

合成孔徑雷達的發展與運用

壹、作者：曹哲維少校

貳、單位：陸軍飛彈砲兵學校飛彈組

參、審查委員：

謝敏華上校

王道順上校

韓邦曦中校

王述敏上校

肆、審查紀錄：

收件：98 年 10 月 08 日

初審：99 年 01 月 05 日

複審：99 年 01 月 13 日

綜審：99 年 02 月 08 日

伍、內容提要：

- 一、戰場狀況瞬息萬變，掌握適時、適切之情報為對敵軍事行動之首要，而對敵照相偵察為情報蒐集最有效手段。反之利用各種天然環境與人為工事、配合暗夜與惡劣天候條件，隱密及掩護部隊（武器）行蹤則為反制照相之必要。傳統光學影像無法有效識別敵人反制措施，因而給了雷達影像發展的契機。
- 二、合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，是一種利用複雜的雷達數據後處理方法來獲得極窄的有效輻射波束，以得到較高的影像解析度，產生高解析度雷達圖像的空載或是衛載雷達。無論是遙感探測或軍事用途，合成孔徑雷達影像皆扮演了重要角色。
- 三、合成孔徑雷達具有全天候、24 小時適用的特點，使其應用與發展足以和傳統光學影像比美。包括中共及世界各國因應合成孔徑雷達影像的特點及用途，除了民生領域研究外，亦逐步開發新的國防用途。如軍事目標的偵蒐與判讀、偽裝識破及與光學影像的融合等，甚至克服傳統飛行載具限制，利用遙控無人載具或衛星執行雷達照相任務等；皆有相當成效深值我方注意。

少校教官 曹哲維

提要

- 一、戰場狀況瞬息萬變，掌握適時、適切之情報為對敵軍事行動之首要，而對敵照相偵察為情報蒐集最有效手段。反之利用各種天然環境與人為工事、配合暗夜與惡劣天候條件，隱密及掩護部隊（武器）行蹤則為反制照相之必要。傳統光學影像無法有效識別敵人反制措施，因而給了雷達影像發展的契機。
- 二、合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)，是一種利用複雜的雷達數據後處理方法來獲得極窄的有效輻射波束，以得到較高的影像解析度，產生高解析度雷達圖像的空載或是衛載雷達。無論是遙感探測或軍事用途，合成孔徑雷達影像皆扮演了重要角色。
- 三、合成孔徑雷達具有全天候、24 小時適用的特點，使其應用與發展足以和傳統光學影像比美。包括中共及世界各國因應合成孔徑雷達影像的特點及用途，除了民生領域研究外，亦逐步開發新的國防用途。如軍事目標的偵蒐與判讀、偽裝識破及與光學影像的融合等，甚至克服傳統飛行載具限制，利用遙控無人載具或衛星執行雷達照相任務等；皆有相當成效深值我方注意。

壹、前言

雷達是用於檢測和定位反射物體，如飛機、船艦、車輛、行人和自然環境的一種電磁系統，藉由將電磁能量輻射到空間並探測物體或目標反射的回波訊號來工作。返回到雷達的反射能量不僅表明目標的存在，透過回波信號與發射信號的比較，可以確定目標位置或獲取其他相關信息。

自從發明雷達以來，人類一直希望在雷達螢幕上看到的是目標真實的圖像而不是一個亮點或是一個脈衝訊號，為了將雷達的功用發揮至極致，人們一直努力尋求提高解析度的方法。成像雷達拓展了人們對雷達原始的概念，雷達不再侷限於提供目標的方位、距離及速度，而能對目標進行成像和識別，使人們真的可以在螢幕上看到目標的圖像，實現人類最初的願望；並在微波遙感應用方面表現出越來越大的潛力，為人類提供更多有用的訊息¹。

雷達可以在光學及紅外線感測器不能穿透的條件下完成任務，可以在黑夜、雲霧、雨天、下雪時工作，高精度測距及全天候的工作能力為其重要特性之一²，從表一可發現微波影像較光學影像更具實用價值，因此微波影像已成功應用於地面、艦載、機載方面，執行著各式的軍事及民用任務；運用空間從地面發展到太空，近年來更朝向資源探勘、地下結構窺探、地面（水下）危險物品偵察及遙感測繪。

1 劉永坦等著，《雷達成像技術》（哈爾濱：哈爾濱工業大學出版社，1999 年 10 月），頁 1。

2 左群聲等譯，《雷達系統導論第三版》（北京：電子工業出版社，2007 年 4 月），頁 1。

類別	優點	缺點
光學影像	● 影像判讀容易。 ● 高解析度。	● 穿透性差，僅能在天候晴朗的白晝執行任務。
微波影像	● 不受雲霧影響，可全天候執行任務。 ● 微波對建築物、金屬體等有較強回波，可幫助對目標物之辨識。 ● 部分頻段穿透力佳，可觀測偽裝、掩蔽及埋藏於地下的物體或是水下目標。	● 微波影像與肉眼所見不同，影像鑑別及後續處理較光學複雜。

表 1、光學影像與微波影像的比較

貳、雷達基本原理

雷達是英文 Radar 的譯音，源於 Radio detection and ranging 的縮寫，原意是“無線電探測和測距”，即用無線電發現目標並測量他們在空間中的位置³。具體的運作方式是透過輻射電磁能量並檢測反射體（目標）的回波來獲得目標的相關訊息；藉由測量輻射能量傳播到目標並返回的時間可以得到目標的距離；方位則透過窄波束方向性天線測量回波信號的到達角來確定⁴。

一、目標距離的量測：雷達工作時，發射機經天線向空間發射一串重複週期一定的高頻脈波，如果在電磁波傳播的途徑上有目標存在，接收機便可以收到由目標反射回來的回波。由於電磁波是以光速在空間中傳播，假設雷達至目標的單程距離為R，電磁波往返雷達與目標間的時間間隔為T，則

$$R = \frac{CT}{2},$$

(1)

C為光速， $C=3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。當雷達發射一脈波，經過1ms後收到目標反射回來的回波，則此目標與雷達間距離為 $R=(3 \times 10^8 \times 10^{-3})/2=150\text{KM}$ 。

二、目標角度的量測：雷達天線將電磁波的能量匯集在窄波束內，當天線波束軸對準目標時，回波信號最強；當天線波束軸偏離目標時回波信號減弱，根據接收回波最強時天線波束的指向，即可確定目標的方向。

3 丁鷺飛、耿富祿編著，《雷達原理》（陝西：西安電子科技大學出版社，2004年1月），頁2-4。

4 王軍等譯，《雷達手冊》（北京：電子工業出版社，2006年1月），頁9-10。

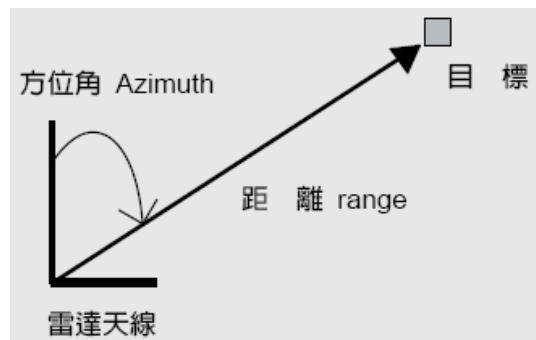


圖 1、雷達運作示意圖

資料來源：林喆，《國研科技第四期》，國家太空計畫室

三、相對速度的量測：有些雷達除確定目標位置外，還需測定運動目標的相對速度，以作為目標未來軌跡預測的參考依據。當目標與雷達之間存在相對速度時，雷達接收到回波信號的載頻相對於發射信號的載頻產生一頻率偏移量，此一現象稱為都卜勒頻移（ f_D ）。

$$f_D = \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (2)$$

f_D 單位為Hz， V_r 為雷達與目標之間的徑向速度，單位為m/s， λ 為載波波長，單位為m。當目標向雷達運動時， $V_r > 0$ ，回波載頻提高，反之 $V_r < 0$ ，回波載頻降低。都卜勒頻移廣泛運用於雷達中，是將運動目標從自然環境中，如陸地、海面、或雨反射回來的固定雜波回波中分離的基礎。

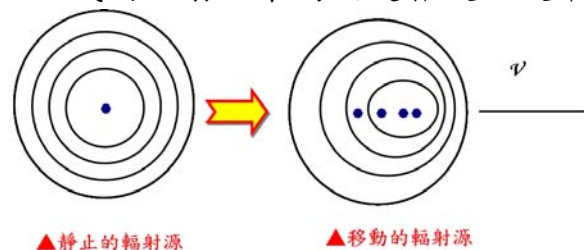


圖 2、都卜勒原理示意圖

資料來源：曹哲維，《雷達原理簡介》，陸軍砲兵學校飛彈組講義

四、目標尺寸和形狀：目標的形狀和尺寸對目標類型的判斷是相當重要的指標。在實際目標獲得過程中，傳統微波雷達需搭配敵我識別系統的使用，依據雷達及目標的詢問及答詢狀況，判斷目標身份，但只能分辨出友機及不明機，資訊略顯不足；特別是在反彈道飛彈系統的偵測過程中，真彈頭常混雜在假彈頭或是誘餌之中，以消耗敵軍彈藥甚至造成反制不及，達到攻擊目的。當雷達探測到目標後，如果量測的結果有足夠的分辨力，即可得到目標尺寸和形狀等信息⁵，有助於目標的分類及識別。因此，反制的一方必須提高偵測系統的解析能力，才能在多個目標（彈頭）之中，識別高

5 丁驚飛、耿富祿編著，《雷達原理》（陝西：西安電子科技大學出版社，2004年1月），頁4。

優先的目標（真彈頭）。

對一目標的偵測、辨別、確認及判讀意味著不同層次的解析度要求，以M-60坦克為例，偵測表示能偵測目標存在與否？辨別表示能分辨目標物種類（如載具或建物）；確認表示能確認目標物類型（如坦克或車輛）；判讀表示能識別目標物之型號（確認目標為M-60戰車）。下表列舉數種目標在偵測、辨別、確認、判讀的解析需求。

目標	偵測	辨別	確認	判讀
道路	9	6	1.8	0.6
橋樑	6	4.5	1.5	0.9
中型船艦	7.5	4.5	0.6	0.3
行進中部隊	6	2.1	1.2	0.3
機場	6	2.1	1.2	0.3
港口	4.5	1.5	0.9	0.15
飛機	4.5	1.5	0.9	0.15
車輛	1.5	0.6	0.3	0.05

單位：米（M）

表 2、目標解析度要求

資料來源：中科院，合成孔徑雷達（SAR）系統之發展與應用

參、合成孔徑雷達的原理

合成孔徑雷達（Synthetic Aperture Radar，SAR），是一種可以產生高解析度雷達圖像的空載雷達或衛載雷達。合成孔徑雷達使用複雜的雷達數據後處理方法來獲得極窄的有效輻射波束，來獲取較高的影像解析度，雷達影像由斜距(range)和方位(azimuth)所組成，典型的合成孔徑雷達，天線在載具的側邊，一邊飛行一邊發射高功率的方形脈衝波，利用發射到目標的反射時間與能量，得到斜距地面位置與其目標的背向散射強度，進而得到合成孔徑雷達影像的斜距項。而影像的方位項為利用載具移動與目標的相對都卜勒(Doppler effect)效應得到⁶。

對於遙測而言，需要的是二維的影像，亦即目標物不是一個點，而是一個面。以圖3為例，飛機上的SAR感測器需要感測地面上如同棋格般的二維目標，每一格子可視為一點目標。X軸向是雷達平台的運動航跡，X軸向的解析度（ Δx ）又稱為距離解析度，另一像元是方位，亦即圖中的Y軸向，Y軸向的解析度（ Δy ）又稱為方位解析度。

6 簡誌宏，《C波段可調式都卜勒頻移主動雷達校正器研製與性能評估》（中壢：國立中央大學太空科學研究所碩士論文，2007年6月），頁7。

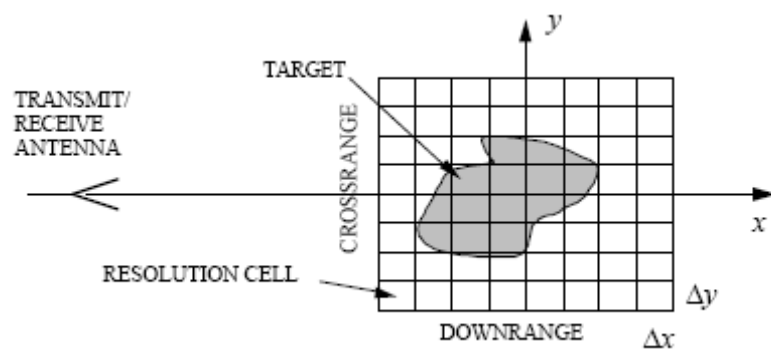


圖 3、雷達解析能力示意圖

資料來源：David Jenn，Naval Postgraduate School

距離解析度（或稱為距離分辨力）定義為第一個目標回波脈衝的後緣與第二個目標的回波脈衝的前緣相接近以致不能區分為兩個目標時，此一極限間距稱為距離分辨力⁷。雷達測距的精度和分辨力與雷達脈波寬有關，脈波越短，性能越好；

$$\text{距離分辨力}(\Delta R)_{\min} = \frac{C\tau}{2},$$

(3)

C 為電磁波傳播速度， τ 為脈衝寬度；為確保脈衝波形的完整，在設計雷達時通常要求

$$\tau \geq QT_{hf}, \quad (4)$$

$$T_{hf} = \frac{\lambda}{C}, \quad (5)$$

T_{hf} 為高頻震盪週期， Q 為高頻震盪迴路品質因素， λ 為波長。

而方位的分辨力與天線波束寬度 θ 有關：

$$\text{天線波束寬度} \theta = \eta \frac{\lambda}{D}, \quad (6)$$

$$\text{方位分辨力} \delta_x = \theta R = \eta \frac{\lambda}{D} R, \quad (7)$$

η 為與天線口徑場分佈有關的係數， D 為天線口徑寬度。

由公式(3)至公式(5)可知， λ 越短， T_{hf} 越小， τ 可以越短，因此可以得到較高的距離分辨力；公式(6)至公式(7)則可看出波長 λ 越短，則波束寬度 θ 越小，方位的分辨力也可獲得提高。因此選用波長 λ 較短的雷達系統似乎可以同步解決距離與方位分辨力的問題，但實際狀況並非如此。波長的選擇與雷達用途有密切關係，當目標尺寸遠大於波長時，目標對電磁波以散射為主，繞射為輔，目標有效散射面積大；當目標尺寸遠小於波長時，目標對電磁波以繞射為主，散射為輔，目標有效散射面積小。雷達探測目標時常伴隨著雲、雨、地

⁷ 向敬成、張明友編著，《雷達系統》(台北，五南圖書出版股份有限公司，2004 年 7 月)，頁 9。

物、海浪等雜訊的干擾，為了從雜波中辨識目標，必須使接收機的訊噪比（SNR）越大越好；在目標（假設為飛機）與雲、雨混雜情況下，由於目標的尺寸遠大於水滴，波長較大的設計可以提高訊雜比；當目標以建築物、山巒為背景時，目標的尺寸遠小於雜訊的尺寸，依據目標反射特性，應採用較小的波長以獲得較佳訊噪比（SNR），但實驗證明，波長太短將會出現相反效果⁸，所以透過縮短波長以提高距離及方位解析度的成效有限。

為解決此一問題，50 年代初期美國一些科學家提出利用目標與雷達相對運動所產生的都卜勒頻移現象來提高分辨力；亦即運動中的小型線陣天線可以得到等同大尺寸天線的分辨力的想法。1951 年美國固特異公司(Goodyear Aerospace Co)的威利(Carl Wiley)首先提出可以利用頻率分析方法改變雷達的角解析度，1960 年第一部運用這種技術的雷達面世；但是直到 70 年代，拜數位處理技術及影像處理技術的快速發展，先進的聯合目標偵察攻擊雷達系統(Joint Surveillance Target Attack Radar;J-STARS)才有真正實用的價值^{9、10}。



圖 4、USAF E-8C Joint STARS

資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/E-8_Joint_STARS#Radar_and_systems

從公式(2)可以瞭解有相對運動關係的兩物體間都卜勒頻移和速度及波長的關係。威利(Carl Wiley)則進一步發現，相對於運動雷達軌跡的角度稍有不同的兩個目標，相對於平台具有不同逕向速度，因此兩個目標所反射的雷達脈波將具有兩個單獨的都卜勒頻移¹¹。圖4中，當雷達以 V 的速度移動並以 ϕ 的角

8 向敬成、張明友編著，《雷達系統》（台北，五南圖書出版股份有限公司，2004 年 7 月），頁 15-16。

9 沙濤，〈合成孔徑雷達簡介〉《新新雙月刊》（桃園），第 22 卷第 5 期，中山科學研究院，民國 83 年 9 月，頁 137。

10 劉永坦等著，《雷達成像技術》（哈爾濱：哈爾濱工業大學出版社，1999 年 10 月），頁 7-8。

11 韓傳劍等譯，《合成孔徑雷達—系統與信號處理》（北京：電子工業出版社，2006 年 12 月），第 6 頁，共 12 頁

度側視目標A；雷達相對目標A的徑向速度 $V_r = V \sin \phi$ ， f_0 為雷達載波頻率，雷達波長 λ 可表示為 $\frac{C}{f_0}$ ，因此A點的都卜勒頻移為

$$f_D = \frac{2(V \sin \phi)}{C} f_0 \quad (8)$$

如果 θ_1 角度很小（0.2 度），且 $\phi \leq \frac{1}{2}\theta_1$ ，則

$$\sin \phi \approx \phi \approx \frac{x}{R}, f_D = \frac{2V}{C} \times \frac{x}{R} f_0 \quad (9)$$

目標 B 與目標 A 相距 Δx ，兩者都卜勒頻移的差異為

$$\Delta f_D = \left(\frac{2V}{C}\right) \times \left(\frac{f_0}{R}\right) \Delta x \quad (10)$$

從公式(10)可知目標分辨力與頻率測量的分辨力有關

$$\Delta x(\min) = \left(\frac{C}{2V}\right) \times \left(\frac{R}{f_0}\right) \Delta f_D \quad (11)$$

頻率測量的分辨力（ $\Delta f_D(\min)$ ）是被分析波形的時間間隔 S 的倒數，因為這個時間是被觀測目標出現在雷達觀測區域內的時間（或是目標滯留在波束中的持續時間）。所以

$$S = \frac{R\theta_1}{V} = \left(\frac{R}{V}\right) \times \left(\frac{\lambda}{L_a}\right) \quad (L_a \text{ 為天線長度}) \quad (12)$$

$$\Delta f_D(\min) = \frac{1}{S} = \left(\frac{V}{R}\right) \times \left(\frac{L_a}{\lambda}\right) \quad (13)$$

將公式(13)帶入公式(11)，得到雷達角分辨力。

$$\Delta x(\min) = \left(\frac{C}{2V}\right) \times \left(\frac{R}{f_0}\right) \times \left(\frac{V}{R}\right) \times \left(\frac{L_a}{\lambda}\right) = \frac{1}{2} L_a \quad (14)$$

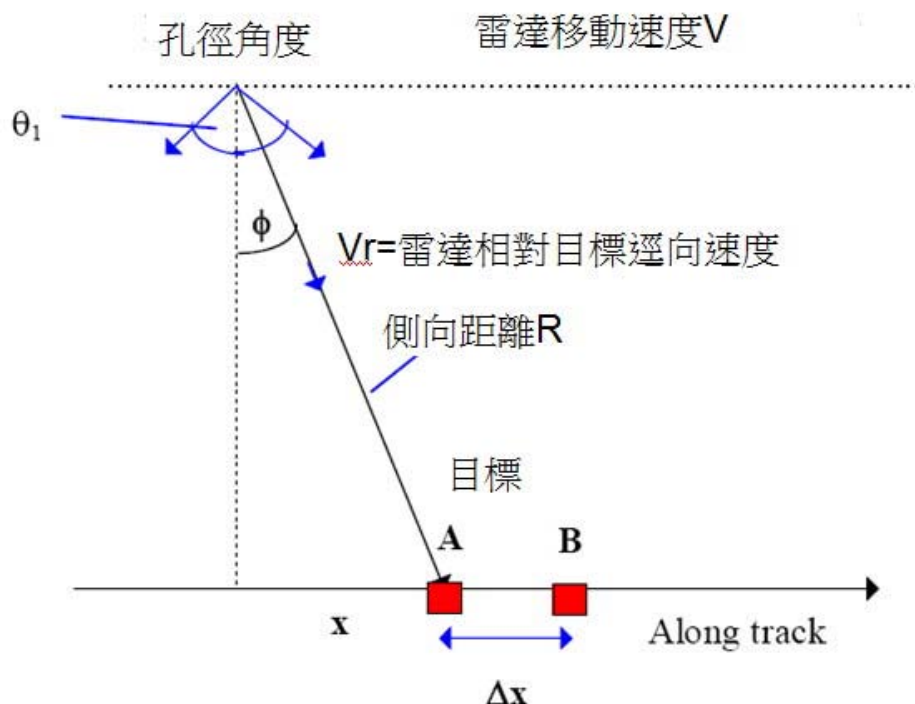


圖 5、合成孔徑雷達基本原理

資料來源：作者自繪

SAR 在理論上可能非常容易，但在實際應用中，飛機平臺往往會反復的、隨機的偏離正常的直線和平面飛行路徑，其結果是圖像出現了散焦。目前用於恢復圖像質量的技術包括：(1)運動補償方法：它使用慣性和導航感測器來測量真實天線的運動，這種方法在測量高頻運動時效果最佳。(2)自動聚焦：它通過資料的重複處理來產生具有最大對比度的圖像，這種方法在測量低頻運動時效果最佳。雖然再聚焦使圖像出現幾何失真，但自動聚焦過程能夠有效地測量產生這種失真的交叉航跡方向上的偏移，從而實現修正。

另外，由公式(14)我們可能推論「使用最小的天線長度，可以得到最佳的解析度」。然而實際上，使用的天線長度越小，回收雷達訊號的「都普勒相位差(Doppler shift)」越大，回收雷達訊號被扭曲的情形越明顯¹²。為了使都卜勒頻率與相位差增量變化關係不至於模糊，都卜勒信號頻率帶寬(B_D)必須小於脈波重複率(PRF)，雷達平台移動間隔為天線長度一半時，必須至少發射一個脈波¹³，如此合成孔徑雷達的解析度又會受到載台移動速度及波長的限制。因此我們可將一排同平面的平行天線(如圖 5 所示)，各天線的相位角產生互補，可以得到所有天線產生的共同效應，如同單一天線。發射波能量是對準某一個特定方向，因此相位陣列式天線可以利用控制各天線的相位角關係，達到控制發射電波方向的目的。SAR 雷達使用相位陣列式的天線，天線的基座或是衛星不需要轉動，就可以掃描特定目標，達到移動中仍能快速對同一目標重複掃描

12 林喆，〈合成孔徑雷達衛星系統設計之探討〉《國研科技》(新竹)，第四期，國家太空計畫室，民國 93 年 10 月，頁 45。

13 韓傳劍等譯，《合成孔徑雷達—系統與信號處理》(北京：電子工業出版社，2006 年 12 月)，頁 14。

的效果，以達到前述解析度關係式的要求。

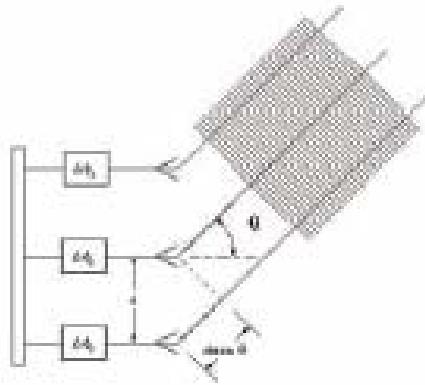


圖 6、相位陣列式天線合成孔徑雷達
資料來源：林喆，國家太空計畫室

肆、合成孔徑雷達的運用

合成孔徑雷達依據載台型式可概分為衛載、有人機載及無人機載三類，優缺點及性能如下：

- 一、衛載合成孔徑雷達—具有載具速度快、視野遼闊，偵照效率高，偵照範圍不受地理條件和國界的限制的優點；缺點是解析度較低，軌道固定易受反制。未來衛星朝小型化及星座化，雷達則致力於提高解析度發展。

雷達名稱	國家	升空時間	頻段	最佳解析度 (M)	衛星總重 (KG)	高度 (KM)
ERS-1	歐盟	1991	C	25	2500	853
JERS-1	日本	1992	L	18	1400	568
RadarSat-1	加拿大	1996	C	10	2750	798
ERS-2	歐盟	1995	C	25	2516	853
ENVISAT	歐盟	2002	C	25	2145	853
SAR-Lupe	德/法	2006	X	1	770	500
TerraSAR-X	德國	2007	X	1	1200	514

- 二、有人機載合成孔徑雷達—無固定運作軌道，較難反制，缺點是偵照範圍受限。未來有發展朝向無人機載或結合戰場指揮管制任務發展趨勢。

雷達名稱	載具/任務	國家	年代	頻段	最佳解析度 (M)	偵測距離 (KM)
ASARS-1	SR-71/偵察機	美國	1966	X	3	185
APY-3	E-8/戰場監視	美國	1997	X	3.7	250
APS-137B	P-3C/反潛機	美國	1998	X	0.3	200
ASTOR	Sentinel/預警機	英國	2007	X	0.3	250
APY-7	E-10A/指揮管制	美國	2011	X	0.3	300

三、無人機載合成孔徑雷達—無固定運作軌道、反制困難、機動性強，便於戰術運用，缺點是偵照範圍受限。未來雷達朝小型化、高解析度發展，平台則朝高空層、長滯空發展。

雷達名稱	載具/任務	國家	年代	頻段	最佳解析度 (M)	偵測距離 (KM)
MSAR	Pioneer	美國	1992	Ku	1.5	10
TESAR/ZPQ-1	Predator B/MQ-1	美國	1996	Ku	0.3	10.8
Lynx/APY-8	Predator A/RQ-1	美國	1998	Ku	0.3	30
Global Hawk	RQ-4	美國	2002	X	0.3	200
TUAU	TUAU/Shadow 200	美國	2004	Ku	0.3	12

合成孔徑雷達因具有遠距離全天候偵測能力、極高的分辨能力及穿透性的觀察視場，因此在科學研究及軍事偵察的運用逐漸普及，運用領域如下：

一、在地形測繪與地質研究的運用：地球上有很多地區屬於氣候惡劣、地形複雜及交通不便，使得人們對這類地區的真實地理和地質一無所知。合成孔徑雷達可以從雷達圖像中分辨出山區、水域、高原的覆蓋面積，甚至可以繪出高度、坡度和精確的定位等地理參數¹⁴；或是將合成孔徑雷達所截取的影像資料，經過差分干涉法處理，獲取高品質地表資訊。例如 1992 年美國加州 Landers 大地震，以及 1999 年土耳其大地震，這兩次大地震帶來的地表變形，都被科學家利用合成孔徑雷達差分干涉技術精密地測量出來。台灣中部地區在集集大地震前後利用相同的測量技術觀察到地震前後的地表變形，每一圈干涉環代表 2.8 公分的距離變化，經由計算干涉環的數目，可以推估出地震區域前後大致的相對位移量

¹⁵。

14 劉永坦等著，《雷達成像技術》（哈爾濱：哈爾濱工業大學出版社，1999 年 10 月），頁 13-14。

15 張中白，〈衛星雷達—從空中診斷大地〉（台南，國立成功大學，2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會，2004 年 10 月），頁 104-108。

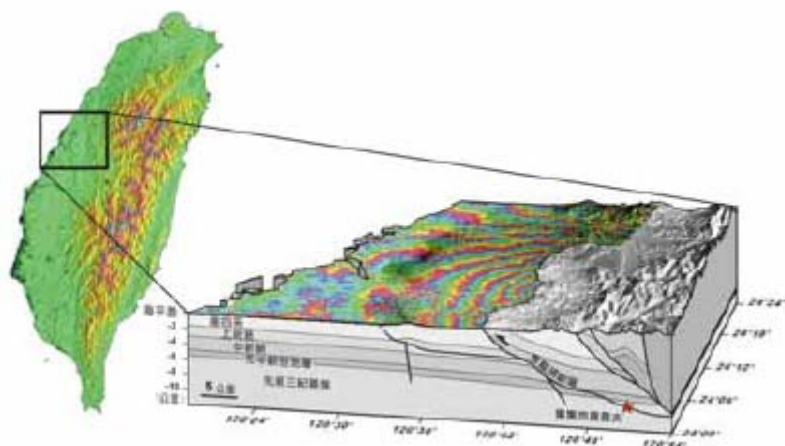


圖 7、集集大地震後地表變動

資料來源：張中白，國立中央大學及遙測研究中心

- 二、在農林業的運用：不同植物或相同植物但不同生長期對不同雷達工作頻率具有不同散射係數，因此合成孔徑雷達可用於土地利用調查、土壤水分量測、農作物產量估計及農作物或樹木長期監測等。中國自 80 年代以來經濟發展迅速，都市建設和工業用地不斷成長，相對地耕地面積不斷減少，如何精確掌握農作物生長狀況及其產量等信息變得非常重要。在 863 計畫 308 主題支持之下，以衛載合成孔徑雷達對中國南部水稻生長趨勢與土地使用類型進行調查研究，研究成果並運用於日本、印度、韓國、越南等水稻生產國的統計調查中。隨著全球人口的增加，森林資源不斷減少，因而準確、實時地獲取全球森林變化的信息顯得尤其重要。合成孔徑雷達可用於監測森林類型、密度、年齡、生長狀況、森林災害及森林砍伐的監視¹⁶。
- 三、海洋研究和監測的運用：海洋覆蓋了地球表面三分之二的面積，對氣候及生態環境的影響極大，研究海洋、監測海洋受污染程度以便保護和開發海洋資源；監測冰山的狀況可以掌握海洋吸收和釋放熱量的情形，有助於氣候變遷的研究，透過衛載合成孔徑雷達定期、週期性的收集相關參數，可以提供準確的訊息。量測淺海水下地形對石油探勘與開採、海底油氣管路和通信電纜的埋設、海上運輸和軍事活動均有重要意義。因此自美國 1978 年發射 SEASAT 衛星後，衛載合成孔徑雷達成為海洋資源的新技術。
- 四、軍事領域的運用：由於合成孔徑雷達的運作方式是發射電磁波和接收目標的電磁回波，利用其載頻之都卜勒頻移可有效偵測移動中的目標，對動態軍事目標和軍事活動實施偵察、跟蹤和監視。電磁波對水面有一定程度的穿透力，因此對水面艦艇和水下潛艦的航向、路徑、波紋等亦有一定的偵控能力，如在淺海地區平均水深 30 公尺的潛艦活動可謂一覽

註16 魏鍾銓著，《合成孔徑雷達衛星》（北京：科學出版社，2001 年 9 月），頁 252-253。

無遺。水下 10 至 30 公尺的深度正是潛艦發射魚雷、巡弋飛彈、換氣及實施通信的最佳潛望鏡深度。而此一深度也正是水面與水下冷熱溫差較明顯的區域，因此潛艦在此一深度潛航對水流、鹽份、水溫都會造成特殊的波紋和微磁場的變化。美國的「白雲」(White Cloud) 海洋監視衛星既可利用衛星上的寬頻接收機偵收海上艦船發出的各種雷達波和通信頻率，也可以利用紅外和毫米波輻射探測儀跟蹤低空飛行物如巡弋飛彈，或利用合成孔徑雷達探測水下潛艦的航向、深度和速度所造成的不同波紋¹⁷。在波灣戰爭中，聯軍使用先進的聯合目標偵察攻擊雷達系統(J-STARS)，戰機的合成孔徑雷達每 35 秒鐘能夠搜索 160 公里×180 公里的面積，大約一個軍團的活動範圍，並能偵測雷達截面積(RCS)10 平方公尺的活動目標(一般戰車的 RCS 約 50 平方公尺)，後續量產的型式還能透過都卜勒的迴跡區分為履帶車或輪型車輛¹⁸。為了提供比衛星更為即時情資，同時降低偵察機深入敵境進行情蒐的危險，無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)成為不可或缺的利器，為配合無人飛行載具的發展與情搜能力的提升，各國對小型合成孔徑雷達的發展亦不遺餘力。德國歐洲國防航太公司(European Aeronautic, Defense and Space Company, EADS)製造重 3.95 公斤，35GHz 的小型合成孔徑雷達(MiSAR)具有 500*500 公釐的解析度，影像寬度為 1 至 2 公里，長度為 2 至 4 公里。中科院雖有無人飛行載具的研發，但因合成孔徑雷達技術尚未成熟，酬載仍以傳統光學儀器為主，如能搭配小型合成孔徑雷達，必能提升整體效能。

陸、結論

合成孔徑雷達具有大範圍搜索及全天候操作的優點，是評估全球軍力動態與環境監測不可或缺的利器，而低頻段的 SAR 更具有穿透地表的能力，可用於地下掩埋物體或礦物之探勘。中共 1970 年代起即著手合成孔徑雷達之研製，1980 年代研發成功機載合成孔徑雷達，解析度約 3 米。1995 年起積極投入衛載合成孔徑雷達之開發，置重點於水患、地震之救災及對台海全天候監控。2006 年 4 月發射第一枚合成孔徑雷達衛星--遙感 1 號，2007 年 5 月發射第二枚合成孔徑雷達衛星--遙感 2 號，2007 年 7 月發射第三枚合成孔徑雷達衛星--遙感 3 號，2010 年規劃以 6 枚光學衛星及 5 枚合成孔徑雷達衛星形成小型衛星星座，縮短重訪時間至 12 小時。

大陸東南沿海一帶，終年為多雲、多霧與多雨的氣候，單靠光學遙感器無法滿足及時的偵照需求。合成孔徑雷達應用廣泛，具軍民兩用特性，可同時滿足戰時情蒐及平時救災之國防與民生需求，我國應結合產官學研能量積極投入開發，以建立自主國防能量。

註17 廖文中，〈台灣發展衛星 SAR 雷達對防空和反潛作戰的重要性〉《全球防衛雜誌》(台北)，第 279 期，軍事家，2007 年 11 月，頁 142。

註18 沙濤，〈合成孔徑雷達簡介〉《新新雙月刊》(桃園)，第 22 卷第五期，中山科學研究院，民國 83 年 9 月，頁 137。