夠得到範圍內的距離的差異

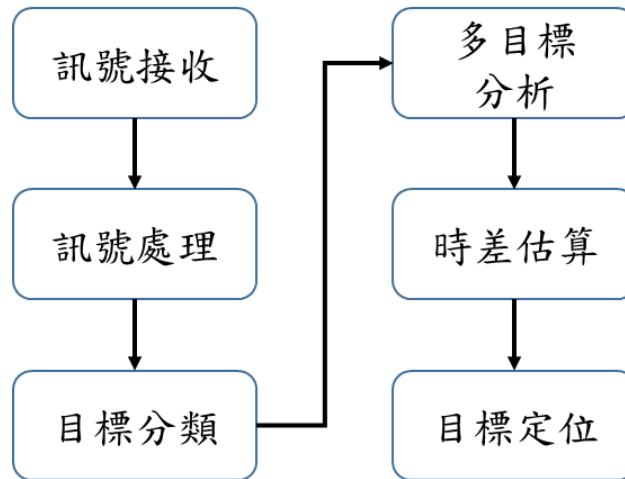
$$\Delta d_{pq} = \Delta \tau_{pq} \times c \quad \text{for } p=1 \sim 3, q=2 \sim 4 \text{ and } p \neq q \quad (4)$$

依據上式中可量測的到站台之間的差距，可以定義為

$$\Delta d_{pq} = \{\Delta d_{12} \Delta d_{13} \Delta d_{14} \Delta d_{23} \Delta d_{24} \Delta d_{34}\} \quad (5)$$

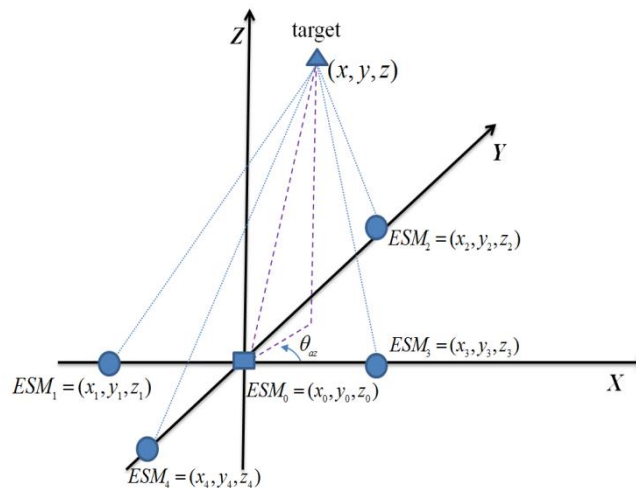
¹⁰ C. M. Lin and C. S. Hsueh, “Adaptive EKF-CMAC base multisensory data fusion for maneuvering target,” IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol.62, no.7, 2013, pp.2058-2066.

圖四時差定位系統架構圖



資料來源：本研究整理

圖五目標位置定義方式示意圖



資料來源：C. M. Lin and C. S. Hsueh, "Adaptive EKF-CMAC base multisensory data fusion for maneuvering target," IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol.62, no.7, 2013, pp.2058-2066.

並兩站台之間的差異可以定義為 $L_n \quad n = 1 \cdots 6$

$$\begin{aligned}
 L_n &: x(x_q - x_p) + y(y_q - y_p) + z(z_q - z_p) \\
 &= 0.5 \times (A_q^2 - A_p^2 + \Delta d_{pq}^2) + \Delta d_{pq} D_p \\
 &\text{for } p = 1 \sim 3, q = 2 \sim 4 \text{ and } p \neq q
 \end{aligned} \tag{6}$$

當 $A_p^2 = (x_p^2 + y_p^2 + z_p^2)$ ，依據上式解聯立我們可以得知 $(x(k), y(k), z(k))$ 目標的座標。

因此，假設在理想情況下，可以推導出目標物的所在位置，而被動式電偵系統的定位方法並非只有一種，在參考文獻^{11,12,13,14}中也提出不同的定位技術。

¹¹ 邱育倫、黃正光、潘佑維，〈多輻射源複雜脈波訊號之抵達時差定位法則研析〉《新新年刊》(桃園)，第 11 卷第 1 期，國家中山科學研究院，2015 年，頁 194~203。

¹² 胡來招，《無源定位》(國防工業出版社，2004 年)，頁 31~38。

¹³ 孫仲康、周一宇、何黎星，《單多基地有源無源定位技術》(國防工業出版社，1996 年)，頁 24~26。

三、時差定位的未來趨勢

時差定位可能是今後軍事方面 10~20 年的一個重要發展方向。隨著通信衛星或地面通訊站台的普及，伴隨者手機或者其他通信裝置的快速發展，未來生活居住的空間中將充滿輻射源信號。時差定位搭配被動式電偵系統，可充分利用這些輻射源進行目標探測和定位。站台本身不發射電磁波信號，而是被動的接收電磁波信號為最大的優勢所在，難以察覺正被偵測與定位。還有被動式電偵站台的體積小，可以安裝於移動載具上，容易部署與機動性強。但是被動式電偵站台本身無法發射電磁波信號，既為優點也是缺點，由於需目標物或第三方輻射源發射電磁波信號才能定位，若在探測目標物的同時，該目標物沒有發射電磁波信號，也沒有第三方發射任何電磁波信號，則時差定位法就無法發揮作用。

因此，可考慮將時差定位與雷達結合使用。如以雙/多基地方式合理佈設被動式電偵站台和雷達，當目標電磁輻射不存在或無法利用時，利用被動式電偵站台接收已知雷達的直射信號與目標的反射信號，則可對目標進行定位。這樣既提高了被動式電偵站台的使用率，也增強了目標探測與偵蒐能力。

被動式電偵站台佈建研析

時差定位法的定位精準度與站台佈建位置有關，為了分析站台位置不同與對定位的精準度影響，本論文收集國防科技成果發表會的文獻¹⁴資料，嘗試使用較為淺顯易懂的方式解釋在不同站台佈建情況下對目標定位精準度的影響。在參考文獻中影響程度的大小則用幾何精度稀釋函數(Geometric Dilution of Precision, GDOP)的數值來呈現，使用 GDOP 目的為了讓讀者能夠從比較數值的大小來判斷定位精準度的好壞，GDOP 的值愈小，則代表估算出來的位址愈實際。

一、研究方法及架構

在參考文獻¹⁶中學者利用上一章節中說明的時差定位方法進行更進一步的分析。其目的是為了說明被動式電偵站台的佈建會影響到對目標進行定位時的精準度。除此之外，該文獻還利用類神經網路中的退火法(Simulated Annealing, SA)結合禁忌搜索演算法(Tabu Search)尋找調整電偵站台佈建位置的最佳 GDOP 參數值。GDOP 可提供給電偵站台做為提升定位精準度的效能指標，在文獻中提出其中一個電偵站台以行動方式進行機動運作，藉由行動站台的位置改變，進而形成基地站台與行動站台的新位址配置，達到降低 GDOP 以提升定位精準度的目的。

¹⁴ 孫仲康、郭福成、馮道旺，《單站無源定位跟蹤技術》(國防工業出版社，2008 年)，頁 1~21。

¹⁵ 同註 5。

¹⁶ 同註 5。

在 1943 年沃倫·麥卡洛克(Warren McCulloch)與華特·匹茲(Walter Pitts)提出了基於數學與生物神經元運作的數學模型文章，¹⁷之後經過多年演變與多位學者的探討研究，已經演變為較為成熟的演算法，可解決複雜又非線性的問題，該演算法被後人稱為人工類神經網路(Artificial Neural Network)或類神經網路(Neural network)。設計者可以根據不同的問題設計出相對應的類神經網路，而設計出來的類神經網路是可以自我學習與調整，最後達到設計者所想要或期望的結果的演算法，因類似於人類大腦中的神經網路一樣，故稱為類神經網路。而類神經網路包含了很多種的演算法則，其中的退火法則是類神經網路的經典演算法則。

在 1953 年 Metropolis 等人提出退火演算法，¹⁸退火演算法是模擬物資結晶的退火程序發展出來的一套理論。而在 1983 年 Kirkpatrick 等人運用退火演算法來解決最佳化的問題，¹⁹退火演算法在針對最佳化問題的求解過程中產生許多參數值對應於演算法可解決問題，並以極高的機率求得最佳解。而禁忌搜索是 Fred Glover 在 1989 年提出，²⁰其目的是記錄先前幾次得到的數值，以避免程式或演算法在計算時，數值倒退或一直重複的狀況，這樣可提高找到最佳解決的機率。因此，退火神經網路與禁忌搜索互相搭配可以找到最佳站台位址，提高定位的精準度。

在參考文獻中利用三個電偵站台定位和卡爾曼濾波器(Kalman Filter)做目標運動分析，流程圖如圖六所示，利用 GDOP 來規劃電偵站台中的行動站台移動路徑。在移動過程中，行動站台能有效避開高 GDOP 值的區域，尋找較低 GDOP 的最佳位址並維持穩定的行動站台之移動路徑，達成電偵站台的定位精準度的最佳佈建。

圖六站台佈建流程圖



資料來源：本研究整理

二、模擬結果

參考文獻中是以時差定位方法進行對於目標定位分析，其中目標為移動式，電偵

¹⁷ W. McCulloch and P. Walter, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," The bulletin of mathematical biophysics, vol. 5, no.4, 1943, pp.115-133.

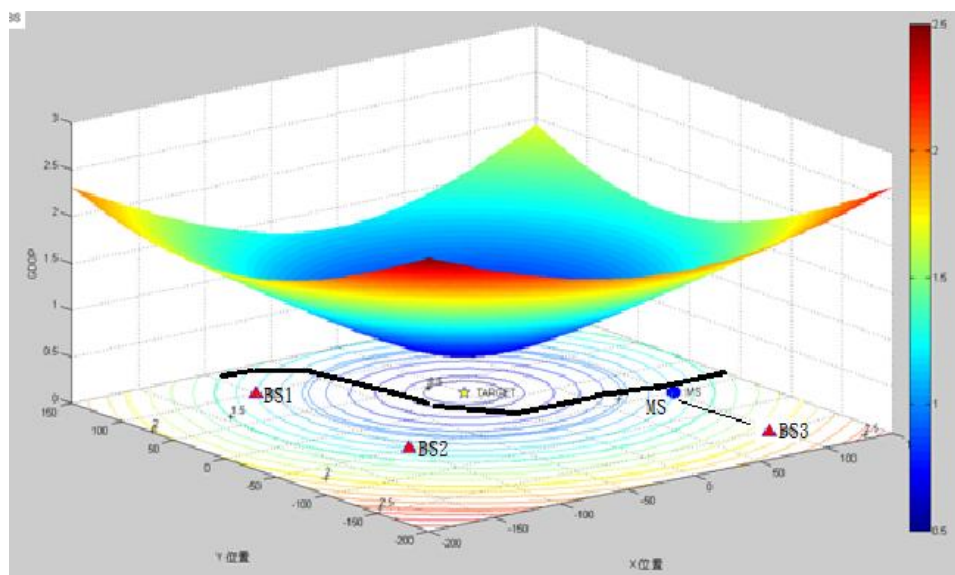
¹⁸ N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," The journal of chemical physics, vol.21, no.6, 1953, pp.1087-1092.

¹⁹ S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," Science, vol.220, no.4598, 1983, pp.671-680.

²⁰ F. Glover, "Tabu search-Part I," Operations research society of America, vol.1, no.3, 1989, pp.190-206.

站台的種類分為基地站台與行動站台，為了因應其移動的目標，導入 Kalman 濾波器對目標運動模型參數進行估測，俾提供電偵站台間動態 GDOP 的即時計算。參考文獻中是模擬海岸沿線由兩個基地站台（BS）與一個行動站台（MS），使用時差定位法對一固定式目標進行定位，假設兩個基地站台（BS1、BS2）其位置資訊為： $P_{BS1} = (Y \text{ 軸 } 121.125、X \text{ 軸 } 25.004)$ $P_{BS2} = (Y \text{ 軸 } 121.1107、X \text{ 軸 } 25.015)$ ，行動站台之初始位置為： $P_{MS} = (Y \text{ 軸 } 121.114、X \text{ 軸 } 25.032)$ ，目標位置資訊為： $P_{pt} = (Y \text{ 軸 } 121.110、X \text{ 軸 } 25.115)$ 。經由退火演算法模擬海岸沿線(圖七黑色粗線)基地台、目標與行動台路徑解算，其中 P_{MS} 移動至新佈建位置為 $P_{BS3} = (Y \text{ 軸 } 121.1101、X \text{ 軸 } 25.021)$ ，最後可看到三個電偵站台佈建最適化結果，更能從其佈建之 GDOP 函數等高線圖與佈建分布圖，進而看出行動台之移動方向符合地形限制之佈建情況。

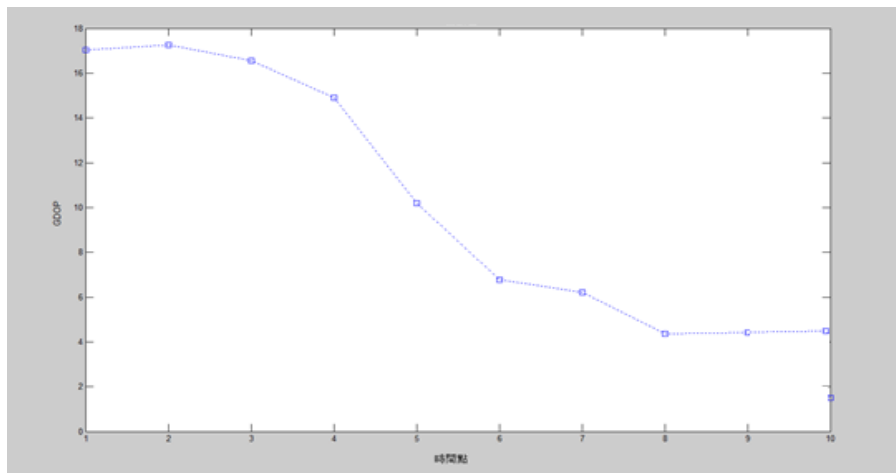
圖七目標行動台移動路徑與 GDOP 函數分布等高線圖



資料來源：林志民、陳以明、廖文照、劉馨勤、劉慶華、林宏志，〈無源時差定位電偵系統技術研析 (1/2)〉《行政院國家科學委員會輔助專題研究計畫成果報告》，民國 102 年 12 月 31 日，頁 20。

在圖八中可以看到隨著時間的推進，由 GDOP 函數 SA 演算法所計算的數值有漸漸變小的趨勢並且有顯著的收斂情形，證明行動站台是往促使 GDOP 函數值愈小的方向前進。幾何精度稀釋函數值的分析，由於不同的目標位置有著不同的 GDOP 分布情形，在針對多電偵站台的部分給予兩種形式，分別為固定式的基地站台（BS1、BS2）與可移動的行動站台，隨著不同的 GDOP 分布，行動站台可以即時移動至最佳位置，改變幾何分布進而降低 GDOP 效應。模擬退火法作為行動站台搜尋最佳解決的方法，因為其具有跳脫區域最小值，進而找到全域最小值的特性，這個特性非常符合行動站台在 GDOP 分布函數中搜尋最佳佈建位置情形。

圖八 目標定位之 GDOP 函數值



資料來源：林志民、陳以明、廖文照、劉馨勤、劉慶華、林宏志，〈無源時差定位電偵系統技術研析(1/2)〉《行政院國家科學委員會輔助專題研究計畫成果報告》，民國 102 年 12 月 31 日，頁 20。

結論

本文中介紹了時差定位法，該方法搭配被動式電偵站台，可提升被動式電偵站台的整體效能，使得整個被動式電偵系統能夠有更良好的定位功效。最後在根據參考文獻的範例來解釋被動式電偵站台的佈建位址與目標定位的精準度有極大的關係，若站台佈建位址不好，則在定位上的精準度就會有誤差的存在。被動式電偵站台有許多良好的優點，該優點在作戰時若運用得當，將會發揮極大的功效。所以，許多先進的國家目前都還在一直投入金錢與人力在這方面的科技上。因此，希望讀者能夠在閱讀完本論文之後，能夠對目前被動式電偵系統在定位的方面有更深刻的了解。

參考文獻

- 一、張廣庶、王彥輝、鄧秀書、張彤、趙玉祥、李亞珺、曹冬傑，〈基於時差法三維定位系統對閃電放電過程的觀測研究〉《中國科學地球科學》，第 20 卷第 4 期，2010 年。
- 二、資料來源：林志民、陳以明、廖文照、劉馨勤、劉慶華、林宏志，〈無源時差定位電偵系統技術研析(1/2)〉《行政院國家科學委員會輔助專題研究計畫成果報告》，民國 102 年 12 月 31 日，頁 20。
- 三、〈無源雷達〉《台灣 Wiki》，<http://www.twiki.com/wiki/%E7%84%A1%E6%BA%90%E9%9B%B7%E9%81%94>，2016 年 3 月 19 日。
- 四、〈無源雷達〉《Baodu 百科》，<http://baike.baidu.com/view/135441.htm>，2016 年 3 月 19 日。
- 五、BenoCutenberg, "Earthquakes and Structure in Southern California," Geological Society of America Bulletin, vol.54, no.4, 1943.

- 六、C. M. Lin and C. S. Hsueh, “Adaptive EKF-CMAC base multisensory data fusion for maneuvering target,” IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol.62, no.7, 2013.
- 七、W. McCulloch and P. Walter, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,” The bulletin of mathematical biophysics, vol. 5, no.4, 1943.
- 八、N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller and E. Teller, “Equation of state calculations by fast computing machines,” The journal of chemical physics, vol.21, no.6, 1953.
- 九、S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” Science, vol.220, no.4598, 1983.
- 十、F. Glover, “Tabu search-Part I,” Operations research society of America, vol.1, no.3, 1989.

作者簡介

薛吉順，中正理學院兵研所、元智大學電機工程博士，曾任排長、副連長、中科院技士、技正，現任國家中山科學研究院資通所電子戰組組長。

陳智宏，中山大學電機系、中山大學電機所，曾任聯華電子、中科院，現任國家中山科學研究院資通所技士。

鍾長志，元智大學電機所碩士、元智大學電機所博士，現任國家中山科學研究院資通所研發替代役。