

高解析度雷達影像於軍事目標判讀研究

作者／呂鴻道中校、薛家燕中尉、杜德銘

提要

在伊拉克戰爭中，美軍近七成的軍事情報來自其部署在太空中的各型偵察衛星。這些衛星包括可利用可見光、紅外線偵照的“鎖眼-12”系列衛星及可克服惡劣氣象條件下利用微波雷達成像的“長曲棍球”衛星，它們能夠偵察導彈發射、識別樹林與灌木叢下的軍事偽裝，對情報偵察具有相當高的應用價值。

合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有主動觀測、不受天候干擾及穿透樹木遮掩下的偽裝與金屬感應等特色，有別於被動式的光學偵照系統，可補足光學影像的不足，其用途由對敵重要軍事設施的偵察，到戰場上目標偵測及偽裝辨識等戰術運用；高解析度的雷達與光學影像已成為現代偵察、監視和目標鎖定的兩把利刃。

2007 年德國 TerraSAR-X、義大利 COSMO-SkyMed 及加拿大的 Radarsat-2 衛星陸續昇空，它們均能提供 1 公尺解析度的雷達影像，可補足光學影像 Ikonos、QuickBird 及 GeoEye 的偵照不足之處。本文主要研究的目的，借由雷達波成像基礎的探討，輔以我們在軍事目標實際的判讀範例，希提昇我軍將來在高解析度 SAR 影像目標識別之能力。

關鍵字：合成孔徑雷達

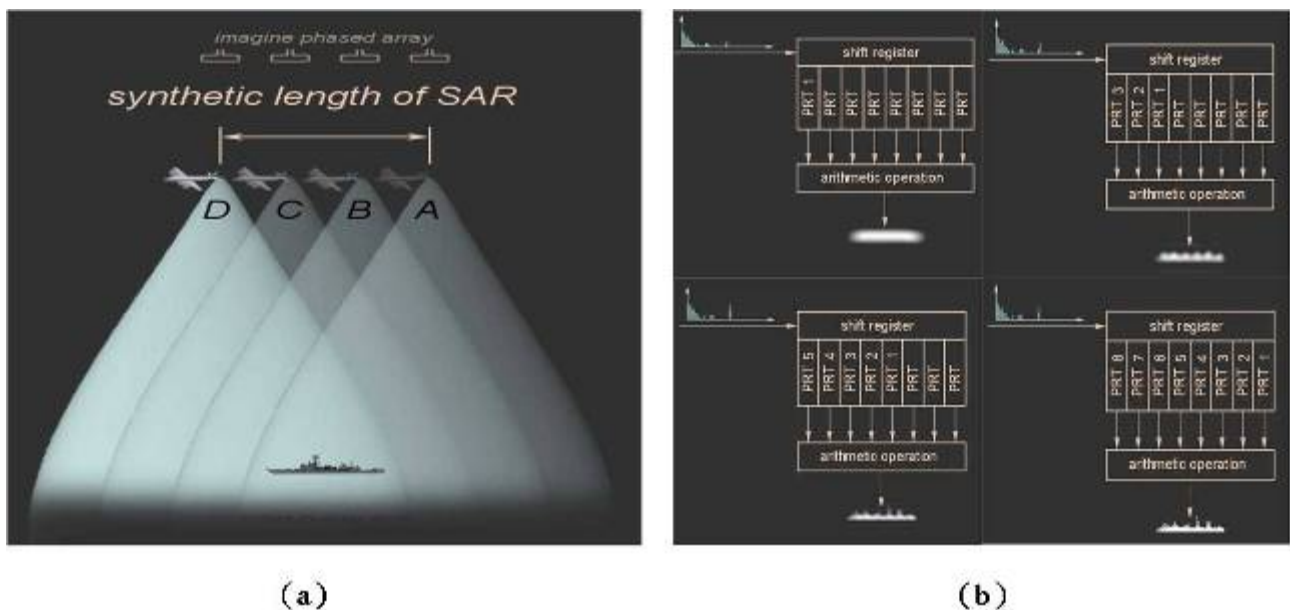
前言

合成孔徑雷達(SAR, Synthetic Aperture Radar)微波成像屬於遙感技術的一種，利用雷達對地面目標進行掃描，通過計算回波來得到地面目標的特性，如歐洲太空中心的 ERS-1/2 衛星具 25 公尺解析力，加拿大的 RADARSAT-1 衛星則具 8 公尺解析力，可進行海洋環境及地形變遷監測的應用。SAR 的成像技術經過數十年的發展，目前衛載高解析度的系統已趨於成熟，德國 TerraSAR-X 衛星首先在 2007 年 6 月 15 日發射升空後，緊接 2008 年義大利 COSMO-SkyMed 及加拿大 RADARSAT-2 等新一代的雷達遙測衛星也相繼升空，這些衛星均可拍攝 1 公尺解析度的影像，它們雖屬於商業運作但具有軍事偵查的應用。由於 SAR 具有主動觀測、不受天候干擾且具穿透樹木遮掩的能力，有別於被動式的光學系統，可補足光學影像偵照的不足，其用途可由對敵軍事設施的偵察，到戰場上目標偵測及偽裝辨識等戰術運用，目前已成為各國對敵偵察的工具之一。

本文

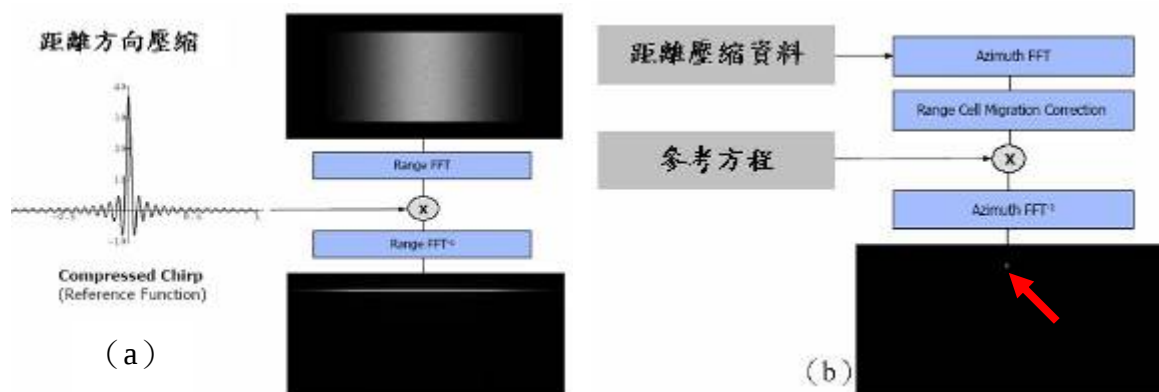
一、SAR 影像成像原理

主動微波遙測係經由載體（機載或星載）帶著合成孔徑雷達，以固定的速度沿著既定的航線或軌道運行，依側視的方式對觀測目標發射連續的同調脈波，再接收經由目標物反射的回波，依據其強度與相位資料轉換成可視的影像。對於合成孔徑的運作方式，我們可以陣列天線的思維來說明；假設雷達沿著飛行方向前進，在圖一（a）的 4 個位置可以看到目標物，但由於經過這些位置時，雷達天線到目標物的距離是不等的，所以訊號往返所需的時間也不相同，因此 4 個目標物回波存在不同的相位移，而這些不同相位移的回波是依序被接收器接收儲存在移位暫存器(Shift Registration)中，最後再將訊號加總輸出，如此可將在真實孔徑波束中不能解析的目標以小孔徑合成的方式來成像，如圖一（b）所示：



圖一（a）以小孔徑合成的方式來攝像；（b）移位暫存合成的方式(資料來源：
<http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.en.html>)

接收的回波在分別經由距離(衛星飛行方向垂直;Across-Track)與方位(沿衛星飛行方向;Along-Track)壓縮後，即可轉換成可視的影像，即當影像接收後，先進行距離方向的壓縮，將影像調製為線形的成像，如圖二（a）所示，接這再藉由方位的壓縮將其聚焦為一個點，如圖二（b）所示，將影像逐點處理即可得到 SAR 影像。



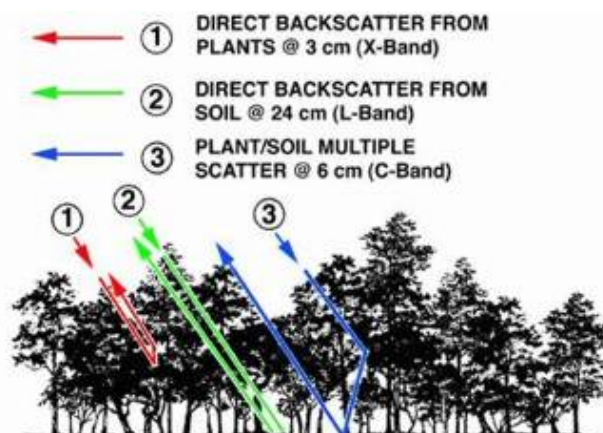
圖二 (a) 距離方向壓縮；(b) 方位方向壓縮(資料來源：
<http://www.sarmap.ch/SAR-Guidebook.pdf>)

二、雷達波反射特性

實務上，雷達反射波的強弱通常會受到地物材質與幾何形狀的影響，例如水泥鋪面的道路會吸收雷達波，而鐵路則強反射雷達波，因此在 SAR 影像上，前者呈暗成像而後者則呈亮成像。然而，雷達反射波的強弱又與使用的波長及拍攝角度有極大的關聯性；下面是影響雷達反射波的各项因素：

(一) 雷達波長與繞射係數(穿透率)

由於各種地物有不同的繞射係數，因此使用不同的雷達波長，其對地表的反射亦不同，地物的繞射係數愈大，雷達回波就愈強，在影像上就愈亮。理論上，繞射係數與波長的平方成反比，波長愈長，繞射係數則愈小，雷達接收的回波也愈弱；反之，波長愈長，穿透地表的能力就愈好。例如 L 波段的雷達波可穿透樹葉及細小的樹枝，對樹幹則反射；C 波段之雷達波可穿透樹葉，對細小的樹枝及對樹幹則會反射；而 X 波段之雷達波遇樹葉就直接反射，因此穿透率最差，但對偵測物體的表面則最具敏感性，因此對軍事目標的偵測也最具顯著性，如圖三所示：



圖三 各不同波長對地表物體穿透示意圖(資料來源：<http://www.sarmap.ch>)

目前新的TerraSAR-X與COSMO-SkyMed雷達均採用X波段，RADARSAT-2則採用C波段。

(二)雷達拍攝入射角與地形的關係

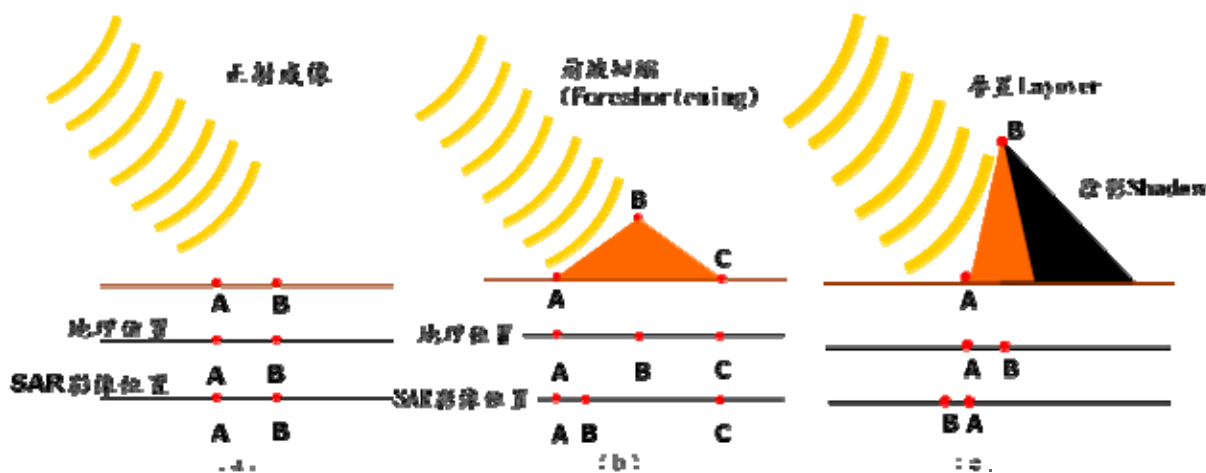
另一與 SAR 影像成像有密切關係的特性是拍攝入射角 (Incidence angle) 與地形的關聯性，假設在正常狀況下的成像如圖四 (a) 所示，其中正確的地理位置 (A,B) 應與雷達影像中 (A,B) 位置相同。但由於 SAR 影像成像與雷達波束折返的時間有關聯，因此雷達波束會隨著入射角及地形起伏與坡度的影響而造成不同的成像。

三種常見的現象，前波縮短 (Foreshortening)、疊置 (Layover) 與陰影 (Radar Shadow)，我們說明如下：

1. 前波縮短 (Foreshortening)：如圖四 (b) 所示，對面向 SAR 的坡面，若坡度愈大，其斜距長度則愈短。由於坡度關係，雷達波於 A、B 兩點的反射時間相近，在 SAR 影像成像時，A、B 兩點間距離會縮短。

2. 疊置 (Layover)：對面向 SAR 的坡面，其坡度比視角大時，則會產生斜距上的變化量與地距上的變化量正負號相反的情形，因此在圖四 (c) 中可發現 A、B 於 SAR 影像的成像位置成倒置現象，其因影像中 B 點位置因地形及入射角較小，使得 B 點位置先於 A 點位置反射，因此於 SAR 影像中呈 B 點與 A 點位置倒置。

3. 陰影 (Shadow)：對 SAR 背向的坡面，當坡度比視角大時，坡面本身將無法接收雷達訊號，造成影像上無任何地物的回波訊息，在影像上則呈現陰影，其效果如圖四 (c) 所示。



圖四 (a)SAR影像位置；(b)SAR影像為前坡短縮之成像位置；(c)SAR影為疊置及陰影之成像位置(資料來源：作者繪製)

(三)介電常數 (Dielectric Constant)

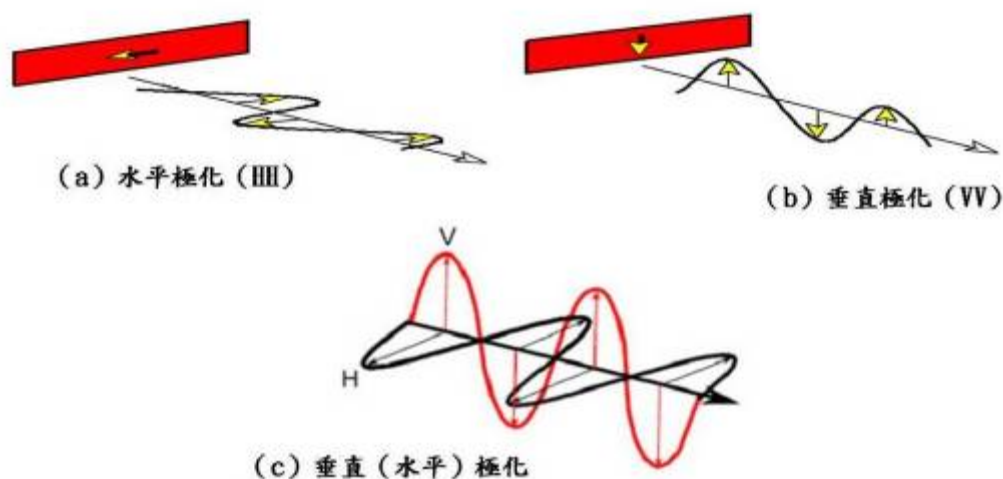
介電常數是各種物質反射率及導電性的指標。乾燥的物體其介電常數通常界於 3 至 8 之間，水的介電常數則可高達 80，介電常數愈高的物質，其對電波的反射性愈好，在雷達影像中呈較強的回波反應。由於金屬物體具有高的介電常數，因此我們通常利用此一特性偵測鐵橋、鐵軌及軍事上的金屬設施，此現象清楚顯示在圖五。



圖五 光學影像與雷達影像對金屬物質偵測辨識比較 (資料來源：作者繪製)

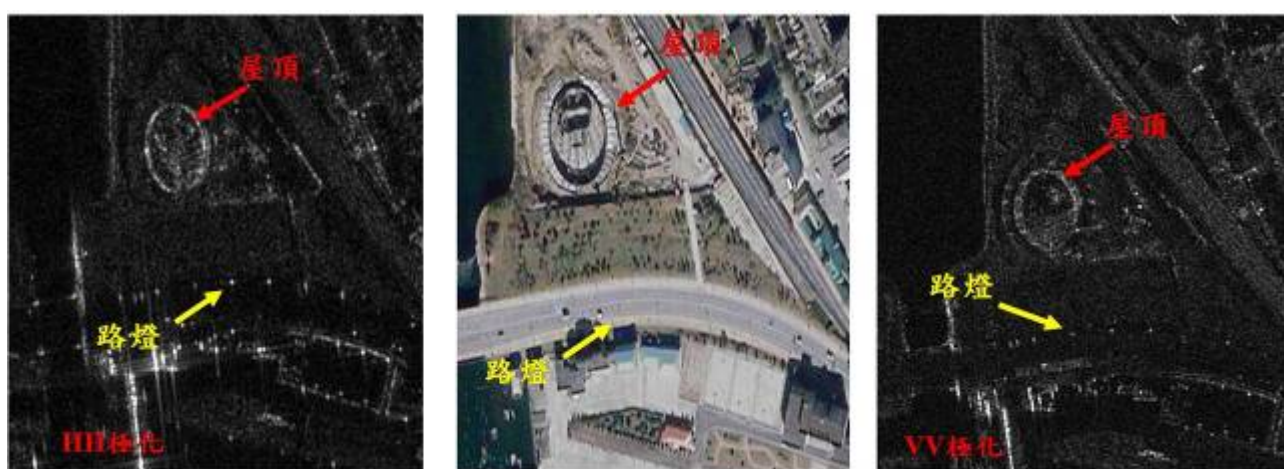
(四)極化 (Polarization)

雷達波可以不同的極化方式來發射與接收，四種常用的模式分別為 (1) 水平極化波發射與接收 (HH)、(2) 垂直極化波發射與接收 (VV)、(3) 水平發射垂直接收 (HV) 與 (4) 垂直發射水平接收 (VH)，如圖六所示。



圖六 四種極化方式(資料來源：作者繪製)

由圖六的極化模式中可了解 HH 與 VV 之能量方向是不同的，HH 模式通常對物體的整體結構呈明顯的反應，而 VV 模式則對物體的細微結構反應較強。如圖七中直立於路面的路燈，在 HH 影像中的反應較 VV 影像更為明顯；另圖中圓形建物在 VV 影像反射出之屋頂細微紋理較 HH 影像更為細緻。同樣的在圖八中拱頂方形建築也可發現 VV 極化所反射出之屋頂細微紋理較 HH 極化更為清晰。圖七、八中之建物之案例即說明了在 HH 極化模式下，垂直於地面而面像雷達方向的牆面反應較為顯著，而 VV 極化模式中，即以屋頂上的反應較為細緻，因此選擇正確的 SAR 影像極化模式，對於目標物的判識將具極大的助益。



圖七 HH 與 VV 極化影像比較(資料來源：TerraSAR-X 及 QuickBird 衛星影像，作者處理繪製)



圖八 HH 極化與 VV 極化影像比較(資料來源：TerraSAR-X 及 QuickBird 衛星影像，作者處理繪製)

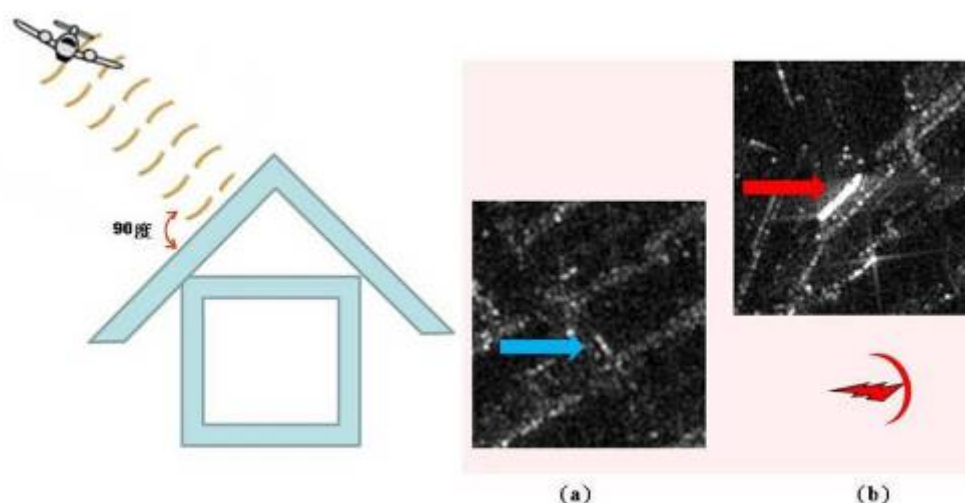
三、軍事目標判讀

過去對 SAR 影像的運用，多以全偏極產品對目標進行極化特徵的萃取。然而，目前衛載系統中 SAR 全偏極影像產品多屬中、低解析度，如 Radarsat-2 全偏極產品僅約 8 公尺，無法有效直接運用於軍事目標特徵萃取。因此我們在目標判別上仍以單一極化運用為主。在圖七、八影像中肉眼雖可以看出極化對於物體幾何形狀有不同的反射波值，如 HH 極化對偵測水平目標較佳，而 VV 極化則對偵測垂直目標有較佳的反射波值。由於這些影像是不同時段與不同軌道偵照所得，因此實際狀況仍需視雷達波間入射與方位角度而定。

在進行目標判讀前，我們需先了解地物幾何結構對雷達波反射及成像的影響，其中包括了垂直反射、雙邊夾角（二次反射）、三邊夾角（三次反射）等不同成像。

（一）垂直反射（Perpendicular Specular Return）

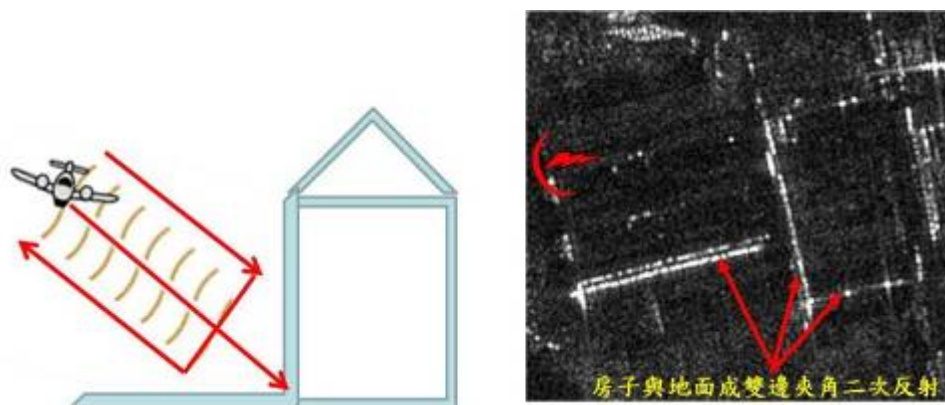
地物某側角度正對於雷達源為九十度造成的全反射異常亮點，如圖九（a）為較平坦屋頂的反應，圖九（b）為尖頂房頂的反應。



圖九 SAR影像垂直反射成像(資料來源：作者繪製)

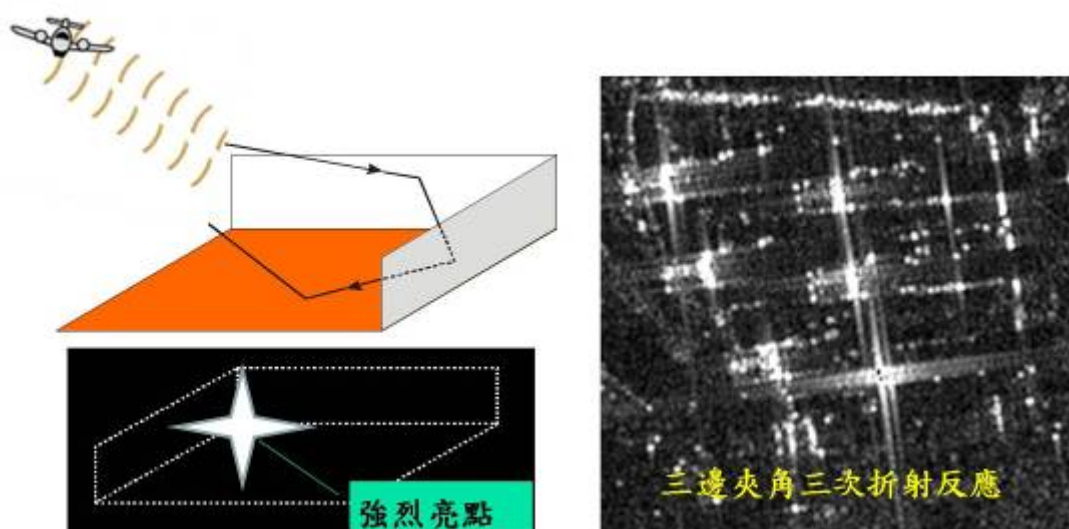
（二）雙邊夾角（Dihedral）

又稱角反射（Corner Reflection）當物體具有二個平面組成的夾角，在雷達波的重覆反射下在夾角處會呈現較亮反應，如圖十所示。



圖十 SAR影像雙邊夾角成像(資料來源：作者繪製)

(三) 三邊夾角 (Trihedral)：又稱三次反射，當物體有三個平面所成的夾角，雷達波會在其中不斷的折射，在影像中則呈現十字型亮點，如圖十一所示。



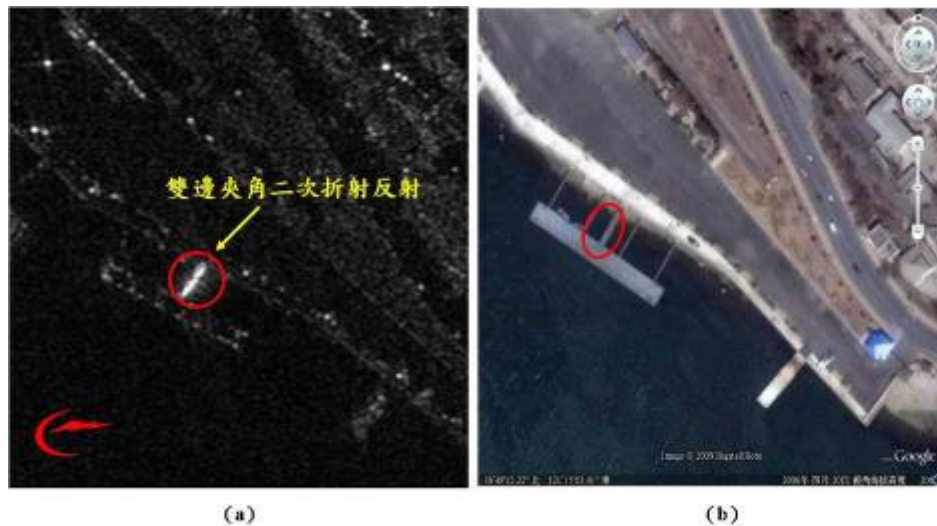
圖十一 SAR影像三邊夾角成像(資料來源：作者繪製)

四、軍事目標案例

(一)港口及船艦判讀

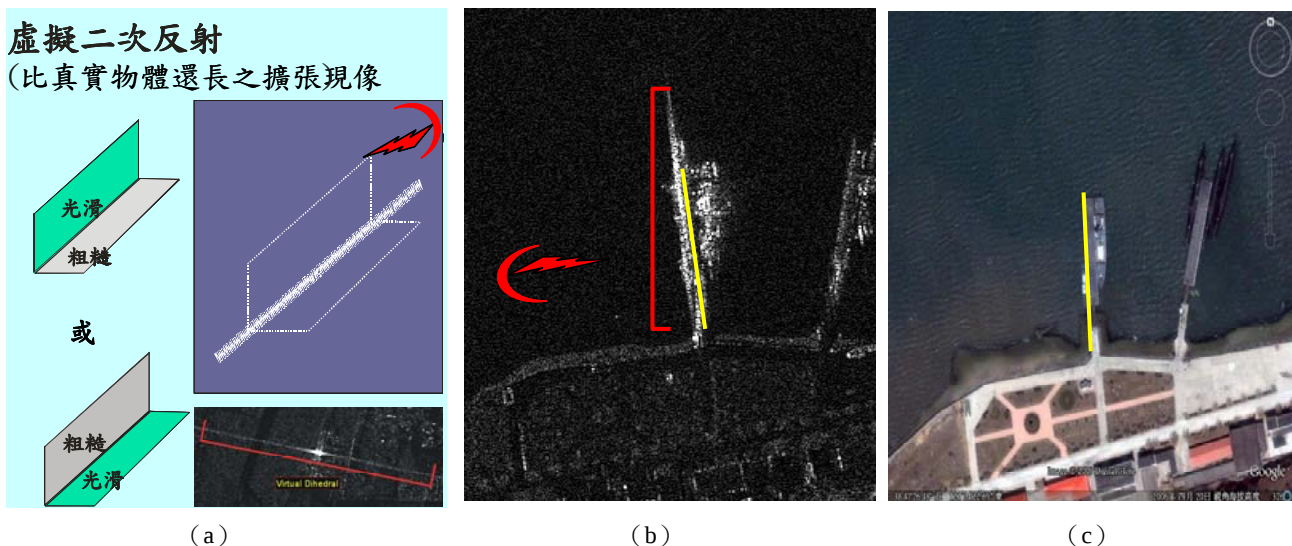
以下就碼頭周邊金屬吊臂、儲油槽、戰艦及潛艦等目標進行判釋說明：

1.圖十二的碼頭屬離岸碼頭，在海水為背景下可明顯呈現，其中碼頭支橋與海水平面成雙邊夾角 (Dihedral)，二次反射後會呈較亮的反應。



圖十二 碼頭 (b) 雷達影像；(c) 光學影像(資料來源：TerraSAR-X及Google Earth 衛星影像，作者處理繪製)

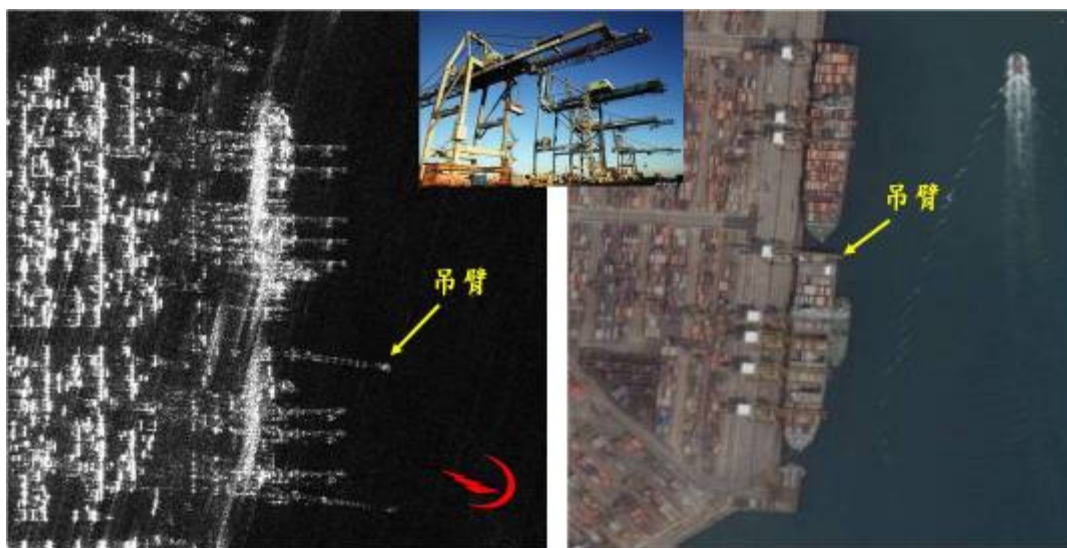
2.圖十三的 SAR 影像，在碼頭常發生雷達波打在較平的鏡面（碼頭水泥結構）及另一面為較粗糙物物質（海面波浪）的成像，此即形成虛擬夾角（virtual dihedral）成像，雷達波反射將呈現比真實物體還長的擴張現象，紅線標示為虛擬夾角所呈現延伸擴張，若有船隻停泊，則可於影像中量測船的長度，以推判何種船型，而在碼頭右側將不會造成延伸擴張的現象，通常可利用是否形成虛擬夾角來判定該碼頭是否有船艦停泊，如圖十三（b）碼頭右側即判定無船艦停泊。」



圖十三 (a) 虛擬夾角；(b) 雷達影像；(c) 光學影像(資料來源：TerraSAR-X 及Google Earth衛星影像，作者繪製)

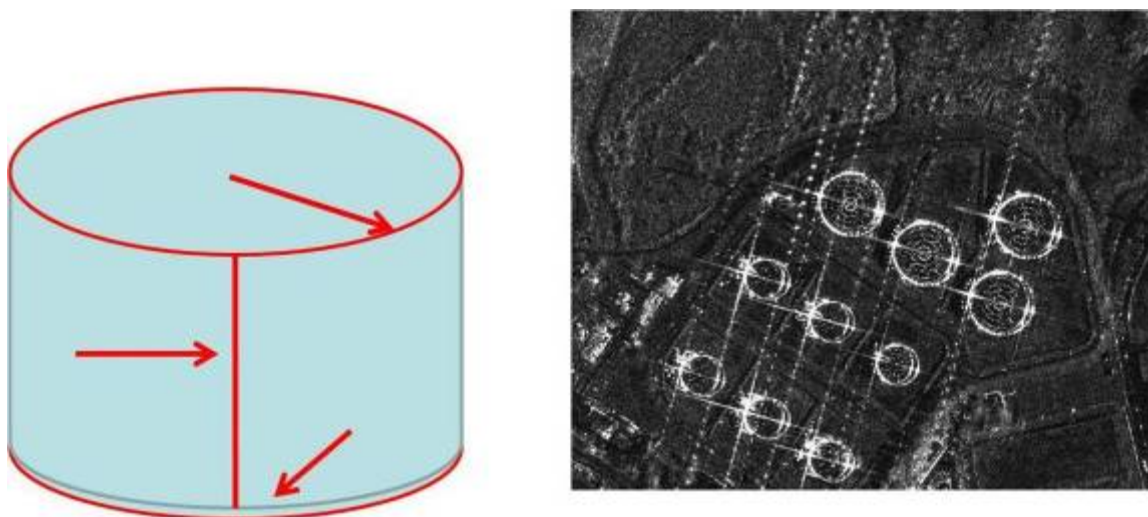
3.圖十四碼頭邊的起重吊臂在光學影像中是不易辨識的，但由於吊臂為金屬

製品其介電系數較高，在 SAR 影像呈相對強反射，配合吊臂高度與入射角關係，會產生疊置效應將吊臂延長，以海面單純的背景襯托，在 SAR 影像中可輕易辨釋出吊臂位置。



圖十四 碼頭吊臂之雷達影像與光學影像比對（資料來源：作者繪製）

4.在港口周遭的油槽、水槽及氣槽等工業設施，其形狀通常為圓柱體，在其圓形平頂與邊緣等處會產生較強烈的反射，如圖十五所示為油槽在 VV 極化上的反應。



圖十五 SAR影像圓柱體成像（資料來源：作者繪製）

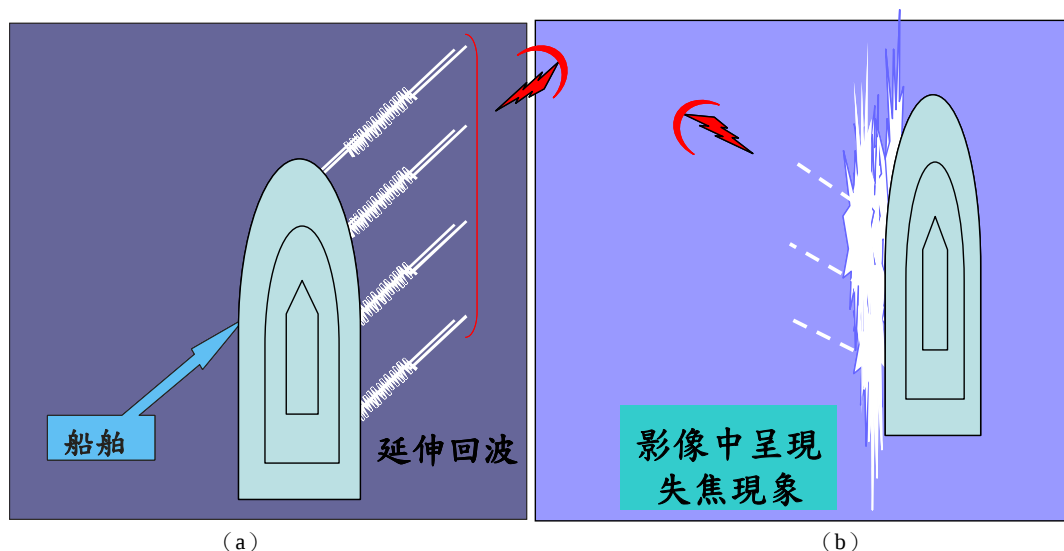
由圖十六（a）中，雷達波束方向是由左到右，其正向雷達波的邊緣呈較亮的二次反射，如黃箭頭所示。由於雷達影像之成像通常會朝雷達波照射方向傾倒，此現象為疊置（Layover）效應，圖中藍圈為油槽的頂端正確位置，而黃圈則表示油槽向雷達波束方向傾倒的位置。在油槽的背向則有陰影產生，如綠色箭頭

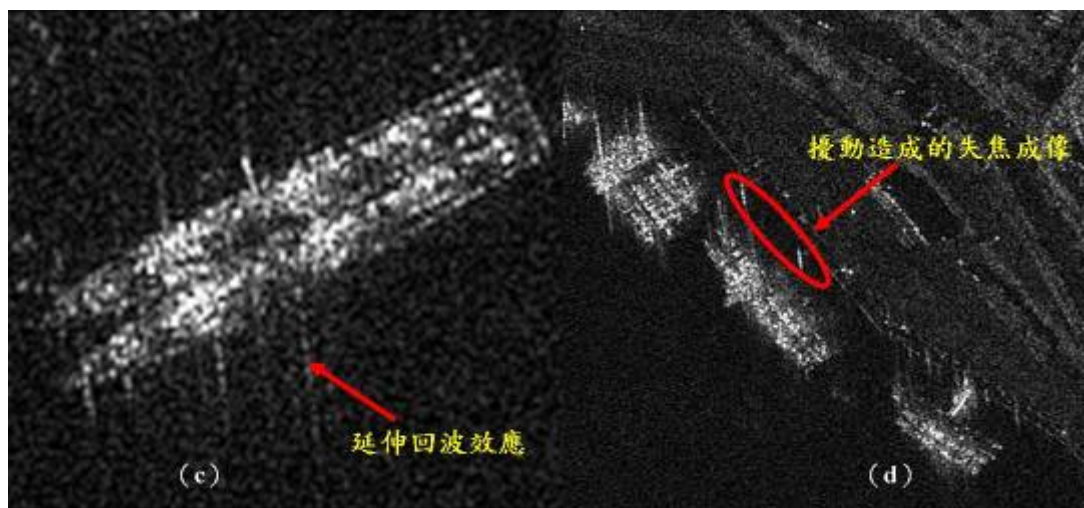
所示。若結合陰影長度、載具飛行高度及雷達波入射夾角則可求取油槽的高度，此為判讀上重要的參考及研判依據。



圖十六 (a) 儲油槽雷達HH影像；(b) 儲油槽光學影像(資料來源：TerraSAR-X 及Google Earth衛星影像，作者處理繪製)

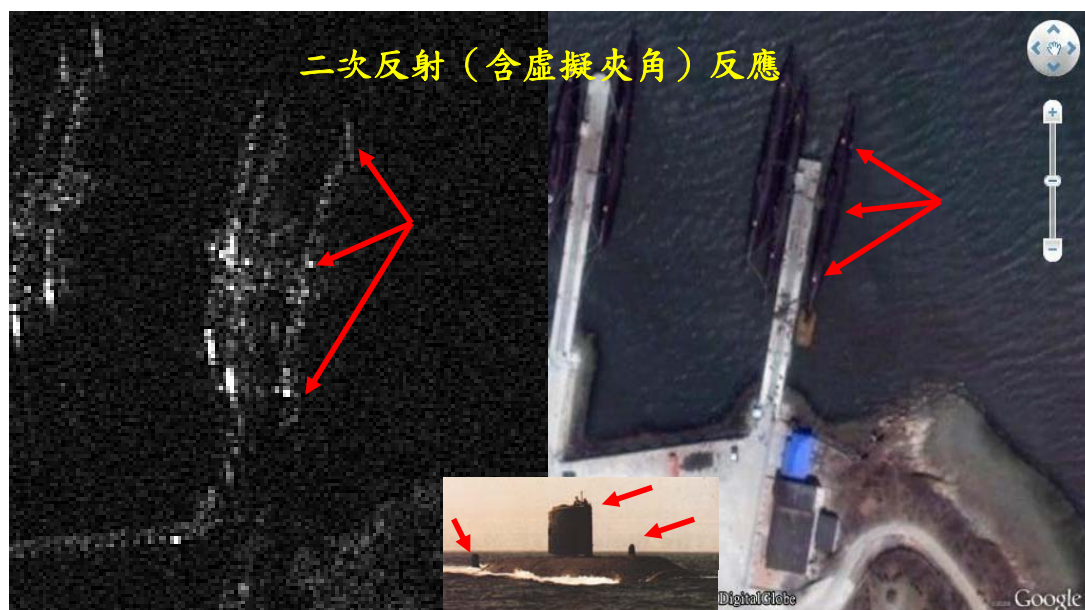
5.海面上的船艦在 SAR 影像上通常會產生較實際物體為長的雷達回波，即前述「虛擬夾角」或「延長範圍迴波 (Extended Range Returns)」，其主要原因多為具有複雜的結構，尤其是作戰艦具複雜的上層結構，當雷達波束進入後會產生大量的繞射，如圖十七 (a)，此外在船舶結構中較高的細桿，會受風或水波的影響而產生振動，在影像中則會呈現失焦 (Defocusing) 現象，如圖十七 (b) 所示。圖十七 (c)、(d) 即為作戰艦複雜的上層結構 (砲塔、飛彈發射筒、雷達等電子設備) 所造成影像失焦及延伸回波的現象。





圖十七 (a) 延伸回波；(b) 因擾動造成的失焦；(c) SAR 影像上的延伸回波實例；(d) 失焦實例(資料來源：TerraSAR-X 衛星影像，作者處理繪製)

6.圖十八為潛艦的雷達影像與光學影像比對圖，通常潛艦表面光滑、外形狹長，且於艦體前、中段及尾部具有凸起特徵，因此在 SAR 影像中可依據雷達波入射方向與潛艦特殊的特徵做有效的判釋。



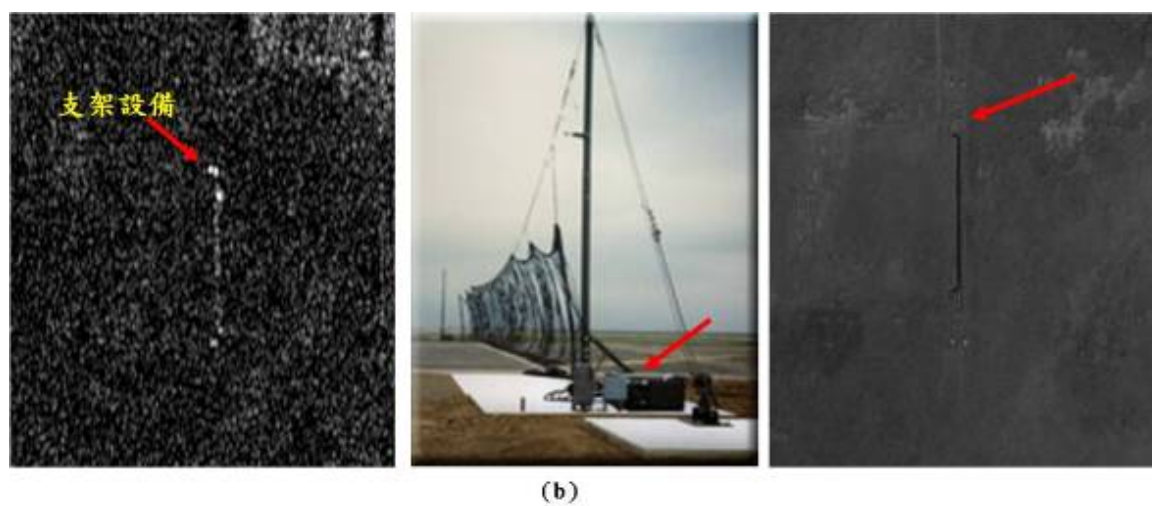
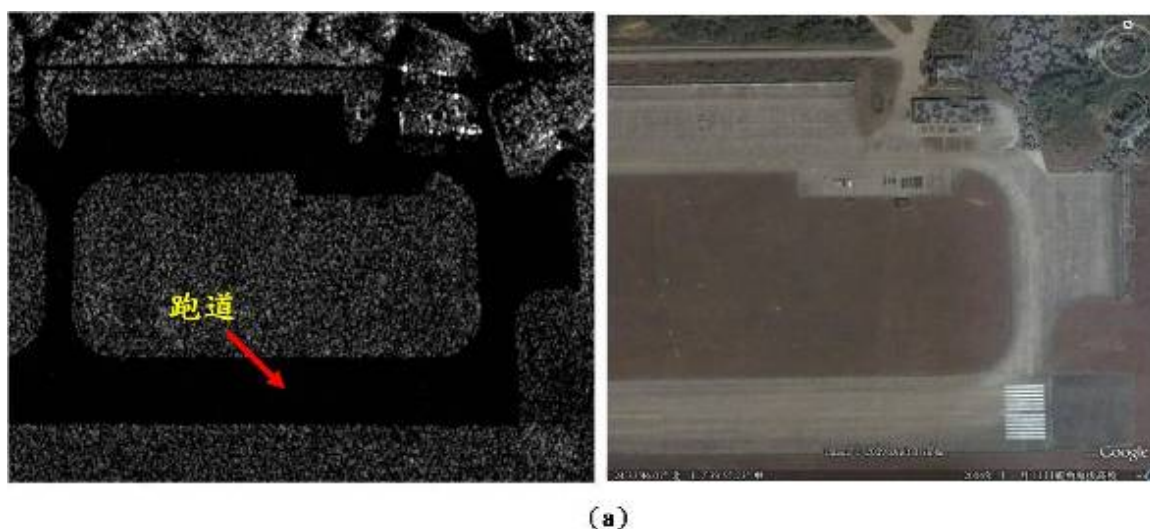
圖十八 潛艦之雷達影像與光學影像比對(資料來源：TerraSAR-X 及 Google Earth 衛星影像，作者處理繪製)

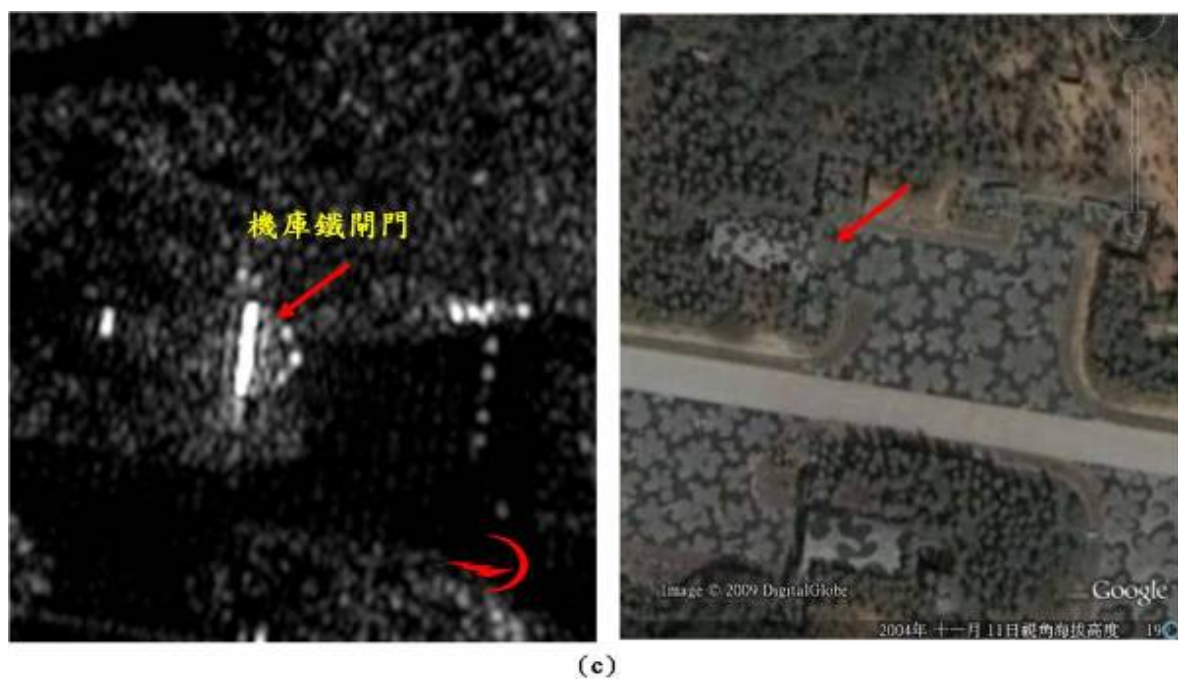
(二) 機場及防空武器判讀

機場性能可由機場型式及其大小來決定，因此機場內應具備塔台、助航設備、飛航管制及機庫等設施，此外機場周邊通常配有防空武力，如防空飛彈、

高砲及雷達等設施，以下說明各設施在 SAR 影像上的成像。

1.由圖十九（a）首先看到的是機場跑道，由於跑道為光滑路面，在雷達波的反應會呈全反射，因此在影像中即呈黑色；圖十九（b）為飛機降落攔截網，網兩端為金屬支架，在影像中成像即有明顯的亮點，屬於二次折射反應。另外圖十九（c）為機庫的雷達影像與光學影像對比；在光學影像中因迷彩偽裝使得目標物不易辨釋，而在雷達影像中若配合適當的入射角拍攝，機庫的鐵質網狀閘門對雷達波會產生二次（或三次）折射反應，在影像中呈現非常明亮的亮點。

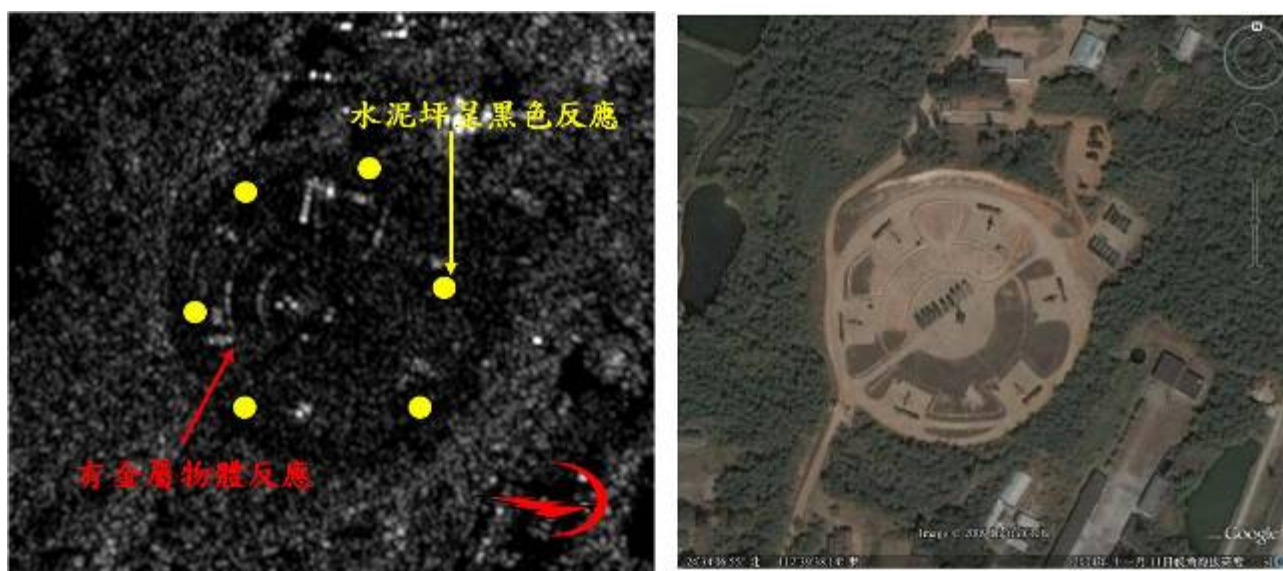




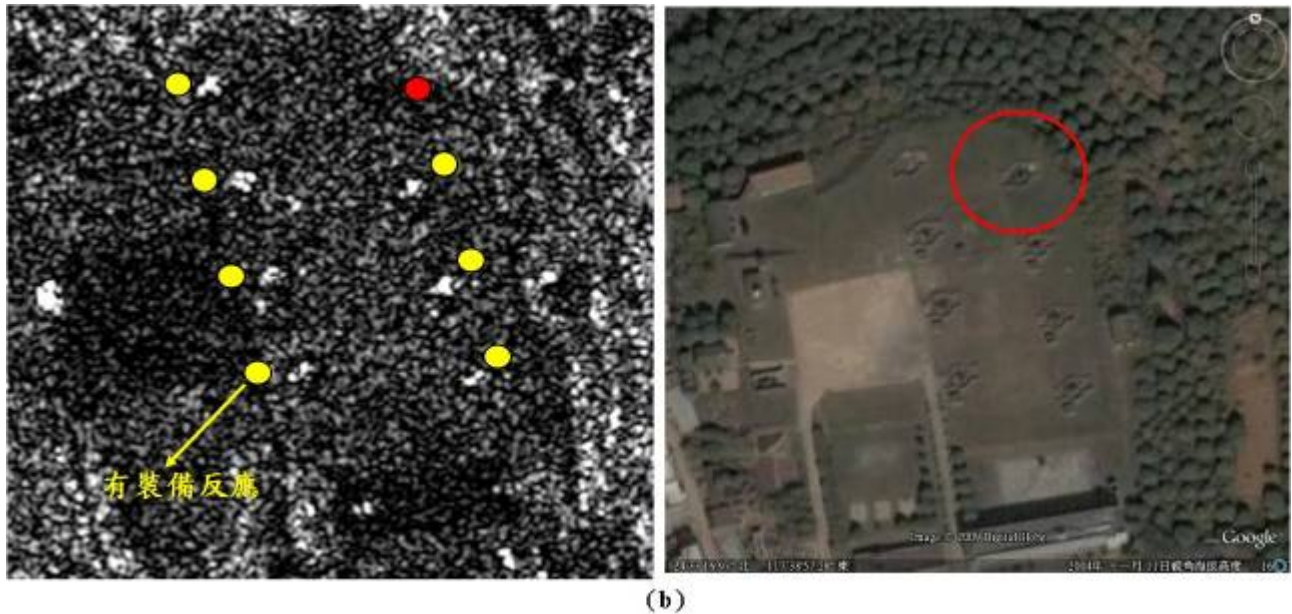
(c)

圖十九 雷達與光學影像對比 (a) 跑道；(b) 攔截網；(c) 抗炸機庫(資料來源：TerraSAR-X及Google Earth衛星影像，作者處理繪製)

2.在機場周邊的防空武器通常設於拓坪地上，我們可利用其平坦地勢與單純的背景進行判讀，圖二十 (a) 為防空飛彈陣地，陣地內有 6 個發射坪，在雷達影像中呈現黑色反應，發射坪上若有裝備停放，則會產生二次折射較亮的反應；在圖二十 (b) 中的高砲陣地，高砲在 SAR 影像上也有二次折射的反應。因此，運用這種特性可輕易的偵測到砲陣地的裝備是否存在，圖二十 (b) 中標示紅點部份，因無亮點呈現，即為未發現高砲部署。



(a)



圖二十 (a)防空陣地之雷達影像與光學影像；(b)高砲陣地之雷達影像與光學影像
(資料來源：TerraSAR-X及Google Earth衛星影像，作者處理繪製)

結論

遙測影像運用層面廣泛，在軍事情報上之運用，可利用光學及雷達影像的高空間解析度與頻譜特性進行軍事情報偵察，其中雷達影像因有不受天候且可日夜間偵照的特性，對重要目標的偵照具有高靈活度，因此對雷達影像的判讀、研析自然成為本軍應建立的能力。本文之研究旨在先導提供運用高解析度 SAR 影像判讀所需的基本知識，如偵照入射角、極化模式與雷達波入射方向等因素對影像成像的影響，以實例解釋如何做妥慎的選擇，才能得到最佳判讀的效果。

在 SAR 影像處理技術上，我們需先對影像進行輻射與幾何校正，且需力求前後期影像品質的統一（如進行影像色調的調整、幾何精度提昇），結合高解析度光學影像進行分析比對，建立大量的基礎軍事設施影像資料庫，方可建立情研人員快速準確的判讀能力。若輔以影像融合技術將光學與雷達影像作融合處理，我們可進一步進行有效的差異分析，提升雷達影像精準的判讀。