

閃電之定位與誤差模擬--雷達干涉法與時間差法之分析與研究

蘇清論¹、曾子弋¹、陳祥章²、龔瑞鳴²、鍾明哲¹、朱延祥¹
國立中央大學太空科學研究所¹、國家中山科學研究院²

摘要

當閃電發生時，由於雲中帶電粒子受到大氣電場的作用所引起的巨大電流，會產生強烈的電磁波輻射。利用雷達接收閃電所產生的電磁輻射，並運用適當的閃電定位技術，如磁測向定位法(Magnetic Direction Finding, MDF)、到達時間差定位法(Time Difference of Arrival, TDOA)等，可以定位出閃電發生位置。目前國際上各國均使用被動式(Passive)閃電偵測系統，進行閃電落雷的例行性監測。若閃電偵測系統建置位置不當，或未經常進行系統校驗(Calibration)，或受到環境干擾等因素，往往會產生錯誤的閃電定位結果。在本文中，模擬被動式閃電偵測系統的可能定位誤差，利用誤差模擬結果，掌握被動式閃電偵測系統的定位精度。同時，主動式(Active)脈波相位雷達系統，將視閃電行徑路徑所產生的高溫熾熱的游離態大氣電漿(Plasma)為目標物，進行主動偵測。透過獨特設計的相位陣列天線，接收雷達回波，根據雷達干涉法，精確定位出閃電發生位置。利用此雷達系統，配合誤差模擬結果，將可以調校被動式閃電偵測系統的定位誤差，同時可以觀測閃電的空間結構與變化。本研究利用主動式閃電偵測系統與誤差模擬，針對台電閃電偵測系統所接收定位資料，進行系統校驗，確認台電系統存在明確的系統誤差。

關鍵字：閃電、雷達、雷達干涉法、磁測向法、到達時間差法、系統校驗

一、前言

台灣位處亞熱帶的海島之上，東臨太平洋，西有台灣海峽與亞洲大陸相接。由於地理位置特殊，台灣屬於季風型氣候區，每當春夏交接之始，因為鋒面與低壓系統所導致的不穩定對流作用，常發生閃電落雷事件；之後一直到秋末，則多因颱風或午後對流不穩定現象，產生劇烈的天氣變化，亦伴隨有閃電落雷現象的發生。這些閃電落雷事件，對於人民生命財產安全有直接的威脅。另外，無論直接擊中或間接傳導，這些落雷事件更常造成各項電力與資訊設施的損毀，對國計民生影響甚鉅。為減少閃電落雷事件的損失，世界各國長期以來紛紛發展與建立閃電落雷偵測系統，以便監測並掌握閃電的發生、強弱、移行方向等。除此之外，閃電偵測系統所蒐集之資料，亦可提供產官學研各界的使用，對於天氣預報之精進、飛航安全的維護、重要建築設施資訊與電力安全的確保、閃電落雷災害的預警等等，均可產生重要且關鍵的效益。基於上述，閃電偵測結果的準確與否，將直接影響國家發展與民生安全，有必要受到重視。此外閃電偵測系統之設立，亦符合國際氣象觀測儀器的未來發展趨勢，使我國氣象局之觀測設備與業務，得以跟上世界潮流。但閃電偵測系統的定位精度，直接影響應用成效，故必須掌握閃電偵測系統的狀況。

被動式閃電偵測系統定位技術，是以磁測向定位法與到達時間差定位法為主，接收閃電所產生的電磁輻射進行定位。Krider et al. (1976)提到磁測向法定位，經由兩個正交環型天線(loop antenna)進行磁場測向，必須兩個或兩個以上偵測站進行觀測，方可獲得精確的閃電位置定位。Marchand, Nathan(1964)針對各偵測站的訊號到達時間，建立目標物輻射訊號，使用到達時間

定位法進行定位分析推導。Kenneth et al. (1998, 2000)介紹美國國家閃電偵測網(U.S. National Lightning Detection Network)監測閃電定位，利用到達時間法與磁測向法計算閃電位置。使用到達時間定位法，主要閃電發生在兩個監測站之間，與兩偵測站形成雙曲線關係，理論上便可使用多站進行定位；亦針對閃電發生時，輻射出VLF/LF/HF/VHF各頻段電磁訊號進行探討，並用這些訊號進行合適閃電定位方法分析。

不管是磁測向定位法或到達時間定位法定位精度的部分，受到一些因素的影響，包含監測站所在環境、閃電輻射電磁波的路徑環境、系統本身的部分、各偵測站時間同步與否等，可能造成相當的定位誤差。廖建興與曾孝忠(2009)針對兩個磁測向定位方法與到達時間定位法，進行推導與誤差計算。楊波等(2006)、梁華等(2007)、張娟等(2009)、Hu et al.(2009)計算閃電偵測站三個與三個以上的定位誤差模擬。本文中將針對台灣電力公司與中央氣象局分別建置的閃電偵測系統，進行定位誤差模擬，以掌握閃電偵測系統精度。

一般閃電偵測系統以被動式偵測定位為主，定位系統受到設立環境與本身系統設計的限制，誤差存在是必須被模擬與了解，但更進一步的精度驗證將必須被實行。Rottger et al. (1995)使用中壢VHF ST雷達觀測閃電，由雷達系統發射訊號，入射閃電發生後，高能燃燒中性大氣，所產生的電漿不規則體，再接收雷達回波訊號，討論閃電的回波特性的Rhodes et al. (1994)利用五根接收干涉天線陣列，接收閃電發生時，輻射出的VHF訊號，進行方位角與仰角的計算。M. Petitdidiera與P. Larocheb(2005)利用VHF雷達觀測閃電事件，獲得一些閃電路徑上，因高溫熾熱游離的大氣電漿散射回來的回波訊號。本研究將結合兩者，利用中壢VHF雷達與新建

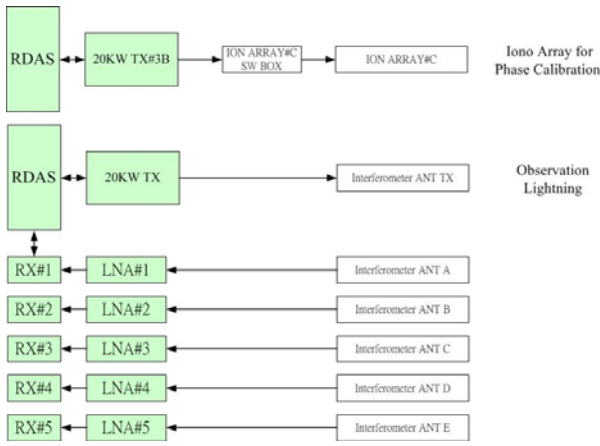


圖1、中壢特高頻雷達閃電觀測系統方塊圖。

置的不等間距十字型干涉天線陣列，進行主動式觀測。此一架構，將可用來驗證被動式接收系統。

二、實驗觀測

被動式閃電偵測系統主要由多個站台組成，閃電偵測定位由其中兩個或兩個以上的站台進行。台灣電力公司在台灣本島建置被動式閃電偵測網，以8個偵測站建構。為了對台電閃電偵測系統進行校驗，中央大學中壢特高頻雷達於閃電發生的大氣環境下，進行同步觀測。本文使用資料有二：一為中壢特高頻雷達於中大校園2013年4月5日00:50-06:45觀測，另一為於中央氣象局新屋氣象站2013年5月20日19:30-24:00觀測。

2.1、實驗參數設定

圖1為中壢特高頻雷達觀測閃電系統方塊圖，發射功率分別使用5kW與20kW，五個接收機，發射天線為單根八木天線，接收天線為5根八木天線形成的十字型不等間天線陣列。圖2為中壢特高頻雷達天線陣列佈列圖，左邊即為用於系統相位校正的觀測電離層發射天線陣列，右邊為十字型干涉天線陣列與單根發射天線。圖1中使用中壢特高頻雷達電離層天線陣列觀測電離層不規則體，利用電離層場列不規則體(Field-aligned Irregularities)回波訊號與國際地磁參考模型(IGRF)，進行系統相位校正(Su et al., 2014)。 Φ_{12} 、 Φ_{13} 、 Φ_{14} 、 Φ_{15} 分別為各接收機與接收機1之間的相位差，經由計算結果4月5日與5月20日系統相位校正修正量，分別為($\delta\Phi_{12} = 21.6^\circ$ 、 $\delta\Phi_{13} = -61.4^\circ$ 、 $\delta\Phi_{14} = 77.6^\circ$ 、 $\delta\Phi_{15} = -89.7^\circ$)與($\delta\Phi_{12} = -29.42^\circ$ 、 $\delta\Phi_{13} = -4.15^\circ$ 、 $\delta\Phi_{14} = -51.99^\circ$ 、 $\delta\Phi_{15} = 315.67^\circ$)。雷達觀測參數為脈衝重複頻率(Pulse Repetition Frequency, PRF)3000 Hz，發射週期(Inter Pulse Period)為333.3 μ s，發射脈波長度為1 μ s，同相積分8次。

2.2、雷達干涉法

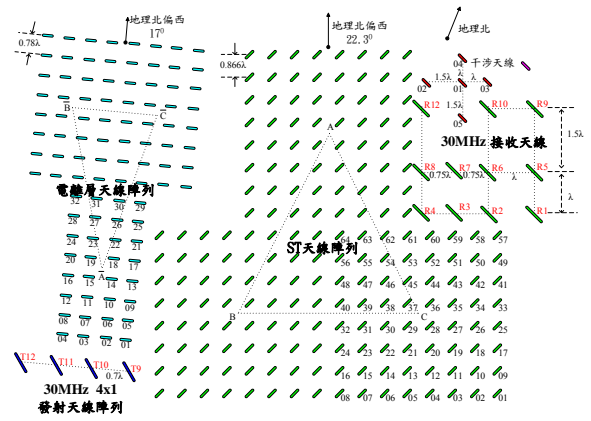


圖2、中壢特高頻雷達天線陣列圖。

當閃電發生時，閃電行經路徑上產生大量高溫熾熱的游離態電漿(Plasma)，被中壢特高頻雷達視為目標物。根據布拉格散射(Bragg scattering)理論，將散射雷達波，被雷達接收，可使用圖2中不等間距干涉天線陣列接收回波訊號進行定位。首先，將前節系統相位校正量代入修正後，推導獲得方位角 φ 與天頂角 θ

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\Phi_{12}}{\pi} C_{13} - \frac{\Phi_{13}}{\pi} C_{12}}{\frac{\Phi_{15}}{\pi} C_{14} - \frac{\Phi_{14}}{\pi} C_{15}} \cdot \frac{3C_{14} + 2C_{15}}{3C_{13} + 2C_{12}} \right)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{\Phi_{12}}{\pi} C_{13} - \frac{\Phi_{13}}{\pi} C_{12}}{\sin \varphi (3C_{13} + 2C_{12})} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{\Phi_{15}}{\pi} C_{14} - \frac{\Phi_{14}}{\pi} C_{15}}{\cos \varphi (3C_{14} + 2C_{15})} \right)$$

$$\text{其中 } C_{12} = \frac{\Phi_{12}^2}{4\pi^2} - 2.25 \quad C_{13} = \frac{\Phi_{13}^2}{4\pi^2} - 1$$

$$C_{14} = \frac{\Phi_{14}^2}{4\pi^2} - 1 \quad C_{15} = \frac{\Phi_{15}^2}{4\pi^2} - 2.25$$

另外，中壢特高頻雷達為一脈波雷達，發射脈波長度為1 μ s，將可獲得距離解析度為150 m閃電相對於雷達站的發生位置。

圖3為主動式閃電偵測系統2013年5月20日觀測到的閃電發生時，游離大氣電漿，所產生的雷達回波訊號。該筆訊號包含被動接收訊號，與顏色較深的主動雷達波訊號。將主動式閃電訊號使用雷達干涉法去進行定位，如圖4所示。圖4中所顯示為閃電發生時，游離大氣電漿的雷達回波訊號定位結果，顯現閃電行經路徑的方位角與天頂角分布情形。

經由雷達干涉定位法與脈波雷達特性，圖3中主動式閃電偵測訊號的3維分布狀況，如圖5。圖中將定位出的資料點加上時間資訊(以不同色階表示)，每一個色階表示一個時間解析度，例如色階101表示，所對應的閃電回波的發生時間為相對於第一個閃電回波(以深藍色階1來表示)發生時間，經過100個時間解析度(也就是 $100 \times 0.002664\text{s} = 0.2664\text{s}$)的時間，換言之，色階101表示第一個閃電發生後第0.2664秒的時間。圖中顯現在高度較高的地方，先產生回波(藍色部分)，接著藍綠色、綠色、黃色發生在中間，橘色的部分已經

接近地表，顯現出雷達觀察閃電的結構及各部分發生時間的先後順序。

接下來本研究將使用主動式閃電偵測系統資料，與台電被動式閃電偵測系統資料進行比對，驗證被動式接收定位的誤差情形。

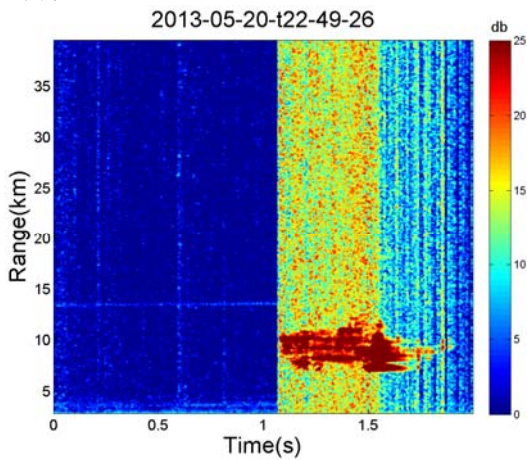


圖3、主動式閃電偵測系統於新屋氣象站觀測到的閃電電漿回波訊號。

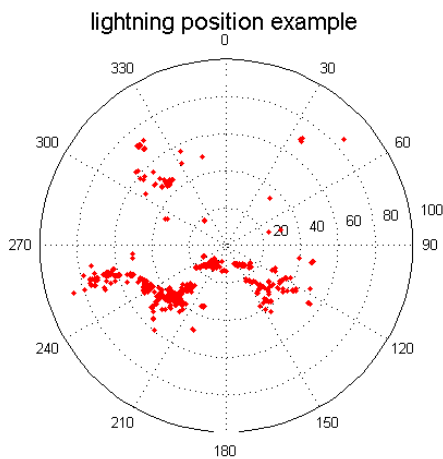


圖4、為圖3中使用雷達干涉定位法，所獲得的閃電游離大氣高能電漿雷達回波方位角與天頂角分布。

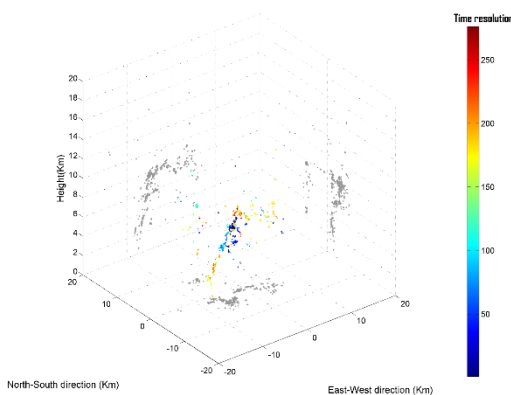


圖5、表示圖3中訊號，主動式閃電偵測系統於新屋氣象站閃電訊號三維分布圖，時間2013年5月20日。

三、被動式閃電定位誤差模擬

台電閃電偵測系統是因應電力供應系統的架設與維護需求而建立的，由於此曾經為台灣唯一一套被動式閃電偵測系統，故被廣泛應用到民生防雷與飛航安全上。經氣象局與相關學者長期分析其觀測接收資料，並與氣象資料比對，發現此套系統有可能有存在系統偏差導致定位準確度有疑問。本研究將利用2013年4月5日與5月20日，與台電系統聯合觀測機會，建置被動式閃電定位誤差的模擬，並比較兩者同時觀測到的閃電發生位置，釐清台電閃電偵測系統可能的系統與定位特性。

3.1、磁測向定位法誤差模擬

由於2013年4-5月台電閃電監測系統所記錄的閃電定位資料，大部分是由2個或3個偵測站獲得。其中3個閃電偵測站獲得的資料，勉強可由到達時間差法進行定位。但是當偵測到閃電輻射出的電磁波回波訊號，只有兩個偵測站接收到訊號，到達時間差法無法進行定位，只能利用磁場測向定位法進行定位。雙偵測站誤差模擬參考 Xiu et al.(2005)及廖建興與曾孝忠(2009)，利用測角誤差進行雙偵測站磁場測向定位的誤差模擬。

磁測向定位儀器存在測角的誤差，兩測站所測得的方向加上測角誤差 $\pm\Delta\theta_{max}$ ($\Delta\theta_{max}$ 為最大測角誤差，在本文利用平均值為0、標準差為0.5°、常態分布的隨機變數 $\Delta\theta$ 取代最大測角誤差，此隨機變數為磁測向定位儀的測角誤差)，延伸線會交會形成一個四邊形，也就是定位模糊區，如圖6所示。 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分別為兩測站的座標，T點為閃電發生估計位置， (x_T, y_T) 為T點座標， θ_1 、 θ_2 分別為實際位置到兩測站的方位角， α_1 、 α_2 分別為兩測站與估計位置所圍三小角中的兩個內角，R為兩測站基線長度， r_1 、 r_2 分別為兩測站到閃電估計發生位置的距離， $\Delta\theta_{max}$ 為最大測角誤差。

假設距離兩測站很遠、 $\Delta\theta_{max}$ 較小，意即 r_1 、 r_2 的尺度遠大於定位模糊區，可將定位模糊區近似為平行四邊形ABCD。經數學推導，當閃電實際發生位置位於B、D點時，誤差 $TB = TD = l_1$ ；當閃電實際發生位置位於A、C點時，誤差 $TA = TC = l_2$ 。

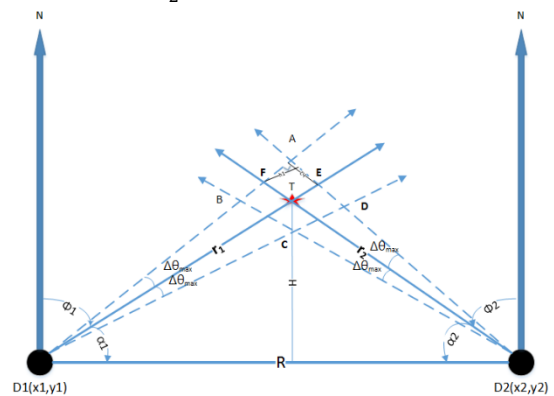


圖6、雙偵測站測向交叉定位模糊區示意圖。

$$l_1^2 = \frac{R^2 \Delta \theta^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} [\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 + 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]$$

$$l_2^2 = \frac{R^2 \Delta \theta^2}{\sin^4(\alpha_1 + \alpha_2)} [\sin^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_2 - 2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)]$$

最大誤差為 l_1 及 l_2 取其較大值，以最大誤差作為網格點T的定位誤差，假設該網格點偵測到100次閃電發生，所求得誤差取平均值，即為網格點的模擬定位誤差。根據此一推導，將針對台電閃電監測系統進行誤差模擬，作為與主動式閃電偵測系統獲得的閃電資料進行比對。

3.2、到達時間差定位法誤差模擬

3.2.1、三個閃電偵測站誤差模擬

三偵測站參考 Marchand(1964)、楊波(2006)與廖建興(2009)的方法，利用最佳估計位置進行模擬。首先同樣根據測站接收訊號的時間差，可得 τ_j 為各站到達時間

$$\tau_j = \tau_a - \tau_b \quad (a \neq b)$$

其中 $j = 1, 2, 3$ ，表示三個測站兩兩一組的三種組合。三組雙曲線因為誤差影響不交於同一點，三個交點和雙曲線所夾的區域，我們稱為定位模糊區，假設定位模糊區足夠小，使此區域可視為雙曲線切線所圍成。Marchand(1964)推導三個偵測站的定位誤差模擬， θ_j 為第 j 組雙曲線切線和X軸夾角。最佳估計位置座標 (x_0, y_0)

$$x_0 = \frac{1}{AB-C^2} [\sum_{j=1}^3 K_j \Delta \tau_j \frac{C \cos \theta_j - B \sin \theta_j}{K_j^2 \sigma_{\tau_j}^2}]$$

$$y_0 = \frac{1}{AB-C^2} [\sum_{j=1}^3 K_j \Delta \tau_j \frac{A \cos \theta_j - C \sin \theta_j}{K_j^2 \sigma_{\tau_j}^2}]$$

$$A = \sum_{j=1}^3 \frac{\sin^2 \theta_j}{K_j^2 \sigma_{\tau_j}^2}, \quad B = \sum_{j=1}^3 \frac{\cos^2 \theta_j}{K_j^2 \sigma_{\tau_j}^2},$$

$$C = \sum_{j=1}^3 \frac{\sin \theta_j \cos \theta_j}{K_j^2 \sigma_{\tau_j}^2}$$

$$K_j = \frac{150}{\sin \alpha_j}$$

$\Delta \tau_j$ 為時間差

$\sigma_{\tau_j}^2 = \sigma_{\tau_a}^2 - \sigma_{\tau_b}^2$ ， $\sigma_{\tau_a}^2$ 與 $\sigma_{\tau_b}^2$ 為各站 τ_j 的變異數

最佳估計位置和實際位置的距離即為誤差，同樣因為含有隨機變數，每個實際位置都假設發生100次閃電，所得的誤差取平均值，即為網格點的模擬定位誤差。

3.2.2、四個或以上閃電偵測站誤差模擬

Koshak(1996)以及張文娟(2009)四個或四個以上誤差模擬，閃電定位系統不計算回擊發生的高度，並且忽略大氣折射的影響，假設閃電輻射出的電磁脈衝，是以光速沿水平傳播。

假設 (x, y) 為閃電發生的真實位置座標， t 為閃電發生的時間， (x_m, y_m) 、 (x_n, y_n) 為第 m 、 n 個偵測站的位置座標， t_m 、 t_n 為電磁脈衝到達第 m 、 n 站的時間， C 為光速，利用

距離為速度乘以時間，假設有 i 個偵測站，方程式組用矩陣的形式表示

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{(C_i^2)_1} & a_{(C_i^2)_2} & a_{(C_i^2)_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{(C_i^2)} \end{bmatrix}$$

其中 $a_{m1} = 2(x_m - x_n)$ ， $a_{m2} = 2(y_m - y_n)$ ， $a_{m3} = -2C^2(t_m - t_n)$ ， $P_m = (x_m^2 - x_n^2) + (y_m^2 - y_n^2) - C^2(t_m^2 - t_n^2)$ ($m, n = 1, 2, \dots, C_i^2$)

改寫上式為 $AB = P$ ，其中 A 為係數矩陣， B 為變數矩陣， P 為常數矩陣。當 A 矩陣為非奇異(nonsingular)可逆矩陣時，可得矩陣 B 的解為

$$B = A^{-1}P$$

把經緯度座標網格點化，經度和緯度每 0.05° 設定一個網格點，假設每個網格點在 $t=0$ 時發生閃電，可以經由距各偵測站的距離，得到電磁脈衝到達各偵測站的時間。接著將到達各偵測站的時間，參考相關文獻GPS測時誤差，加上一個平均值為0與標準差為 $1\mu s$ 的常態分布隨機變數，得到考慮測時誤差的情況下電磁脈衝到達各偵測站的時間，利用這個到達時間，解得 B 矩陣中新的閃電位置 (x, y) 並與網格點給定的位置 (x_0, y_0) 相減，為此網格點的定位誤差。當中含有隨機變數，假設每個網格點發生100次閃電，每個網格點定位誤差的平均值即為此網格點的模擬定位誤差。

四、閃電定位誤差分析討論

將中壢高頻雷達—主動式閃電偵測系統，於中大校園與新屋氣象站觀測到的閃電資料，利用十字型不等間距天線陣列的雷達干涉法，定位閃電路徑上的游離大氣電漿，獲得的閃電位置，與台電被動式閃電偵測系統同步觀測資料，使用到達時間差去定位的閃電發生位置，兩者進行比較，將進一步分析被動式閃電偵測系統的特性。

圖7與圖8分別為架設於中大校園與架設於新屋氣象站的主動式閃電偵測系統，與台電閃電監測系統定位誤差比較，時間2013年4月5日與5月20日。左圖皆為主動式偵測系統與台電系統兩個偵測站定位比較結果，右圖為與台電系統

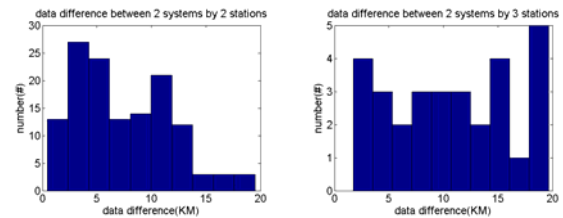


圖7、位於中大校園主動式閃電偵測系統與台電閃電監測系統定位誤差比較，時間2013年4月5日。左圖為台電系統兩個偵測站定位結果，右圖為台電系統三個偵測站定位結果。

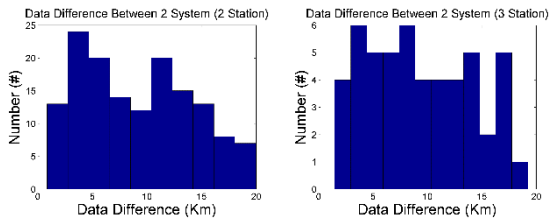


圖 8、主動式閃電偵測系統於新屋氣象站觀測，與台電閃電監測系統定位誤差比較，時間 2013 年 5 月 20 日。左圖為台電系統兩個偵測站定位結果，右圖為台電系統三個偵測站定位結果。

三個偵測站定位比較結果。圖 7 中左圖位於中大校園主動式偵測系統，與台電系統兩個偵測站定位誤差，平均為 7.42 公里；右圖三個偵測站定位誤差，平均為 10.77 公里。圖 8 左圖架設於新屋氣象站主動式系統，與台電系統兩個偵測的平均定位誤差為 9.42 公里；右圖為三個偵測站定位誤差，平均為 9.63 公里。

圖 9 是以台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站，模擬兩偵測站定位誤差，並將圖 7 左圖主動式與被動式閃電偵測定位誤差位置，根據經緯度，以紫色點畫在磁則向定位誤差模擬中。圖 7 左圖明顯有兩個峰值，分別在誤差 3 公里與 11 公里左右。對照圖 9 兩偵測站定位誤差，一般小於兩公里；誤差 3 公里左右峰值，應該有一部分來自於系統誤差；誤差 11 公里左右峰值，可能源自於圖 9 兩偵測站定位誤差中，兩個站之間的連線為磁則向定位法中的一大盲區。圖 10 是以台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站，模擬兩偵測站定位誤差，並將圖 8 左圖主動式與被動式閃電偵測定位誤差位置，根據經緯度，以紫色點畫在磁則向定位誤差模擬中。圖 8 左圖亦有兩個峰值，分別位於誤差 3 公里與 11 公里左右。圖 8、圖 10 之間模擬誤差的結果，與圖 7、圖 9 之間關係是類似的。

圖 11 是以台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站與明潭電廠進水口閘門三站，模擬三偵測站定位誤差，將圖 7 右圖主動式與被動式閃電偵測定位誤差位置，根據經緯度，以紫色點畫在誤差模擬中。圖 7 右圖平均定位誤差約為 10.77 公里，與圖 11 似乎有矛盾之處。圖 12 亦是三個偵測站模擬的定位誤差，再將圖 8 右圖主動式與被動式閃電偵測定位誤差位置，根據經緯度，以紫色點畫在誤差模擬中。圖 8 右圖相較被動式監測站的平均定位誤差為 9.63 公里。

圖 11 與圖 12 除了可能是本身比較樣本數量較少外，毛永毅(2008)討論三個偵測站的到達時間差定位法，特別針對定位法推導時，可能產生的數學上有解與無解進行探討。圖 13 為根據毛永毅論文中提出的討論，根據台電閃電偵測站位置，進行數學上可能出現雙解盲區的現象繪出的分布圖。對比圖 11 中定位誤差位置的紫色點，基本上已接近或正好位於雙解盲區上。圖 12 中顯現出的位置不盡相符，推估亦是到達時間差定位法若是以三個偵測站進行計算，可能出現雙解盲區的現象。

Error Estimation of 2 Station (Km)

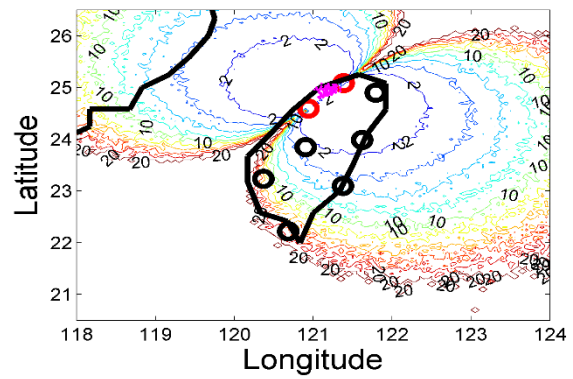


圖 9、台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站定位誤差模擬，紫色點為計算位於中大校園的主動式系統，與該兩偵測站被動式系統定位誤差的位置。

Error Estimation of 2 Station (Km)

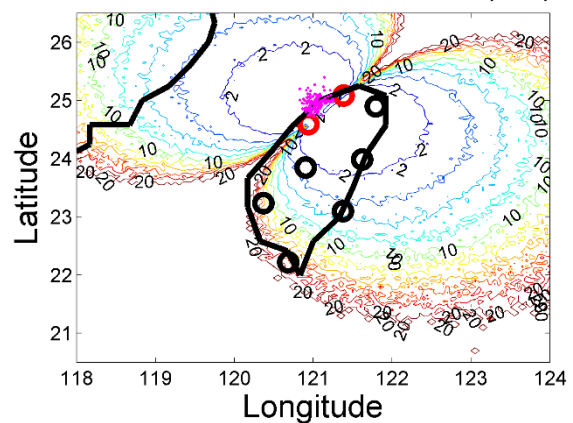


圖 10、台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站定位誤差模擬，紫色點為計算位於新屋氣象站的主動式系統，與該兩偵測站被動式系統定位誤差的位置。

Error Estimation of 3 Station (Km)

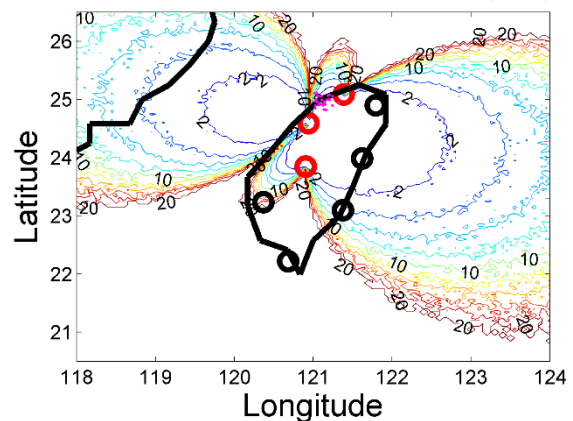


圖 11、台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站與明潭電廠進水口閘門三站定位誤差模擬，紫色點為計算位於中大校園的主動式系統，與該三偵測站被動式系統定位誤差的位置。

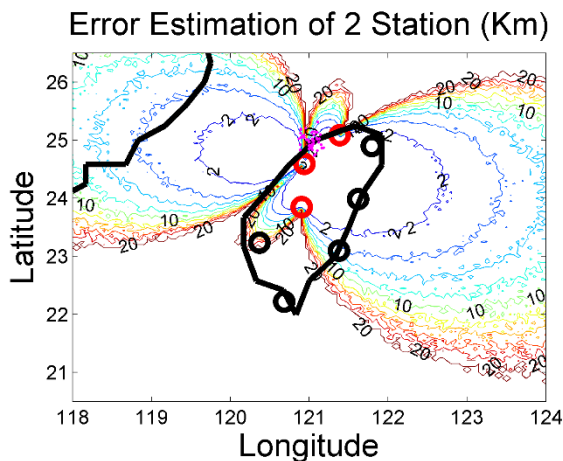


圖 12、台電閃電監測站址林口微波站、吉山微波站與明潭電廠進水口閘門三站定位誤差模擬，紫色點為計算位於新屋氣象站的主動式系統，與該三偵測站被動式系統定位誤差的位置。

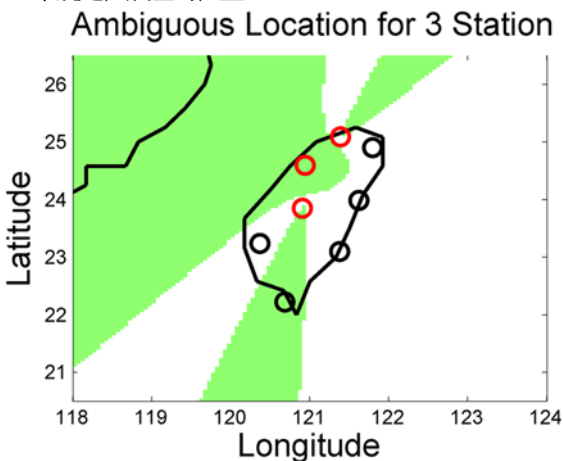


圖 13、3個偵測站定位之誤差模擬定位盲区示意圖。

五、結論

中壢主動式閃電定位系統成功的觀測到閃電所伴隨的高溫緻密的游離態大氣電漿所產生的回波。根據新建置的十字型不等間距相位陣列天線特性，經由電離層不規則體觀測與IGRF模式獲得的系統相位校正後，再利用雷達干涉法可對游離態大氣電漿進行定位，進而可精確定出閃電的發生時間與位置。同時雷達干涉法亦可建構閃電發生時，在空中的三維結構與行進路徑。

由閃電發生時間與三維分布結構分析，主動式雷達系統可正確的分辨出雲對地閃電以及雲中閃電。

經由主動式閃電偵測系統與台電被動式閃電偵測系統同步觀測，蒐集的閃電定位資料，可針對被動式閃電偵測系統進行定位精度驗證。並通過兩個偵測站的磁則向定位誤差模擬，與三個偵測站的到達時間差去定位誤差模擬，配合主動式閃電偵測系統，驗證台電被動式閃電監測系統，發現台電系統似乎存在有系統誤差。

到達時間差定位法使用三個偵測站進行定位時，有定位盲區的存在，已經由主動式閃電偵測系統雷達干涉法，配合台電閃電偵測系統定位資料，獲得實際觀測上的確認，故未

來被動式閃電偵測系統的定位，最少以四個或以上偵測站為主的定位法，獲得可信任的閃電位置。

參考文獻

- C. L. Su, H. C. Chen, Y. H. Chu, M. Z. Chung, R. M. Kuong, T. H. Lin, K. J. Tzeng, C. Y. Wang, K. H. Wu, K. F. Yang, Meteor radar wind over Chung-Li (24.9°N, 121°E), Taiwan, for the period 10-25 November 2012 which includes Leonid meteor shower: Comparison with empirical model and satellite measurements, *Radio Sci.*, DOI: 10.1002/2013RS005273, (accepted)
- C. T. Rhodes, X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and C. O. Hayeng, Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *Journal Of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D6, Pages 13,059-13,082, June 20, 1994.
- E. P. Krider, R. C. Noggle, and M. A. Uman, A gated wideband magnetic direction-finder for lightning return strokes, *J. Appl. Meteor.*, vol. 15, pp. 301-306, 1976.
- Hu Zhixiang, Wen Yinping, Zhao Wenguang, Zhu Hongping, Accuracy Analysis of the TDOA Method in a Lightning Location System, *Management and Service Science*, 2009. MASS '09. International Conference on Date 20-22 Sept. 2009
- J. Rottger, C. H. Liu, C. J. Pan and S. Y. Su, Characteristics of lightning echoes observed with VHF ST radar, *Radio Science*, Volume 30, Number 4, Pages 1085-1097, July-August 1995.
- Kenneth L. Cummins, Martin J. Murphy, Edward A. Bardo, William L. Hiscox, Richard, B. Pyle, and Albur E. Pifer, A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. D8, Pages 9035-9044, April 27, 1998.
- Kenneth L. Cummins, E. Philip Krider, and Mark D. The U.S. National Lightning Detection Network™ and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities, *Ieee Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 4, November 1998
- Kenneth L. Cummins, Martin J. Murphy, Jeffrey V. Tuel, *Lightning Detection Methods And Meteorological Applications*, the IV International Symposium on Military Meteorology Hydro-Meteorological Support of Allied Forces and PIP Members Tasks Realization, September 26 - 28, 2000, Malbork, Poland
- Marchand, Nathan, Error Distributions of Best Estimate of Position from Multiple Time Difference Hyperbolic Networks, *Aerospace and Navigational Electronics*, IEEE Transactions on Volume: ANE-11, Issue: 2, DOI: 10.1109/TANE.1964.4502170, 1964.
- M. Petitdidiera, P. Larocheb, Lightning observations with the Strato-Tropospheric UHF and VHF radars at Arecibo, Puerto Rico, *Atmospheric Research* 76 (2005) 481-492.
- Xiu Jian-juan, Xiu Jian-hua, He You, Location Error Analysis of Direction Finding Location System, *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005.

- 毛永毅，無線通訊系統定位技術的研究，博士論文，2008。
- 張文娟、孟青、呂偉濤、姚雯與張義軍，時間差閃電監測網的誤差分析和佈局優化，应用气象学报，Vol. 20，NO. 4 August，2009
- 梁華、張濤、姚延鋒、徐子龍、龐文程與張宇飛，闪电定位误差评估与实例分析，干旱气象，Vol. 25，No. 4，Dec，2007
- 廖建興、曾孝忠，無線電測向及交叉定位技術研析(上下)，中華民國電子零件認證委員會，IECQ報導第五十三期，2009年9月。
- 楊波、邱實、寧軍、高太長，”閃電定位誤差及探測效率評估”，解放軍理工大學學報Vol.7,No.5,Oct,2006.

