



複雜雷達信號 模擬與分析

海軍上尉 黃士銘



提 要：

- 一、現代戰爭已轉型為超越時空的電子、資訊戰爭形態，能掌握電磁環境也就等同於掌握制勝的先機。
- 二、拜現代電子科技與信號調變技術之賜，雷達在延伸偵測距離、精確目標解析度、加強抗干擾能力等性能上都有顯著的提升與突破。
- 三、本研究主要分析各類型複雜雷達調變信號與特性，透過信號模擬器與電偵系統進行模擬、分析各種調變信號的特徵與判斷技巧，並藉由系統自動、手動分析及圖形化展示功能，讓從未接觸或剛入門的電戰人員能對雷達調變形態有初步的認識。

關鍵詞：雷達、信號調變、信號分析、電子戰

壹、前言

雷達(Radio Detection and Ranging, RADAR)是現代戰爭中不可或缺的利器，其工作原理是藉著本身發射電磁波與目標物回波，經由電腦運算得知遠方目標物的距離、高度、方位、速度等資訊。基於上述特性，雷達除了可運用在民間或學術上，軍事方面更是被廣泛使用與發展。

雷達發展可追溯至第二次世界大戰，當時因同盟國的雷達研製技術遠勝於軸心國，同盟國才能在戰爭中取得優勢並獲得勝利。同樣在近代兩次波斯灣戰爭中，美軍也是靠著電子戰與雷達干擾戰術與運用，使伊拉克

的防空雷達無法發揮應有的作用，導致其武器及飛彈系統效能大大降低，美軍才能一舉突破伊拉克的空防，取得空中優勢，後來才能以最精簡的兵力取得全面性的勝利。另外科索沃戰爭與兩伊戰爭等重大戰役，也都證明掌握電子戰與雷達優勢等同於戰爭先機。

由於現代戰爭形態的改變，近距離的人海肉搏戰已成為歷史，現代戰爭已轉型為超越時空的電子、資訊戰爭形態，誰能掌握電磁環境也就等同於掌握制勝的先機。因此，各國無不極力發展雷達工藝技術，避免於軍事上處於劣勢；另一方面，也拜現代電子科技與信號調變技術之賜，雷達在各項性能上都有顯著的提升與突破，例如：延伸偵測距

離、精確目標解析度、加強抗干擾能力等。總之，雷達技術已成為戰爭成敗的關鍵因素之一。

目前雷達技術與複雜信號種類相關的知識，仍是國軍較薄弱的一環。因此，本研究目的主要分析各類型複雜雷達調變信號與特性，透過威脅信號模擬器與電偵系統進行模擬、分析各種調變信號的特徵與判斷技巧，並藉由系統自動、手動分析及圖形化展示功能，讓從未接觸或剛入門的電戰人員能對雷達調變形態有初步的認識。

貳、複雜雷達信號介紹

起初雷達的設計理念只是很單純的透過雷達本身規律的發射、接收電磁波，再經電腦運算時間差就可達到對目標的測距、測速等需求。但由於某些複雜電磁環境與特殊運用場景，加上近代電子反制技術的提升與對抗等因素，使得傳統舊式雷達性能漸漸遭遇到挑戰，導致傳統雷達在很多環境運用上，已無法完全符合需求。

為解決上述問題，並且提升雷達性能，雷達信號從固定的射頻、脈波來覆間距與圖形掃描形態運作基礎上，加上現代信號調變技術方式，使雷達性能與運用有大幅度提升，進而衍伸出許多特殊雷達類型，例如：脈波都卜勒(Pulse Doppler, PD)雷達具有速度、距離分辨能力；脈波壓縮(Pulse Compression)雷達同時兼具高解析度與遠距偵測特性；跳頻雷達則有抗雜訊干擾等功用〔註一〕。

因此，比過去更複雜的雷達信號調變技術與運作模式，未來也勢必成為雷達分析人員必須瞭解與熟悉的一環。以下章節將分別針對頻率調變、脈波調變與掃描形態的種類與特性詳加說明。

一、頻調變信號種類與特性

頻率調變是指脈波頻率(脈波內、脈波間或脈波組間)進行有規律或以隨機方式快速變化。採用頻率調變的主要優點是提高抗干擾能力，特別是對人為產生的定頻干擾更為顯著。此外也可提高雷達的偵測距離、改善天線增益與距離分辨能力以及提高雷達的追蹤精準度。

一般頻率調變雷達是透過單一部發射機來發射不同頻率的脈波信號，所發射的脈波能以隨機方式或按一定規律，在脈波之間作較大範圍的頻率變化。因變化速度快與範圍廣之特性，使得人為定頻干擾效率降低，僅能採用較寬頻帶但功率分散的干擾方式。一般實現頻率調變常見方式是利用頻率合成器(Snthesizer)或旋轉調諧磁控管來達成。

目前常見頻率調變種類為跳頻(Hopping)、正弦波(Sn)、方波(Suare)與三角波(Tiangular)調變等模式，參數特性如附表。

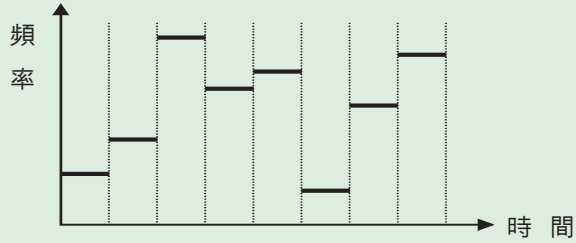
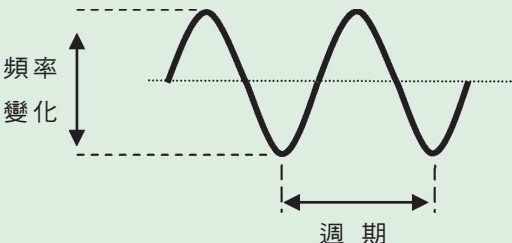
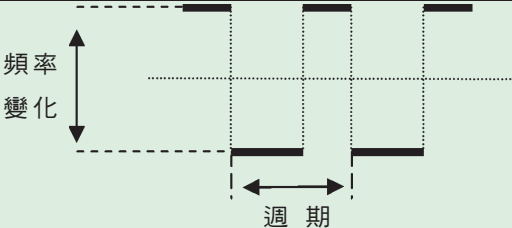
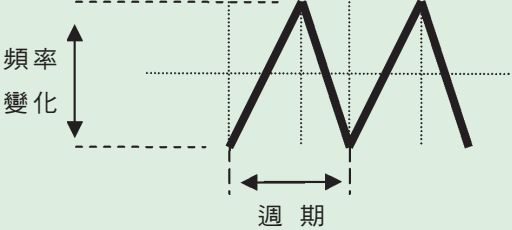
二、脈波調變信號種類與特性

相對於固定脈波來復間距(PRI)的脈波雷達來說，脈波調變係指脈波與脈波之間的PRI以規則或隨機的方式變化，例如：抖變(Jitter)，跳變(Stagger)，駐留/切換(Dwell/Switch)模式。

抖變調變是從多種PRI變化值中以亂數

註一：GEORGE W.STIMSON, ” Introduction to Airborne Radar” (USA:SciTech Publishing,Inc.1998)，PP.151-156。

附表 常見頻率調變種類

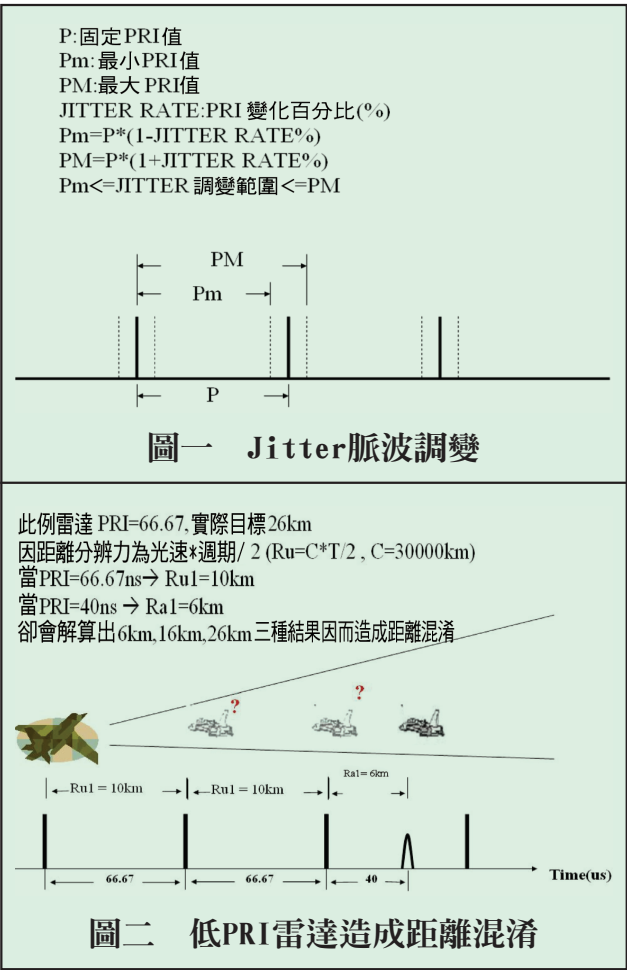
	調變形態	相關參數
跳頻		1. 跳頻頻率 2. 跳頻次數 3. 駐留時間 4. 停止時間
正弦波		1. 中心頻率 2. 頻率幅度 3. 變化週期
方波		1. 最高頻率 2. 最低頻率 3. 最高頻率週期 4. 最低頻率週期
三角波		1. 中心頻率 2. 頻率變化幅度 3. 變化週期

取出，其變化範圍甚至可達到中心PRI值的30%，故敵人難以偵測循環週期和變化範圍，導致無法精確的辨識其雷達參數特性。因此抖變調變可提供雷達電子防護(EP)能力，在用來防止某些特殊形態的電子干擾與攻擊(EA)極為有效。

抖變調變一般可用以下運算式來表示其

變化範圍(如圖一)：

早期雷達的設計，PRI都是採用固定(Constant)模式，但當此類型的PRI過小時就會產生距離混淆的結果，也就是當雷達運作時，雷達無法將其發射的脈波與回波作正確匹配，譬如當雷達發射第二個脈波之後才接收到第一個回波，此時雷達會因無法分辨



此回波為第一個或第二個發射的脈波所反射，距離混淆因而產生(如圖二)。因此低PRI雷達為了避免距離混淆(Range Ambiguous)發生，通常會採用多組PRI的模式，如：跳變。當雷達具備多組PRI時，它就可以分別將這多組PRI所計算出的距離值，透過聯集的方式求出正確的距離(如圖三)，如此一來便可克服距離混淆的情形發生。

跳變調變定義係以2~16個PRI值，透過有順序的切換方式發射脈波，在一變化週期內(Frame)的PRI數量稱為位置(Position)，

變化週期內的PRI值稱為單元(Element)，例如一雷達信號以8組PRI作週期變化，即可稱為8-Position Stagger。

第三種常見脈波調變類型是駐留及切換型，此類型定義是以多個駐留的PRI組成一特定形態(Pattern)作有順序的切換組合(如圖四)，有的會搭配不同射頻(Radio Frequency, RF)來發射信號，變化範圍甚至超過500MHz。駐留及切換和跳變的差異為跳變是每一個脈波PRI皆作變化，而駐留及切換則是駐留兩個以上固定PRI後再變換到下一個PRI值。此種調變技術時常用於脈波都卜勒雷達以解決速度、距離混淆或運用於活動目標指示器以消除盲速(Blind Speed)現象。

三、雷達掃描形態種類與特性

雷達掃描係指雷達搜索目標時，其天線使用射頻電能波束在空間作上下左右之方向性運動而言。雷達波束掃描的動作，一般可區分為「機械式」及「電子式」兩大類。傳統雷達皆屬機械式，因波束較窄的特性限制，所以需透過轉動式天線來控制波束方向，如:搜索雷達、測高雷達。而新式雷達較常採電子式掃描方式，通常搭載於固定天線板，以陣列方式排列，透過電腦控制所有子天線波束方向與寬度，例如:相位陣列雷達(Phase Array Radar)〔註二〕。

影響雷達掃描形態參數眾多，但藉由下述三項參數仍可描述大部分雷達掃描特性：

(一)掃描形式(Scanning Mode)

掃描形式代表雷達波束在空間所描經的途徑，而形態常隨著雷達用途而異。例如

註二：向敬成、張明友《雷達系統》，五南圖書出版公司，2004年7月，頁3-13。



：預警/搜索雷達採用圓形掃描(Circular Scan)或扇形掃描(Sector Scan)、炮瞄雷達則是屬錐形掃描(Conical Scan)或螺線形掃描(Spiral Scan)。

(二)掃描速率(Scanning Rate)

掃描速率又稱掃描率，亦代表天線轉速。掃描率與雷達蒐集、鑑別電波資料能力息息相關。因掃描率必須與脈波來復頻(Pulse Repetition Frequency, PRF)、波束寬(Beam Width, BW)適切配合，才能確保掃描空間中的每一點，均能獲得適足的脈波數與能量涵蓋。假如雷達掃描率太快，導致

接收目標回波數不足，對目標的鑑別能力也就較差；反之，則會因掃描週期太久，錯失某些角度瞬間出現的信號。另外也需將雷達偵測距離範圍考量進去，因距離越遠電波傳遞時間也需拉長，所以掃描速率也要適切的降低，才能有效偵蒐遠距目標。

(三)極化(Polarization)

極化區分為線性極化與圓形極化兩種。線性極化又可分成水平和垂直極化。水平極化常用於預警搜索雷達，垂直極化則用於測高雷達和長程助航雷達，而圓形極化最常搭配炮瞄雷達使用。

四、小結

上述內容可知，從雷達信號特性與參數，即可研判出該電子裝備的性能與用途，雖各型雷達參數會有些差異變化，但亦差異不大。

(一)信號之射頻

射頻參數決定雷達的偵蒐距離、精密度和體積。

1. 低射頻(波長長)，波束較寬，信號不容易衰減，可偵測較遠的目標，但精密度較差，常見類型：遠程預警雷達、超地平線雷達等。

2. 高射頻(波長短)，波束較窄，信號容易衰減，僅可偵測距離較近目標，但精密度高。常見類型：火控雷達、炮瞄雷達等。

(二)信號之脈波寬度

脈波寬決定雷達對兩目標的距離分辨能力，亦可決定雷達測獲最近距離目標能力。

1. 脈波窄，測距近，分辨相鄰兩目標能力高，如：火控雷達。

複雜雷達信號模擬與分析

2. 脈波寬，測距遠，分辨相鄰兩目標能力低，如：預警雷達。

(三) 信號之脈波來復間距

脈波來復間距決定最大測距與目標鑑別能力。

1. 脈波來復間距大，雷達指示器的拂掠時間增加，最大測距增加，但若間距過大，則會影響偵測快速移動目標能力，例如：預警雷達。

2. 脈波來復間距小，雷達指示器的拂掠時間縮短，最大測距縮短，但若間距過小，則會產生距離混淆情形，此時則需透過脈波變化方式解決。

(四) 天線之掃描週期

掃描週期決定雷達偵測距離與精準度。

1. 掃描週期長可偵測較遠距離目標，但精確度較差，如：預警雷達。

2. 掃描週期短僅可偵測較近距離目標，但精確度高，如：火控雷達。

參、複雜雷達信號模擬與分析

一、射頻調變信號模擬與分析

本節內容將對雷達信號調變模式手段中常見的射頻調變，透過畫面展示與文字解釋，讓分析人員更容易掌握此調變技術的特性。後續內容包含幾種常見的頻率調變方式。

(一) 固定頻率模式

此模式雷達僅有單一頻率射頻，特點為設計之初，天線、功率放大器等周邊配備只要符合其頻率特性，因此，工程面相對單純，但也因為固定頻率的特性，容易遭受到電磁波的干擾，尤其是人為所產生的信號。為

避免受干擾，通常還會配賦另一組備用頻率，供主頻受干擾時切換(如圖五)。

(二) 跳頻模式

此模式採分時多工模式，將時間切割成相同大小的區塊，然後再將欲發射的頻率分配至區塊內，發射頻率的順序可依使用者需求去設定，通常採固定順序或擬隨機方式產生，但前提是收發雙方要事先確認跳頻順序、序列表及跳頻速率，後續雙方才有辦法做溝通。敵方若要干擾或擷取我方跳頻信號，也必須掌握我方跳頻信號的特性參數才能成功。因此，跳頻模式比固定頻率模式更具抗干擾及隱匿能力(如圖六)。

(三) 正弦波與三角波模式

此兩種模式是將頻率模擬正弦波或三角波上下震動變化方式產生。該模式特性比固定頻率具備較寬的頻率變化範圍，以致於敵方採用定頻干擾模式時成功機率不大，敵若採寬頻干擾雖可能覆蓋較大頻率範圍，但功率勢必有所犧牲。因此，這兩種頻率調變模式也可提供某種程度的抗干擾能力(如圖七、八)。

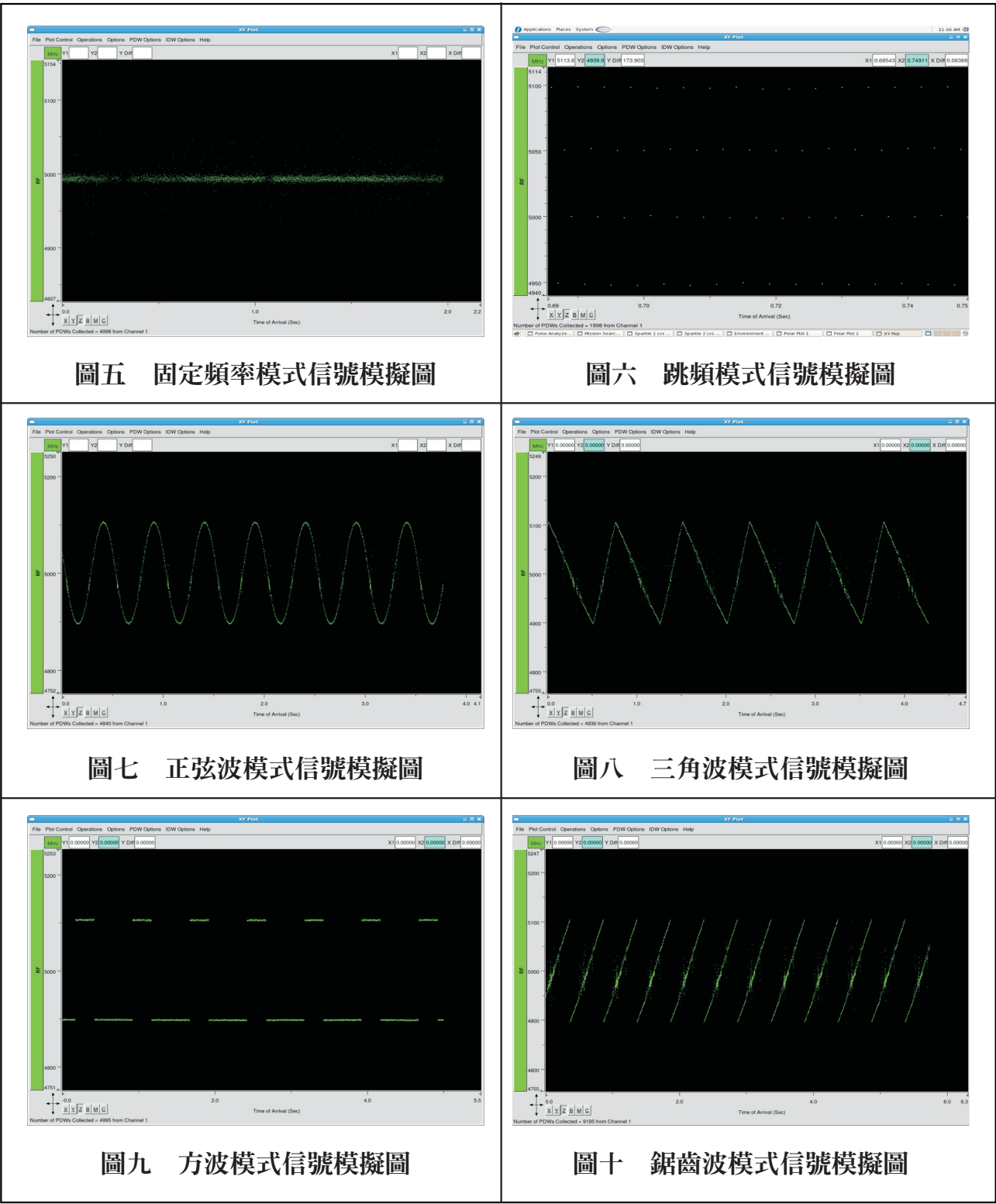
(四) 方波模式

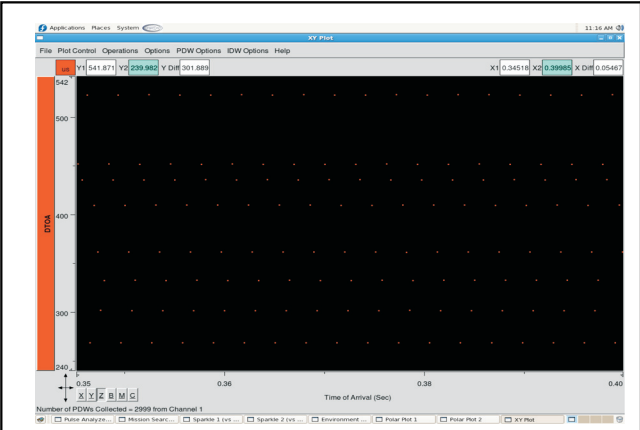
此模式使用兩組頻率，搭配設定的駐留時間做兩頻率的發射轉換。如同跳頻模式，收發雙方需事前協調好頻率與駐留時間。優點為當敵方若要採取干擾作為，就需針分別對兩組頻率干擾才能奏效(如圖九)。

(五) 鋸齒波模式

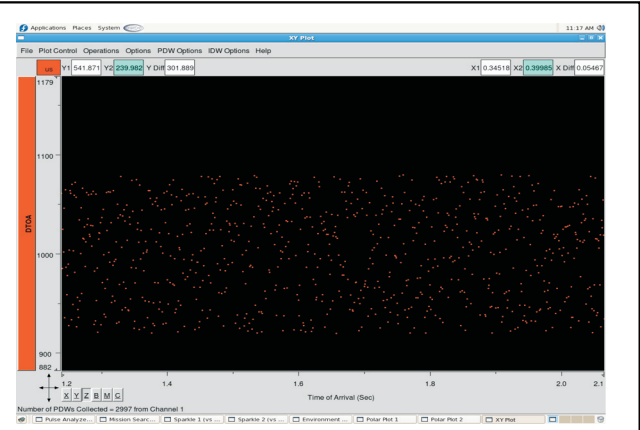
此模式通常可按照頻率上升或下降，區分為上鋸齒波及下鋸齒波。特性為頻率是以驟升或驟降的形式變化，可增加敵偵蒐上的

複雜雷達信號模擬與分析

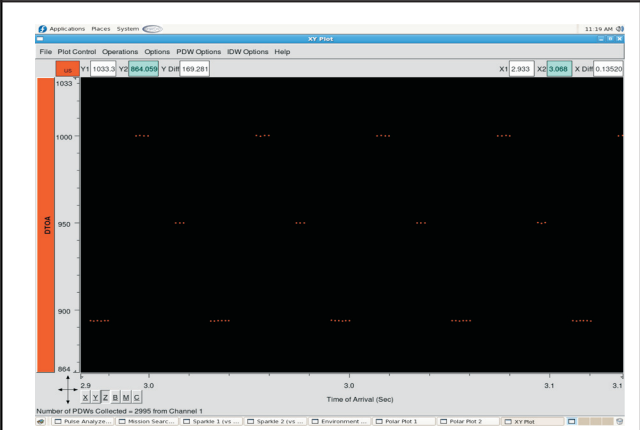




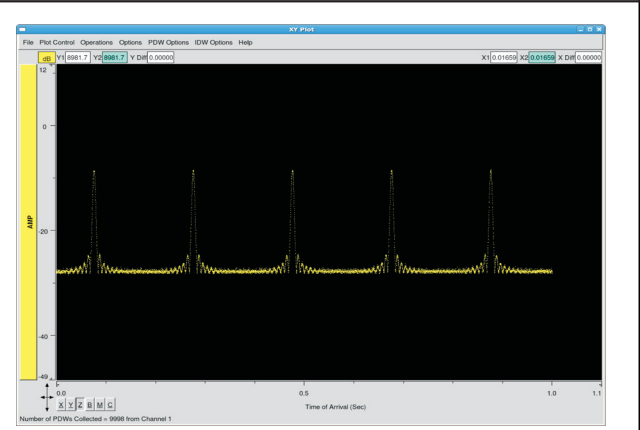
圖十一 跳變模式信號模擬圖



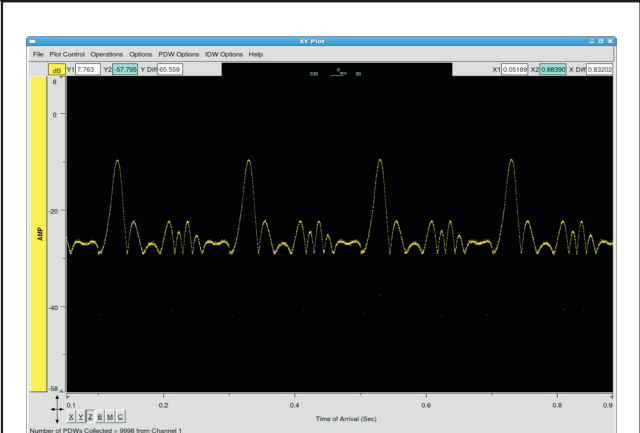
圖十二 抖動模式信號模擬圖



圖十三 駐留切換模式信號模擬圖



圖十四 圓形掃描模式信號模擬圖



圖十五 錐形掃描模式信號模擬圖

困難度(如圖十)。

二、脈波調變信號模擬與分析

本節內容將模擬雷達信號調變方式中的脈波調變，下述內容包含幾種常見的脈波調變方式。

(一)跳變模式

此模式係指脈波來復間距可做2～16組的週期變化，特性為可消除低PRI雷達距離混淆問題，最常被運用於機載的射控雷達(如圖十一)。

(二)抖動模式

此模式PRI於設定的範圍之間作隨機變化，特性除了可消除距離混淆外，也可增加敵方對我雷達參數偵蒐上的難度(如圖十二)。

(三)駐留切換模式

此模式類似跳變模式，PRI會有幾種不同數值，其差異為此模式在同一PRI值會駐留兩個以上脈波後，再做下一PRI的變化。優點為可消除距離混淆與解決盲速問題，最常被脈波都卜勒雷達所採用(如圖十三)。

三、雷達掃描形態模擬與分析

雷達掃描形態為雷達參數中原理最簡單卻最難分析辨識的一環，困難度在於通常偵蒐一方僅能大略估計敵雷達掃描週期數值，對於雷達功率或波束角度變化，常會因自然因素與偵蒐系統性能限制而無法清晰辨識。因此，早期在判斷雷達掃描形態時，也僅能透過電子情資與其他參數去綜合研判，推測出可能的幾種掃描模式，但即使如此，瞭解各式雷達掃描形態的特徵，仍有其必要性。本節利用信號模擬器直接模擬產生較完整的圓形掃描與圓錐掃描兩種信號，以做為信號分析系統所需信號源，雖與真實的信號有差異，仍可從中觀察到掃描形態特徵。

(一)圓形掃描模式

此模式為掃描形態中最普遍也最單純的模式，其特徵是振幅大小會呈固定週期變化。因掃描範圍可涵蓋360度，沒有偵蒐死角，因此最常被搜索雷達或導航雷達所採用(如圖十四)。

(二)錐形掃描模式

此模式雖然也呈週期變化，但因運作時僅針對一特定方向做錐形掃描，涵蓋區域較

小，波束偏差角度不大，振幅變化也就不像圓形掃描顯著。該模式特性為可精準追蹤目標，通常機載射控雷達會採用此種掃描模式，來引導武器系統攻擊(如圖十五)。

複雜雷達信號種類繁多且日新月異，因受限於篇幅與電偵系統本身分析能力考量，僅能模擬目前較常見的類型，無法將全部的複雜雷達信號一一呈現說明，但身為電子戰領域的成員，對雷達未來的關鍵技術與演進形態，例如：脈波內調變技術、脈波壓縮技術、單脈波雷達、連續波雷達等，仍要持續關注不可鬆懈，才是正確的態度。

肆、結語

隨著科技的進步，電磁信號已廣泛被人類使用發展，也因電磁運用領域的擴張，傳統類比信號方式已不敷使用，漸漸的數位信號處理技術崛起，也帶動著裝備全面的數位化。

雷達領域不外乎也跟著科技演進，因此，雷達信號研析人員程度與技術也必然要和現代雷達技術同調，必須對所有雷達信號的類型有相當程度的瞭解，並且能透過信號分析系統工具的輔助，完整掌握雷達信號的特性，才能夠提供正確的情資，以利指揮官判斷情勢與決策。

雷達信號分析這門學問門檻較高，人員本身須具備信號分析原理知識外，量測儀器的操作與技巧也是必備技能之一。此外，對雷達信號參數的認知與敏感度，更往往是關鍵的因素。因此以往從事信號分析需具備深厚的背景知識及投入大量的時間才能有所收

獲。如今，拜科技進步之賜，本文透過電偵系統將雷達參數由艱深的數據資料轉換成易懂的圖形化方式呈現，初接觸人員便能快速瞭解信號的種類與特徵，不但大大降低學習挫折感，也可提高學習成效，國軍的電子戰能量也才能有顯著的成長。



作者簡介：
黃士銘上尉，國防大學國防資訊所碩士93年班，現服務於資電作戰指揮部。

老軍艦的故事

聯鯨軍艦 LSIL-264

聯鯨軍艦為一步兵登陸艦，係由美國Boston之Gootge Lantey & Son 公司所建造，1942年下水成軍，成軍後即參加第二次世界大戰，戰後美國依據中美租借法案，於民國36年3月在青島將該艦移交給我國，我海軍接收該艦後立即成軍，並命名為「聯鯨」軍艦，隸屬於登陸艦隊。該艦艦首兩側各有一出入口，並備有一吊梯，可供人員登陸出入時使用。

該艦成軍後主要擔任人員運輸任務，先後曾參加過多次戰役，其中較重要的戰役計有：江防作戰、廈門保衛戰等。

民國50年10月1日該艦由於艦體老舊，內部機件也多損壞，不堪現役而奉令除役。(取材自老軍艦的故事)

