



提升國軍電子戰偵蒐測向精確度之研究

作者/左伊心

提要

- 一、無線電測向技術已廣泛運用於工、商、農、漁、牧業中，與國防科技的連結更是密不可分。本文聚焦在無線電探測應用，探究不同階段電磁波的截獲目的與用途，尋找最有利的天線運用方式。
- 二、任何電子戰系統或裝備絕無百分之百有效功能，在物理特性的限制下，結合戰術及技術之配合，將無線電探測區分三大階段。針對天線設計差異進行分析，以找出最佳使用時機，降低電子戰部隊於執行無線電探測時因運用錯誤而徒勞無功。
- 三、面對中共在我領疆內頻繁執行海上巡邏、反偵察和電子戰偵蒐，我國電子戰部隊該如何提升偵蒐測向能力，發揮無線電探測的極致效能，進而有效協助陸、海、空軍作戰單位遂行電子戰戰術。

關鍵詞：電子作戰、電磁波運用、測向精確度、無線電探測

前言

無線電測向技術繁多，在不同的時空背景與科技運用中，運用電磁波實施輻射源量測之方法與原因更是包羅萬象不可勝數，如現今常用的全球定位系統(Global Positioning System, GPS)要完成目標定位，第一步便要運用「都普勒測向技術」實施方位測量才可接續執行定位作業；於國防科技運用中，飛行戰具方向識別、發現未知目標、避免空中戰具遭受誤擊……等作戰運用，更是與無線電測向技術有著密切的關聯。

我國電子戰運用目的在於使作戰指揮官掌握運用電磁頻譜之完整能力，用以察覺敵意圖與反制敵行動，進而癱瘓或破壞敵指、管、通、情系統，並確保我指、管、通、情系統之安全與有效運作，俾達支援作戰。¹電子戰部隊實施無線電測向可透過電磁波輻射的來波方向，尋發射源載臺位置，並於尋獲載臺同時，進階實施電磁波訊號量測，獲取詳細參數資料，進而達成電子戰運用。為了提升電戰部隊識別電磁波訊號種類的正確性，本文將從天線設計與電磁波方向量測方法與差異著手，探討各式測向技術的性能差異，針對國軍電子戰部隊

1 資通電軍，《資通電軍電子戰運用教範》(臺北市，資通電軍指揮部，2019年)，頁1-1。



與陸海空軍部隊常運用之電磁波截收裝備的天線設計方式，選定「振幅測向技術」等4類技術實施分析比較，以協助國軍瞭解不同形式天線主要特性與特長。

110年《四年期國防總檢討》提及，中共運用認知戰的手段，不僅在軍事演習中以大規模襲擾形式實施，同時透過派遣無人載具、電偵船艦、飛機等工具，進行無預警操作。²在民生領域中，中共善用北斗衛星掌握電磁頻譜環境，影響了通信、資訊科技和生活。電磁波的影響不僅體現在軍事層面，更直接影響到人們的日常生活。面對中共電磁頻譜之運用，掌握電磁頻譜環境與獲取戰場制電磁權，已成為國軍當前刻不容緩的議題。³

本研究探討無線電測向技術在無線電探測中之應用，以提升正確判別信號的角度作為研究目標，區分無線電探測「偵蒐」、「識別」和「追蹤」三大階段，藉由各階段電磁波截獲目的與用途，分析不同狀態下可運用之測向體制特點及技術指標，以尋找最有利的天線應用方式，提升國軍電子戰部隊偵蒐測向能力。

國軍電子戰部隊偵蒐測向能力不僅可以提升五維戰場作戰優勢，⁴亦能協助友軍執行精確目標判別，減少迷茫或混亂，提升工作效率。於部隊電子戰應用中，以協同陸軍實施電子戰支援為例，於國土防衛階段善用電磁波截收裝備，截獲敵通訊頻率，有效掌握敵軍動態，便能協同友軍執行反登陸作戰，運用電磁波遲滯敵人行動，達成部隊電子戰作為。

測向天線設計技術概述

無線電測向(Radio Direction Finding)是一種運用無線電波執行發射源目標方向量測的技術，於軍事科技運用中，通過電磁波物理特性中所具備之各項參數，如頻率(Frequency)、振幅(Amplitude)、相位(Phase)，⁵結合各類情報資源，經研析、比對、判別可達到目標識別的效果。

在電磁波運用中無線電測向屬於輔助角色，結合情報支援運用可協助指揮者作出最佳戰術作為。在實際狀態下各陣列天線的天線單元間距不可能很大，所以各天線單元可以將他們接收之電場強度認為是相同的，僅相位不同而已，因此，無線電波方位訊息就存在電場強度相位中，當利用一定架構的天線陣列

2 解放軍報：新軍崛起-第五為戰場，<http://mil.news.sina.com.cn/2013-12-12/0540754483.html?from=wap>（檢索日期：2023年5月18日）。

3 《110年四年期國防總檢討》（臺北市，國防部，民國110年3月），頁5-22。

4 五維戰場：中共提出四維戰場包含陸、海、空、天四區域，隨著科技演進「網路」即為第五維空間。

5 EEWORLD電子工程世界：什麼是無線電測向，http://m.eeworld.com.cn/bbs_thread-1238578-1-1.html，（檢索日期：2023年5月22日）。



執行量測時，所產生的感應電動勢之相位就與輻射來波方向會有關。⁶

一、技術原理說明

針對國軍電子戰部隊與陸海空軍部隊常運用之電磁波截收裝備的天線設計方式，選定「振幅測向技術」、「相位測向技術」、「時差測向技術」及「都普勒測向技術」等4類實施探討。

(一)振幅測向技術

主要運用天線感應訊號電壓，推演電磁訊號來波方向(如圖1)。透過分析電磁訊號與接收天線之間具備相對方位變化量，當量測天線原地轉動後，結合極座標方向圖，面對不同方位所獲訊號能量，能夠記錄出相對應能量來向。再搭配能量大小，依訊號強弱軌跡紀錄執行訊號分析，完成無線電波輻射方向的量測作業，⁷因此「振幅測向」又被稱為「極座標方向圖測向」(如圖2)。

結合電子元件設計特性，電磁訊號振幅實施方向量測可區分「最大振幅測向」、「最小振幅測向」及「比較振幅測向」三種方式。其中，比較振幅測向技術可運用完全相同的兩個天線接收輻射訊號，根據接收機輸出電壓值大小經由相互比對的方式獲得最後無線電波輻射來向角，是現行國軍服役裝備於執行電子戰任務時常見的測向技術運用。

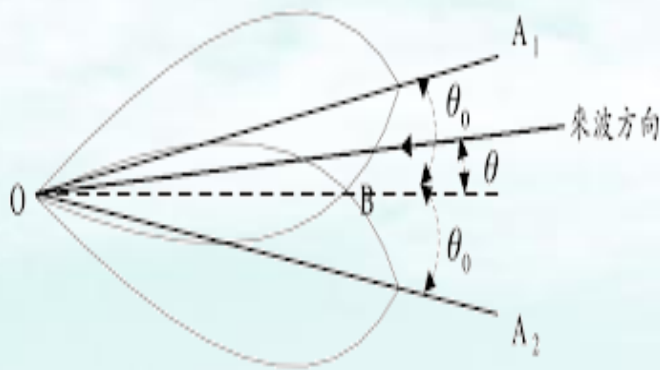


圖1 振幅測向訊號來向示意圖

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>(檢索日期：2023年5月25日)

⁶ 廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，《中華民國電子零件認證委員會》，頁39，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>，（檢索日期：2023年5月25日）。

⁷ 古晏承，〈應用單脈衝振幅比較技術於定位系統之開發〉，頁3-5，<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/49373/1/359601.pdf>（檢索日期：2023年5月18日）。

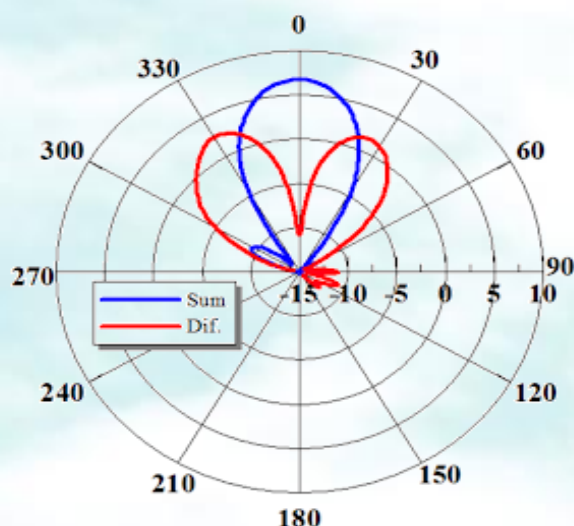


圖2 振幅測向極座標圖向表示法

資料來源：古晏承，〈應用單脈衝振幅比較技術於定位系統之開發〉，<https://ir.nctu.edu.tw/bitstream/11536/49373/1/359601.pdf>(檢索日期：2023年5月18日)

(二)相位測向技術

相位測向技術是運用兩個(含)以上相同種類的天線模組，透過調整天線模組結構和排列方式，以接收訊號相位改變所形成的數值差異進行無線電波輻射方向量測作業。這項技術可進一步區分為兩種主要類型，即「干涉儀測向」與「華生瓦特雷達(Watson-Watt)」。⁸目前干涉儀測向技術發展較為成熟，「Watson-Watt」並非主流型式的測向技術，且國軍現行服役裝備中，電子戰部隊也以干涉儀測向技術為常見電磁頻譜量測運用方式，因此，本文僅限於干涉儀測向技術說明與運用。

干涉儀測向技術中，同時測量測向陣列天線上各天線單元的感應電壓，利用各感應電壓間之相位差和相關係數來計算訊號入射測向天線的相對方向。在訊號處理過程中，各天線單位間感應電壓之相位差必須保持不變，並在必要時進行補償，以降低測量誤差。⁹干涉儀測向技術可以進一步分為「一維相位干涉儀」(如圖3)與「二維相位干涉儀」(如圖4、5)兩種類，其中「一維」表示測向天線為線型陣列，即所有測向天線單元都位於同一直線上，而「二維」是指測向天線為面型陣列，即所有測向天線單元都位於同一個平面上。¹⁰

⁸ 同註6，頁40-43。

⁹ 曾漢偉，〈基於RMSE最小化的一維相位干涉儀的最佳間距比與演算法比較之研究〉，2018年（檢索日期：2023年5月22日）。

¹⁰ 成都大公博創信息技術有線公司，〈無線電監測測向技術〉，<https://www.kpdit.com/UploadFile/file/202002/20200213144955455545.pdf>（檢索日期：2023年5月25日）。

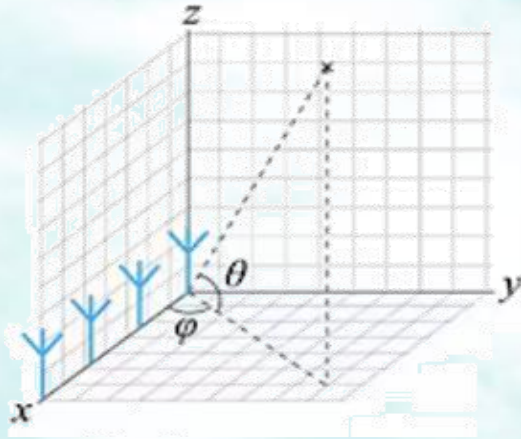


圖3 一維相位干涉儀

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>(檢索日期：2023年5月25日)

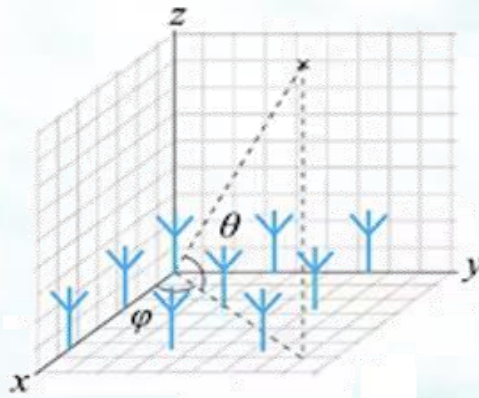


圖4 二維相位干涉儀平面排列

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>(檢索日期：2023年5月25日)

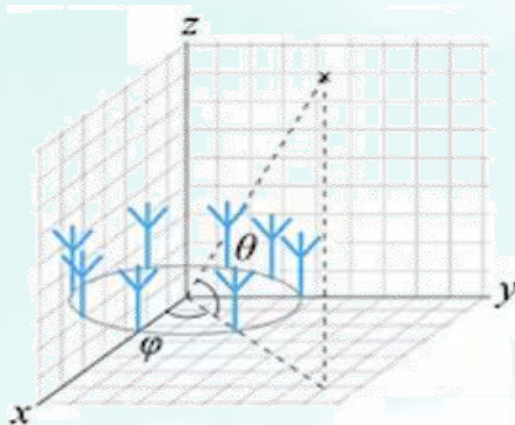


圖5 二維相位干涉儀圓形排列

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>



ECQ-52-6.pdf(檢索日期：2023年5月25日)

(三)時差測向技術

此技術與相位測向技術有著異曲同工之妙，都是利用兩個(含)以上天線模組實施量測。在時差測向技術運用中，分離的天線會測量發射源之輻射訊號(如圖6、7)，由於輻射訊號在傳播路徑會產生天線接收信號時間的差別，而到達時間差值與訊號方向角具有函數關係，因此運用函數計算方可在適值中求得電磁波行徑方向。¹¹

在此種類測向技術中，由於我們無法得知電磁波發射源一開始之仰角度數，因此我們會運用一個平均值來做假設代入發射源輻射訊號角度計算，通常這一個平均值是在實驗室量測後獲得的一個大數據。因此，當我們一開始於實驗室測量樣本數越少時，獲得平均值便會與實際有比較大的落差，而造成獲得之發射源輻射訊號角度值有所誤差。

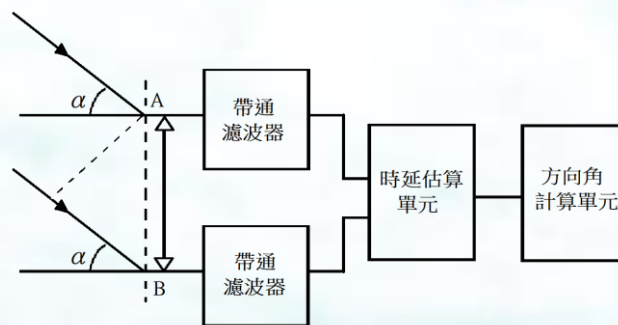


圖6 時差測向技術信號流程圖

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/I>

ECQ-52-6.pdf(檢索日期：2023年5月25日)

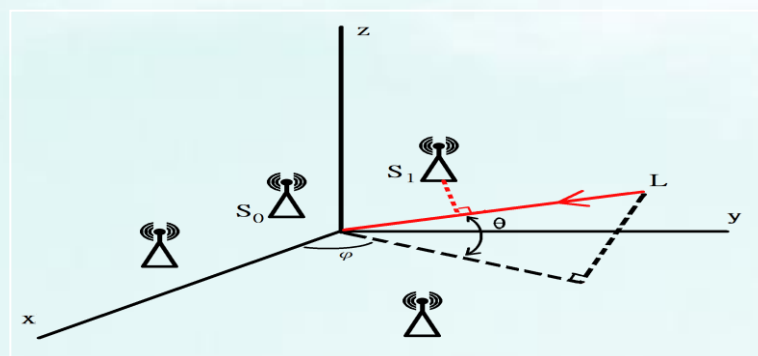


圖7 天線擺設示意圖

資料來源：重慶工商大學學報自然科學版，〈基於到達時間的曲線交叉點測向算法研究〉

¹¹同註6，頁43-45。



(四)都普勒測向技術

都普勒效應(Doppler effect)是發射源和觀察者之間有相對運動時出現的頻率變化，此現象最初由澳大利亞數學家 and 物理學家克里斯汀·都普勒(Christian Doppler)於1842年發現。¹²於都普勒測向系統中，都普勒效應的產生存在於陣列天線與輻射源間之相對運動(如圖8)，當測向天線向發射源天線移動時，接收訊號頻率值會有遞增現象，反之則使頻率數值遞減，運用數值差導入數學公式計算，可從頻率變化中獲得測向天線與發射天線相對應相位關係。¹³

現今電磁波裝備運用中，都普勒效應被改良成運用旋轉測向陣列天線來仿效發射源和觀察者之間的相對運動，在天線旋轉過程中，頻率之變化可以計算出發射源方位，並同步對目標實施信號量測、分析等作業。這類型測向技術須具備高速天線旋轉與旋轉圓周直徑距離大的特色，此特色讓天線於量測發射源之輻射訊號角度時獲得高靈敏度、高準確度的優勢。

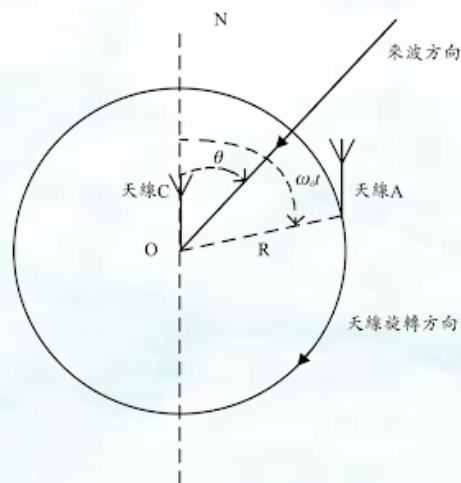


圖8 都普勒測向技術示意圖

資料來源：廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>(檢索日期：2023年5月25日)

二、測向技術特點分析

我國電子戰運用的主要目的在於：使作戰指揮官掌握運用電磁頻譜之完整能力。由於電子戰是實施「軟殺」的重要手段，這種作戰方式可以貫穿作戰全程。為確保我軍能夠有效掌握制電磁權，同時察覺敵意圖，並反制其行動，以癱瘓或破壞敵指、管、通、情系統。同時，巧妙運用電磁波頻率等特性，實施戰場管制。這些戰術與部署已成為現代化戰爭中決定成敗的關鍵性要素。

¹²陳永忠，〈都普勒效應〉，<http://physexp.thu.edu.tw/~AP/YC/GPN1/HTML/Doppler-effect.html> (檢索日期：2023年6月9日)。

¹³(美)陳，《雷達中的微多普勒效應》(電子工業出版社，西元2013年3月)，頁15~23。



在「振幅測向技術」、「相位測向技術」、「時差測向技術」及「都普勒測向技術」4種天線設計差異中，由於電磁波收發在物理特性中有著頻率高低與天線長度反比的特性，因此本研究不涉及頻率高低特性討論。僅針對上述4種天線，在天線設計中探討「量測目標方位角度技術」的差異，從天線特性、主要分析參數與平均值誤差、訊號接收量、信號研析所需時間與測向精確度等6項性能進行統整(如表1)，並針對各技術進行分析。

表1 各類型測向技術性能一覽表

技術 \ 區分	天線特性	主要分析參數	訊號接收量	信號研析所需時間	主要分析參數平均值誤差	測向精確度優劣順序(單一目標)
振幅測向技術	單個天線模組	振幅	每秒數個(圖 9)	短	最高	4
相位測向技術	數個天線模組	相位差	每秒數個(圖 9)	短	高	3
時差測向技術	數個天線模組	振幅	每秒一個(圖 10)	較長	低	2
都普勒測向技術	單個天線模組	頻率	每秒一個(圖 10)	長	最低	1

資料來源：作者整理

(一)天線特性

各類型天線內使用的天線單元數量在設計時會因奇、偶極天線之差異而有所不同，在考量天線使用目的時，置重點於精準度、即時性或最大截獲數量等實用效益上，且天線設計時有模組數量多寡的差異。本項於研究中主要用於紀錄不同技術之天線單元設計差異，在探討測向技術分析優劣性能上無實質的影響。

(二)主要分析參數

電磁波的生成須具備頻率、振幅、波形與相位這些物理特性，在實施電磁波量測時，因電路設計差異，實施角度量測時，主要分析參數皆有所不同；¹⁴再加上天線使用目的是用於導航、射控、截收、監控、傳輸……等，在選擇運用電磁波物理特性上也會有所優劣等級區別。本項主要用於區別該測向技術是

¹⁴同註6，頁46-48。



利用何種電磁波的物理特性作為參數分析，作為後續參數研析時之分析樣本。

(三)訊號接收量

在不同型式天線中，於一個時間節點上，天線可同時判別目標數量的個數(橫軸單位為「時間」，縱軸單位為「頻率」)。圖9為一個時間節點上可同時判別多個頻率，此種形式之資料處理機制，便是「振幅測向技術」與「相位測向技術」的信號處理方式。此兩類測向技術在同一個時間節點會有多個(大於或等於1個)信號被同時送入，因此接收訊號量為每秒無數個信號接收。而圖10為一個時間節點上僅判別單個頻率，「時差測向技術」及「都普勒測向技術」皆以此種方式實施信號處理，因此，在同一個時間點上，僅會針對選定後的單一頻率實施收入，接收訊號量為每秒1個信號接收。

本項可清楚研析不同測向技術在同一個時間收入頻率量的多寡差異。面對不同任務，接收裝備瞬間截收訊號量之大小會影響參數分析時樣本取得數量，樣本數量會影響標準差¹⁵與離散程度¹⁶的計算，間接影響天線精確度取得。¹⁷

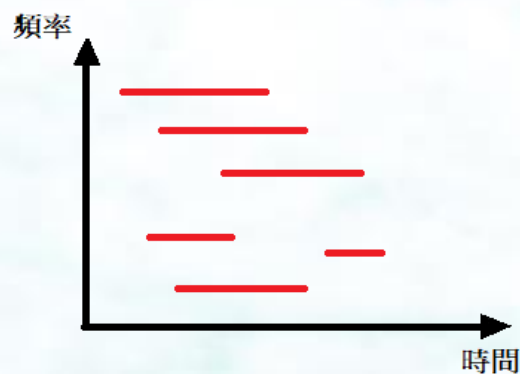


圖9 一個時間節點上可同時判別多個頻率

資料來源：作者整理



圖10 一個時間節點上僅判別單個頻率

資料來源：作者整理

¹⁵標準差 (Standard deviation, SD)，在機率統計中最常使用作為量測一組數值的離散程度之用。

¹⁶離散程度 (Statistical dispersion)，簡稱變異、變差 (variation) 是指一個分布或隨機變數的拉伸或壓縮程度。

¹⁷科學Online，〈母體變異數v.s.樣本變異數〉，<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=69367> (檢索日期：2024年2月20日)。



(四)信號研析所需時間

運用電磁波振幅、相位或頻率作為天線主要分析參數，再加上天線內天線模組數量與排列方式之差異，會造成訊號分析時，電子元件獲得信號的時間有長、短差異，此時間差異在特殊任務執行時，會因耗時過長導致失去即時作戰效益，影響作戰成敗。

(五)主要分析參數平均值誤差

在天線設計上，電子元件因設計技術差異，形成裝備解析位元數不相同，本項分析各類型測向技術天線被製作完成時就具備一定規範，會隨著天線壽命增加誤差值緩慢遞增。

(六)測向精確度

實施目標判別時，結合情報資源運用電磁參數量測無線電波輻射的方向，可大幅提升目標識別速度與效益。測向精準度優劣會影響該天線使用時之目的與績效，同樣是 $\pm 3^\circ$ 角度落差，面對近距離與遠距離目標卻有著極大的位置差異。

無線電測向技術運用時機

無線電測向技術已被廣泛運用於軍事作戰、航空衛星、水陸交通、民生運用等項目，可區分「無線電導航」與「無線電探測」兩類運用。「無線電導航」泛指利用無線電引導飛行器沿規定航線、在規定時間到達目的地的航行技術；¹⁸「無線電探測」廣義指用間接手段來獲取目標狀態訊息的方法，被廣泛運用於資源調查、地表環境監測、人類活動監測，又可被稱為「遙測」¹⁹(中共及香港稱作「遙感」)。

美國防部2020年公布的《電磁頻譜優勢戰略》(Electromagnetic Spectrum Superiority Strategy)指出，美國及其軍武競爭國家都已認識到，電磁頻譜機動空間既複雜又迫切重要，不但影響國家經濟發展，也可掌控軍事優勢。在電子戰的世界中，「瞭解敵在何處？在做什麼？友軍在何處？攻擊武器效果為何？」才能做出正確電子戰攻擊(Electronic Attack, EA)、電子戰防護(Electronic Protection, EP)與電子戰支援(Electronic Warfare Support, ES)；長官下令實施精準武器射擊，從搜索、標定、識別、持續追蹤，到發射飛彈鎖定並擊中目標，²⁰亦是部隊電子戰運用；當中共持續於我國防空識別區派遣電戰機，企圖運

18中國民用航空局，〈無線電導航系統〉，https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/GYMH/MHBK/KZJT/201509/t20150923_1917.html（檢索日期：2023年6月20日）。

19臺灣大百科全書，〈遙感探測〉，<https://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=1101>，檢索日期：2023年6月20日。

20青年日報，〈【韜略談兵】加速電子戰發展 確保作戰優勢〉，<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?c>



用電磁訊號實施資訊破譯甚至於電磁壓制，更是網電作戰結合。²¹

從上述種種跡象可得以下結論，「無線電探測」技術已是作戰運用中，任務成敗不可缺少的重要環節，因此，從電子戰無線電探測運用階段實施研討：

一、運用階段

於電子戰領域中，靈活進行無線電探測運用是提升偵蒐測向精準度的重要戰略考量。探測運用區分「偵蒐」、「識別」、「追蹤」三大階段(如圖11)，結合電子戰部隊的任務特性、戰術和技術需求，明確劃分無線電探測階段後，電子戰偵蒐測向精準度不僅可提升平時頻譜管制的整體性，同時也有助於在聯合作戰中實現快速與靈活反應，以因應複雜多變的電磁環境。各階段任務特性差異說明：

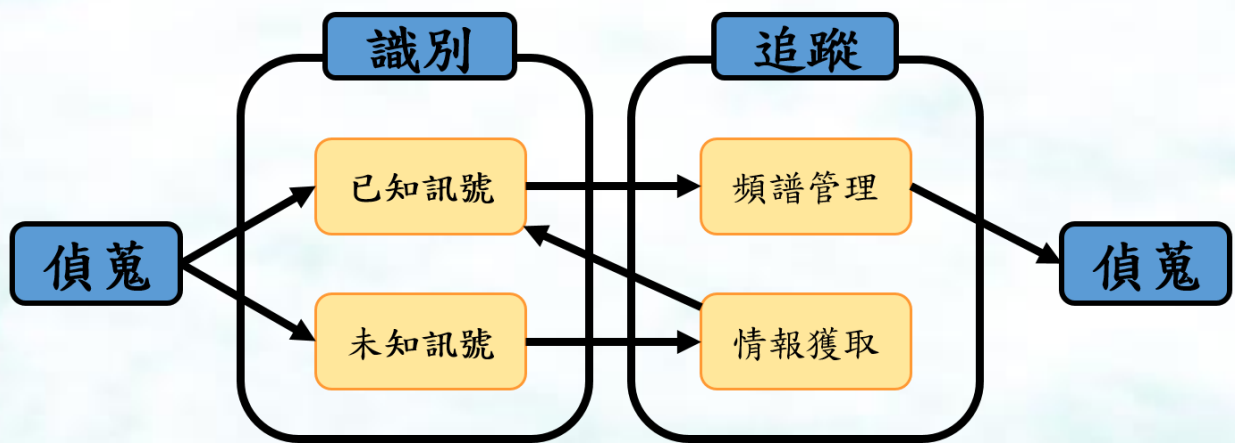


圖11 電子戰無線電探測運用各階段流程圖

資料來源：作者繪製

(一)偵蒐階段

此階段主要工作目標為「運用極少時間，於指定區域中獲取大量電磁訊號。透過豐富資訊，快速掌握所轄範圍內電磁訊號動態，並運用現有接收及分析設備在大數據分析整理後得出可運用之實際參數，使觀察者能在最短時間內完成無用途信號粗略的濾除作業，快速發現可疑訊號動向，執行更精確之目標選擇。」各國電戰部隊為獲取最新資訊，於各個不同的頻率範圍，皆有人員不分晝夜重複執行偵蒐作業，以掌握未知訊號來源，始可提前實施防範及識別等作為。於此階段，電磁波截獲的重點是快速截獲訊號初步資訊，進而將電磁波

hapterID=1504897（檢索日期：2023年6月20日）。

21蘇紫雲，〈中共空軍發展舒特作戰能力爭奪網電領空〉《國防安全研究院雙週報第40期》，民國110年10月29日。



輻射源方位、頻率等參數送至下一個階段執行後續處置。

(二)識別階段

此階段接續於偵蒐階段之後，「識別」意指在一群體中將一個特定或特殊目標區分出來的過程，此過程須經歷重複研判與確認。識別工作開始執行瞬間，直至成功確認前，此段時間內執行者可運用裝備完成越多次數的目標確認，信號識別精確度越高。明確目標在電子戰戰術與戰略運用中提供指揮者擬定決心，減少不必要的迷茫或混亂，為達此目的，高效度電磁波接收能力與極小的量測角度值誤差，扮演著重要角色。

面對目標實施分析，在情資掌握完整度上的差異，可將識別階段區分為已知訊號與未知訊號兩類。

1.已知訊號

當特定或特殊目標經區分後，可判定該目標種類、載臺並完成敵我識別，則該目標會列入已知訊號的管制清單內與現有資料完成匹配，後續該目標會被評斷其當前威脅等級，並進入無線電探測運用追蹤階段－頻譜管理。

2.未知訊號

當特定或特殊目標經區分後，無法判定該目標種類、載臺與完成敵我識別，則該目標將進入電子戰－參數蒐集研析階段。

(三)追蹤階段

在電子作戰中，追蹤要旨為偵察、識別和評估敵方電子系統的特徵與能力，進而使作戰指揮官善用自身特長對敵實施攻擊同時增強我方作戰效益，達到不對稱作戰優勢。此階段區分「頻譜管理」和「情報獲取」兩類，運用頻譜、結合情報，以時間換取大量優勢，提升部隊戰場意識，獲取制電磁權優勢。

1.頻譜管理

確認目標威脅等級完成敵我識別後，下令電戰部隊針對目標持續執行追蹤作業，通常是因為該目標具備一定的價值，決心運用高靈敏度接收裝備針對目標實施24小時監視，²²所獲情資可對後續制定干擾計畫、敵意圖識別和增強自我防護有高度參考價值。

2.情報獲取

當電磁波發射時，所使用的能量過低或電磁波發射位置距離過遠等狀況，皆有可能造成無線電探測效果不佳，導致無法對特定或特殊目標實施有效區分。²³在此狀態下，如經其他手段(如紙本情報、人員交換情報)發現該目標具

²²楊偉森，〈軍用頻譜管理之研究〉，2004年10月，頁12~35。

²³吳美枝，〈電磁波知多少〉，<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000008/detail?ID=91c5e839-921f-4808-931c->



備重要價值時，亦可要求電戰部隊針對特定目標持續執行24小時綿密監視，同時運用高靈敏度接收裝備設法實施情報資料分析，以獲取目標精準輻射源方位、頻率以完成目標種類、載臺及敵我識別。

二、各階段電磁波運用所需信號特質之分析

「國軍聯合作戰網電教則」中提及，戰場上五維環境受複雜電磁影響甚鉅，欲達相對戰場優勢，於平時軍、民用電磁輻射管理與管制是不可缺少的。採取有效防護作為避免我方通信電子系統遭受干擾，才可使我電子戰戰力發揮最大功效。²⁴

國軍電子作戰於無線電探測運用時，在「偵蒐」、「識別」、「追蹤」各階段有著顯著之目的差異，面對不同時期，國軍部隊選定適切裝備才可發揮最佳作戰效益。從「訊號接收量」、「接收訊號時間差」與「主要分析參數平均值誤差值」等3個方面，探究無線電探測於前述階段中，不同的階段性任務該如何挑選適切裝備，方能將戰技與戰術發揮最大效益，並研析無線電探測運用在各階段信號特質差異並加以分析(如表2)，以利後續研討方案提升電子戰部隊偵蒐測向能力。

表2 無線電探測運用各階段信號特質分析

區分 階段		主要目的	訊號 接收量	接收訊號時間差	主要分析參數平 均值誤差
偵蒐階段		快速發現、快速處置	多	有一定影響力	接受度大
識別 階段	已知訊號	高準確度目標區分	單一	影響小	接受度小
	未知訊號	大量分析比較建立 完整情資	單一	無影響	接受度大
追蹤 階段	頻譜管理	實施頻譜戰場控制 取得制電磁權	多	有一定影響力	接受度小
	情報獲取	時間換取空間，建立 完整情資	單一	無影響	接受度大

資料來源：作者整理

(一)訊號接收量

有些時候實施無線電探測會希望僅關注同一目標，有些時候則希望可以

23a0d25febcbf (檢索日期：2023年6月28日)。

24資通電軍，《國軍聯合作戰網電教則》(臺北市，資通電軍，民國111年12月)，頁1~3。



關注多目標，兩者運用的選擇會因為使用目的而有所差異。當無線電探測運用於偵蒐階段與追蹤階段之頻譜管理時，在技術選擇上會以同一時間點可獲得多個訊號的測向技術為主要達成目的。

當無線電探測運用於識別階段與追蹤階段的情報獲取時，會針對單一目標實施高精準度偵蒐作業，以取得單一目標訊號完整資訊，因此會採用單一型的天線技術性能(即時差測向技術及都普勒測向技術)。

(二)接收訊號時間差

在人類的感官中，無法明確感受極短時間變化(如1毫秒)，而對於電子元件來說，訊號傳輸速度是取決於電流速度，即光的速度。當無線電探測運用於偵蒐階段與識別階段之已知訊號與追蹤階段的頻譜管理時，此三個階段主要目的係為快速取得各類型訊號來源，故在技術選擇上需優先選擇振幅測向及相位測向技術。

當無線電探測運用於識別階段的未知訊號與追蹤階段的情報獲取時，大量蒐集訊號並建立完整情資為主要目的，無急迫性需求，故可優先選擇都普勒測向技術或時差測向技術。

(三)主要分析參數平均值誤差

面對決策執行或戰術命令下達，明確的行動方向與支撐根源是指揮者堅強後盾和依循方向。識別階段－已知訊號與追蹤階段－頻譜管理等兩階段於電子戰領域無線電探測運用中，是訊號情報大量獲得的階段，在這時期不希望出現任何情資誤差，因此，於選擇使用天線時，會考慮使用低誤差率的測向技術，以降低情報錯誤率。而其他三階段在情資誤差的容許度上，偵蒐階段可接受範圍遠大於其餘階段，接續為識別階段，然後是追蹤階段。

技術與運用時機結合

電子戰裝備無百分之百有效功能，系統設計及物理特性的限制，使裝備有優勢與劣勢存在，「選擇」僅是優劣程度比較後之最佳手段匡列。首先要知道，各類型電磁波運用裝備，其功效發揮程度與戰術及技術配合有密不可分的關係；通常於各項裝(設)備運用時，係以技術支援戰術需求，若戰術運用得當，亦可彌補技術限制，兩者可說是相輔相成。小者單機作業，大者整體作戰，成敗關鍵視使用人員對武器裝備瞭解程度、技術知識、戰術運用等情形而定。²⁵

面對各類型電子裝(設)備多元使用與快速發展，電子戰部隊如何執行電子戰

25萬濟人，〈聯合作戰資電優勢－電子戰運用與未來發展趨勢〉《國防雜誌》（桃園市），第20卷8期，國防大學，民國100年5月。



作為、遂行部隊電子戰任務，面對國家不同的政策推展與作戰型態，在電子戰使用裝備的選擇方式與使用時機上眾說紛紜。宏觀我國電子戰部隊任務性質與現行服役裝備(包含資通電軍電子作戰中心專案裝備與海空軍電戰裝備)，在針對國軍部隊常見之電磁波截收裝備的天線設計方式實施資料蒐整與研析後，發現各階段都和現行裝備天線測向技術有著一定的關聯性，經彙整發現面對電子戰各階段任務差異，搭配最佳測向技術可快速掌握目標完成階段性任務，進而取得戰場優勢。

一、偵蒐階段

此階段主要目的是快速發現並立即處置，為發揮最高工作效能，在天線選擇上，優先考量性能為高訊號接收量類型天線設計技術，運用在一個時間點上可判別多個目標的特色，已達成快速發現階段性目標。接續考量獲得訊號是否具備時效性與獲得訊號參數精確度的優劣等級，這方面之確認可維持接收品質穩定度，避免接獲資訊誤差值過高。針對本研究探討的4項技術，在選擇使用天線時，使用相位測向技術及振幅測向技術，可達成快速發現目標的效果，其中「相位測向技術」具備較低的分析參數平均誤差值，故第一優先順序，其次為「振幅測向技術」。「時差測向技術」與「都普勒測向技術」在天線類型性能比較中皆屬於一次一個的信號接收方式，無法達到「快速」的指標(如表3)。

表3 無線電探測偵蒐階段最佳測向技術與特性

優先順序	測向技術	特性
1	相位測向技術	具備同一時間點上可接獲多個目標特性，且較低的分析參數平均誤差值，故納為優先考量項目。
2	振幅測向技術	具備同一時間點上可接獲多個目標的特性，此技術可支援任務執行。

資料來源：作者整理

二、識別階段－已知訊號

執行目標種類識別的過程中，為達到有效區分，天線設計技術具備專一性(意指於同一時間點上僅針對少數甚至一個頻率實施訊號分析作業)，可提升識別階段的實際效益，在天線選擇上，此階段首先重視訊號即時性，以避免偵獲參



數於時間上失去獲得價值，接續是訊號精確度，以避免偵獲參數於資料比對上失去實用價值。「振幅測向技術」與「相位測向技術」在信號研析花費時間雖然最少，可是此階段需要有一定得分析參數精準度，因此權衡利益後，在使用天線時選擇中「都普勒測向技術」或「時差測向技術」，皆可高準確的掌握指定目標狀態；其中，「時差測向技術」在訊號獲得上，因天線設計原理的方式造成其分析參數平均誤差值略高於「都普勒測向技術」，因此，此階段第一優先順序為「都普勒測向技術」，其次為「時差測向技術」適合於此階段使用(如表4)。

由此階段所需分析目標皆屬「被掌控」的目標種類，其意思表示：「目標已結合其他情報手段，獲得初步目標判別。」在這樣的狀態下，電子戰作為置重點於運用訊號情報再次實施目標確認，使一般情報與訊號情報實施結合，做到雙向驗證的效果。綜合上述，「振幅測向技術」或「相位測向技術」可做到運用訊號情報再次實施目標確認的作為，惟正確率較低；而「振幅測向技術」在訊號精確度條件上低於「相位測向技術」，故將「相位測向技術」納入第3個選擇對象。

表4 無線電探測識別階段－已知訊號最佳測向技術與特性

優先順序	測向技術	特性
1	都普勒測向技術	「單一性目標」搜索特性，在累積資料量上有著絕對優勢，再加上高精確度的量測技術，可簡便快速掌握指定目標狀態。
2	時差測向技術	在訊號獲得上會受到天線設計而造成較多時間差，但「單一性目標」搜索特性，在累積資料量上依舊具備部分優勢，高精確度的量測技術，使此技術可支援此階段任務執行。
3	相位測向技術	可做到運用訊號情報再次實施目標確認，考量需於同一時間點上處理多目標時，可將此技術納入運用。

資料來源：作者整理

三、識別階段－未知訊號

在執行目標種類識別過程中，對於屬於「無法掌控」類型的目標，表示仍需要各樣式情報進行分析。在此狀態下不論是一般情報或訊號情報皆須納入考量。經分析比較，針對本研究探討的4項技術，在選擇使用天線時，使用都普勒



測向技術或時差測向技術，皆可快速掌握指定目標狀態，進行大量分析，比較各個管道獲得的情報，然後去判斷目標種類。因此此階段，參數分析誤差值大小不是首要考量，目標選擇的單一性才是重點，其次是時效性問題。「都普勒測向技術」與「時差測向技術」於天線設計上皆具備單一性，可避免過多的目標選擇，造成使用者於分析情報時無法聚焦。在時效性考量上，「時差測向技術」在訊號獲得上，鑑於天線設計原理是利用兩個以上分離的天線實施訊號量測，再將訊號實施結合，因此，此階段天線測向技術選擇上，第一優先順序為「都普勒測向技術」，其次為「時差測向技術」較為合適(如表5)。

表5 無線電探測識別階段－未知訊號最佳測向技術與特性

優先順序	測向技術	特性
1	都普勒測向技術	「單一性目標」的搜索特性，在累積資料量上有著絕對優勢，再加上高精確度的量測技術，可簡便快速掌握指定目標狀態。
2	時差測向技術	在訊號獲得上會受到天線設計而造成較多時間差，但「單一性目標」搜索特性，在累積資料量上依舊具備部分優勢，高精確度的量測技術，使此技術可支援此階段任務執行。

資料來源：作者整理

四、追蹤階段－頻譜管理

追蹤要旨為，在偵察、識別後，嚴謹運用裝備評估敵方電子系統的特徵與能力，並針對特殊目標實施目標監控。當該目標屬「被掌控」目標類型，在電子戰運用中，會給予一專用代碼，使追蹤者在執行任務時方便識別及管理這些已經被掌控的目標。因此，在頻譜管理時，需要的工作狀態與偵蒐階段大致相同，惟獲得訊號的精確度要比偵蒐階段更高，才可以避免目標掌控之疏失。

此階段接續於識別階段－已知訊號之後，所需信號特質優先考量同一時間上可分析多個目標的高訊號接收量類型天線設計技術，其次為獲得訊號之精確度與獲得訊號之時效性。經分析比較，針對本研究探討的4項技術，在選擇使用天線時，「相位測向技術」具備高訊號接收量且信號精確度與目標截獲時效性較佳，故為第一優先順序(如表6)，其次為「振幅測向技術」。

表6 無線電探測追蹤階段－頻譜管理最佳測向技術與特性



優先順序	測向技術	特性
1	相位測向技術	同一時間點上可接獲多個目標的特性，且具備截收精確度與獲得訊號時效性，以利頻率管控。
2	振幅測向技術	具備同一時間點上可接獲多個目標的特性，惟測向精確度不如相位測向技術。

資料來源：作者整理

五、追蹤階段－情報獲取

進入追蹤階段，當目標屬「無法掌控」的類型，在電子作戰中，這種狀況在執行參數研析時所需步驟最為繁瑣，需不斷重複執行情資蒐整、分類、研析、確認作業，以利完成最終目標判定，使訊號經由資訊累積，變成可掌握的訊號。通常會被選擇執行追蹤的未知訊號都具有一定之情報價值(經其他手段獲得，如紙本情報、人員交換情報，獲得特定目標)。此階段會針對選定目標長時間以一對一的方式實施大量資訊蒐集，考量這項需求，針對本研究探討的4項技術，在選擇使用天線時，首要條件為可專一執行單一頻率偵蒐的天線設計方式，其次條件為精確度高之天線設計型式。「都普勒測向技術」或「時差測向技術」在性能比較上，最大的差異於收獲目標信號即時性不同，由於追蹤階段－情報獲取並無情資即時性的需求，主要重點於「運用時間換取空間，建立完整情資」，故「都普勒測向技術」或「時差測向技術」優序概等(如表7)。

表7 無線電探測追蹤階段－情報獲取最佳測向技術與特性

優先順序	測向技術	特性
概等	都普勒測向技術	「單一性目標」搜索特性，在累積資料量上有著絕對優勢，截獲完整訊號情報，以時間換取作戰空間，供指揮者決心下達。
	時差測向技術	

資料來源：作者整理

結論與建議

武裝衝突的型態中，爭鬥手段已非現代戰爭的主流趨勢，「禁止使用武力與威脅原則」已受到各種國際法律約束。全球議題日趨複雜且多元，傳統與非傳統安全議題交互影響整體局勢發展。自1990年代末期以來，中共啟動了「高新



工程」研發計畫，其中的「運八」與「運九」特殊類型電戰機於2013年起，於我領疆(空)頻繁執行海上巡邏、反偵察與電子戰偵蒐。近期更增派無人飛行器於我國防空識別區遂行網電作戰。任何裝備武器皆無法提供百分之百的保障功能，在作戰運用中亦不能有以一敵十的念頭。電子戰部隊於運用裝備時，藉電偵系統偵獲敵方艦船，結合電偵臺或友軍(如海上艦艇或偵巡型空中戰具)對敵實施目標比對，以掌握敵匿蹤位置、部署內容及可能威脅；非電子戰部隊具備電子作戰概念，當所運用電磁波設備疑似遭敵實施電子干擾時，依程序執行干擾處置，並協同電子戰部隊，採取適當電子戰作戰、戰術行動與決心下達，實施部隊電子戰作為。

面對當前多變的作戰型態，有效提升國軍電子作戰偵蒐測向精準度變得至關重要，這對我國陸、海、空軍在面對五維戰場威脅時，可藉由善用裝備增強電子戰部隊能力。既然「無線電探測」科學技術已是作戰運用中任務成敗不可缺少的重要環節，在探究天線特性與各階段運用區分後，結合本論述脈絡，研提3項建議，期提供相關單位參用。

一、因應戰場環境，選擇適切裝備

現代化多元戰場需同時面對來自陸、海、空各類型電磁頻譜作戰威脅，因此，指揮官在下達決心，擬定行動方案前，已無法憑藉單一種類裝備，達成多元而有效的作戰行動。舉例說明：敵方執行航渡階段，屬於識別階段，在天線選擇上就不可使用與時差測向技術相似的天線型態；但任務轉變為發現敵使用頻率，此時便進入追蹤階段，使用時差測向技術相似的天線型態又將成為必勝的利器。

因此，要有效提升偵蒐測向精確度，應制訂國軍現行裝備各類型天線型式種類區分，並區分偵蒐、識別與追蹤階段可運用裝備型式，以瞭解現有裝備在實施無線電探測優劣之處，才能於各種戰場環境擇取適切裝備。

二、明確使用時機，提升成功公算

陸、海、空軍部隊型態差異甚大，面對各軍種任務特色，執行無線電探測時重視的效益有著天壤之別。如陸軍戰時主責國土防衛階段相關任務，要有效提升電子作戰對該軍種實際效益，在追蹤階段之頻譜管理與情報獲取便是該部隊重視的無線電探測運用方式；海軍於平時偵巡任務時，在無線電探測運用中，偵蒐階段的天線使用若能更準確選擇，搭配電子戰部隊於陸地實施交測定位，在執行海疆巡邏時便可有更好之預警效果；於部隊電子戰運用中，協同空軍實施電子戰支援，當戰機返航時，運用無線電探測追蹤階段的特性，識別敵我戰具位置，保護我軍飛行員可安心返回基地，降低戰機誤擊機率，在各個時期



使用正確方法才能獲得事半功倍效果。

三、檢視教育訓練，提升戰場適應性

要提升國軍電子作戰偵蒐測向精準度，技術人員的教育訓練應包含技術能量精進與戰術靈活運用等兩個部分。在技術能量方面，單位可透過軍士官團交流瞭解各軍種作戰特色，或辦理講習邀請專家、學者及各類型雷達裝備資深操作人員，透過授課的方式，在理論與實務面相互切磋研討。在戰術精進方面，現行電戰部隊隸屬第四軍種，陸、海、空軍電子戰戰術運用方式又不盡相同，各軍種訓練指揮部(中心)、技術學院及學校針對軍種特色開設電戰相關班隊，從軍種特色詮釋電子戰作為，提升全軍電子戰的知識同時，協助資通電軍電戰部隊瞭解友軍作戰方案與戰術運用，進而提升電子戰部隊戰場適應性，並可針對陸、海、空軍戰術運用特色，協同友軍實施部隊電子戰任務，全面提升國軍電子戰作戰能力。

參考文獻

一、書籍、期刊

- (一)《110年四年期國防總檢討》(臺北市，國防部，民國110年3月)，頁5~22
- (二)《資通電軍電子戰運用教範》(臺北市，資通電軍，民國108年12月)，頁1-1。
- (三)《國軍聯合作戰網電教則》(臺北市，資通電軍，民國111年12月)，頁1~3。
- (四)《雷達中的微多普勒效應》(電子工業出版社，西元2013年3月)，頁15~23。
- (五)萬濟人，〈聯合作戰資電優勢－電子戰運用與未來發展趨勢〉《國防雜誌》(桃園市)，第20卷8期，國防大學，民國100年5月。
- (六)蘇紫雲，〈中共空軍發展舒特作戰能力爭奪網電領空〉《國防安全研究院雙週報第40期》，民國110年10月29日。
- (七)楊偉森，〈軍用頻譜管理之研究〉，2004年10月，頁12~35。

二、網路

- (一)曾漢偉，〈基於RMSE最小化的一維相位干涉儀的最佳間距比與演算法比較之研究〉，2018年(檢索日期：2024年10月29日)。
- (二)廖建興，〈無線電測向及交叉定位技術研析上〉，《中華民國電子零件認證委員會》，頁39，<https://www.cteccb.org.tw/pdf/IECQ-52-6.pdf>(檢索日期：2024年10月25日)。
- (三)陳永忠，〈都普勒效應〉，<http://physexp.thu.edu.tw/~AP/YC/GPN1/HTML/Doppler-effect.html>(檢索日期：2024年10月9日)。
- (四)古晏承，〈應用單脈衝振幅比較技術於定位系統之開發〉，<https://ir.nct>



u.edu.tw/bitstream/11536/49373/1/359601.pdf(檢索日期：2024年10月18日)。

(五)解放軍報，〈新軍崛起-第五為戰場〉，<http://mil.news.sina.com.cn/2013-12-12/0540754483.html?from=wap>(檢索日期：2024年10月18日)。

(六)青年日報，〈【韜略談兵】加速電子戰發展 確保作戰優勢〉，<https://www.ydn.com.tw/news/newsInsidePage?chapterID=1504897>(檢索日期：2024年10月20日)。

(七)EEWORLD電子工程世界，〈什麼是無線電測向〉，http://m.eeworld.com.cn/bbs_thread-1238578-1-1.html(檢索日期：2024年10月22日)。

(八)成都大公博創信息技術有線公司，〈無線電監測測向技術〉，<https://www.kpdit.com/UploadFile/file/202002/20200213144955455545.pdf>(檢索日期：2024年10月25日)。

(九)吳美枝，〈電磁波知多少〉，<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000008/detail?ID=91c5e839-921f-4808-931c-23a0d25febcbf>(檢索日期：2024年10月28日)

(十)中國民用航空局，〈無線電導航系統〉，https://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/GYMH/MHBK/KZJT/201509/t20150923_1917.html(檢索日期：2024年10月20日)。

(十一)臺灣大百科全書，〈遙感探測〉，<https://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=1101>(檢索日期：2024年10月20日)。

作者簡介

左伊心士官長，臺中科技大學國際貿易系學士、海軍官校士官二專104年班通訊電子科、海軍技術學校士官高級班106年班，歷經副組長、電子作戰士、電子儀器修護士、教官，目前任職於資通電軍資電訓測暨準則發展中心。