

# 新一代的氣象雷達—多功能相位陣列雷達簡介

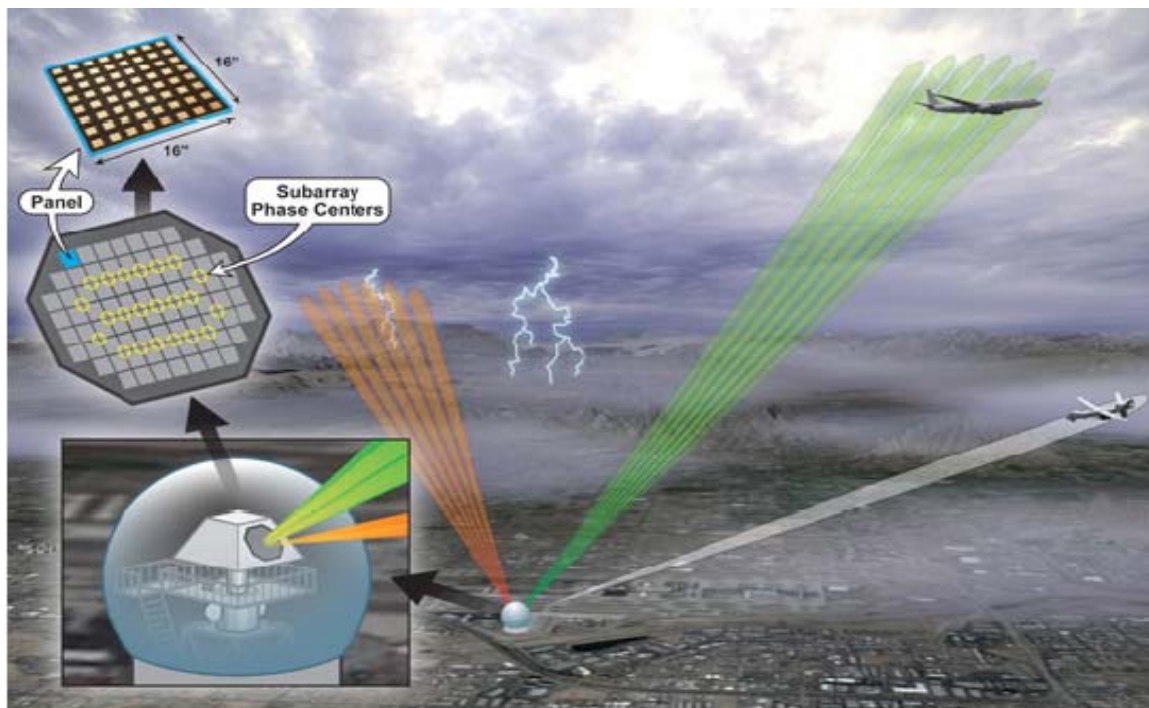
周鴻祺<sup>1</sup>

## 1. 前言

天氣系統內部詳細的降水與風場結構特徵主要由都卜勒氣象雷達觀測網所獲得，目前美國正使用中之氣象雷達以 WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler) 為主，針對主要機場則另有特殊功能的 TDWR (Terminal Doppler Weather Radar)，而航空管制雷達則以 ASR (Airport Surveillance Radar，如 ASR-9、ASR11) 為主，這些使用中的天氣和飛機監控雷達網有所不同，使用年份從 10 年到超過 40 年，許多雷達均已老舊或將達到其使用期限，持續的維護與升級雖可維持在近期到中期的正常運作，但勢必負出昂貴的維護代價。美國聯邦航空管理局 (Federal Aviation Administration, FAA) 預期至 2025 年航空交通量將較目前增加 1 倍，如此將使空中交通延遲的問題加劇，而造成空中交通延遲的原因中，惡劣天氣就佔了 65%。因此美國成立一個多單位平臺，包括國家氣象局 (National Weather Service, NWS)、FAA、國防部 (Department of Defense, DoD) 及國土安全部 (Homeland Security : DHS) 等機構，規畫以新的雷達系統取代現有的傳統機械式旋轉雷達，新雷達網的主要任務是進行惡劣天氣的監測、空中交通管制 (Air Traffic Control, ATC) 及國土防空監視等任務。FAA 透過研究發展增強氣象的觀測與預報，結合所有的決策支持工具，並制定一個全功能系統以減少天氣的影響，以提高空域的容量和效率，同時提高空中交通的安全性。

---

<sup>1</sup> 飛航服務總臺 臺北航空氣象中心



The illustration shows how the multifunction phased-array radar panel provides a solution for simultaneous aircraft surveillance and weather sensing.

圖 1 多功能相位陣列雷達 (MPAR) 陣面如何提供可同時對飛機監控與天氣遙測的解決方案。每個 MPAR 陣面具有 64 個天線元件，每個元件皆有一個獨立的發射/接收 (T/R) 模組，放大雷達訊號且控制相關的其它元件的相位。64 個 T/R 模組安裝在孔徑基板的背面。(參考文獻 1)

## 2. 多功能相位陣列雷達 (Multi-Function Phase Array Radar, MPAR)

美國於 2006 年開始計畫研制新一代雷達系統，此新雷達系統即為具有多功能的相位陣列雷達 (Multifunction-PAR, MPAR)，新一代雷達網將包括天氣與航管的監控需求(如圖 1)，圖 2 為多功能相位陣列雷達的工作示意圖，. 它能一次發射多個雷達波束，同時完成多項任務，如監控行星邊界層 (約 2 公里高度) 的背景風場、 監控積雲、監控超大胞風暴 (Supercell)、較長時間的高解析度掃瞄以偵測潛在的龍捲風、掃瞄精確的山脈輪廓以避免地表雜波、 確定傳播條件及偵測和追蹤飛機，包括非協定飛機。此項計

劃預計於 2014 年取代傳統終端雷達(ASR8、ASR9)，於 2018 年取代風切系統及 NEXRAD(補充全名)，到 2020 年完成初步的作業能力。

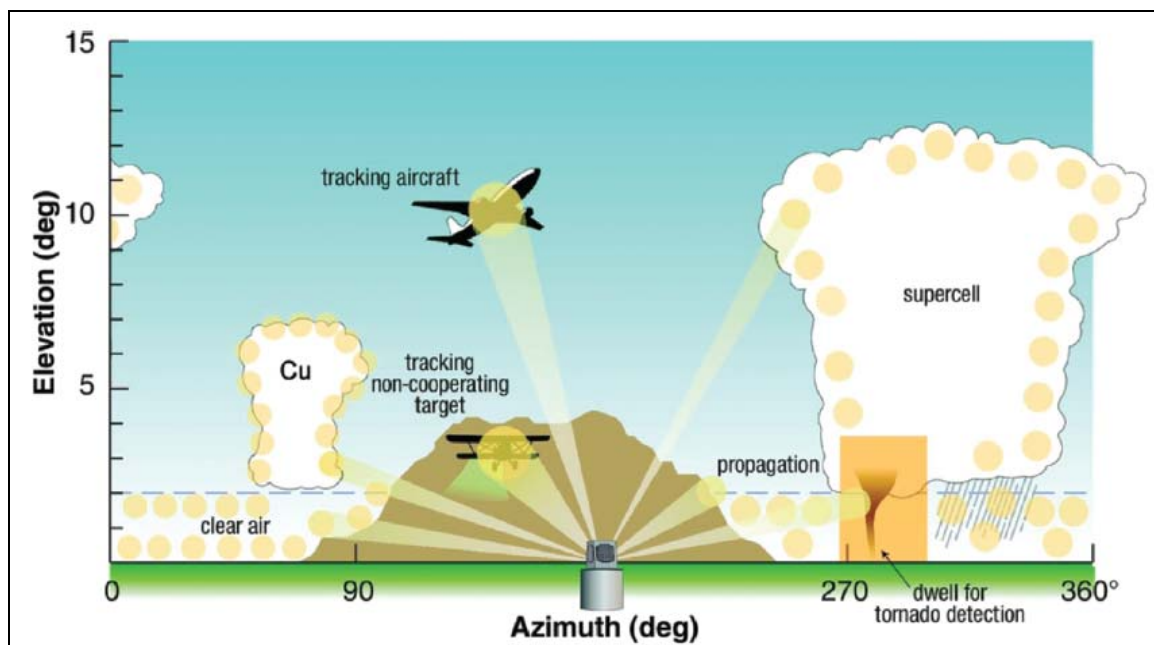


圖 2 多功能相位陣列雷達的工作示意圖。(Zrnica et al. (2007))

相位陣列雷達(PAR)其實指的就是雷達天線控制發射波束(及接收回訊)方向的方式和傳統用機械的方式不同。Phase Array 中文翻譯是相位陣列，關鍵在“Phase”是指的是發射/接收(T/R)之雷達電磁波的相位。這種天線通常可以是固定的，我們可以把這種天線當做「由許多個一模一樣的雷達天線所排成的陣列」，它利用控制相鄰(幾個)天線間(發射/接收波)的相位差去操控由若干個天線所「合成的整體」電磁波的方向，而不是用機械旋轉帶動天線的發射/接收方向。其實，人的雙眼就有相位陣列的味道，左右眼就如兩個不同的接收“天線”，收(看)到由同一物體所反射同一光源的可見光波，其相位是不同的。人只有雙眼，但 PAR 的 T/R 點會有幾十、幾百...甚至上千個，加上後端的信號處理軟體，將讓 PAR 能夠具備“幾乎同時”(發射、接收)處理許多不同雷達波及訊息的功能，所以

又稱「多功能雷達」(Multi- Functions Radar, MFR)。

相位陣列雷達的天線使用大量的發射元件，每個元件具有一個移相器 (phase shifter)，透過每個發射單元發出訊號的相位改變，提供建設性或破壞性干涉，操控雷達波束至想要或所需的方位上；主波瓣由於建設性干涉而獲得加強，因而大幅提升分辨率。圖 3 為兩個發射單元 (天線) 分別以相同 (左) 及不同 (右) 的相位發射訊號，干涉效應造成電磁波束在不同方位角產生訊號能量的增強或減弱，當兩個發射單元的訊號相位有  $22^\circ$  的相位差時 (圖 3 右)，發射的整體訊號主方位向上位移。圖 4 為多個天線單元發射的訊號相位具有  $\Delta\phi$  的相位差時，合成的整體電磁波 (粗黑實線) 方向會逆時鐘轉動  $\theta^\circ$  角，當這些單元間距越近時，就可產生近乎平行波束了。因此，只需要以電腦調控便可發出不同方向的雷達波束，不像機械雷達需要轉動實體天線，即可達到快速轉換目標與多重目標同時追蹤的目的。這種不靠天線轉動就能快速改變波束指向的雷達，稱為「電子掃描雷達」。使用電子掃描雷達的特性，電磁波束可以迅速轉換方位，利用這種靈敏的波束控制能力快速獲取回波資料。

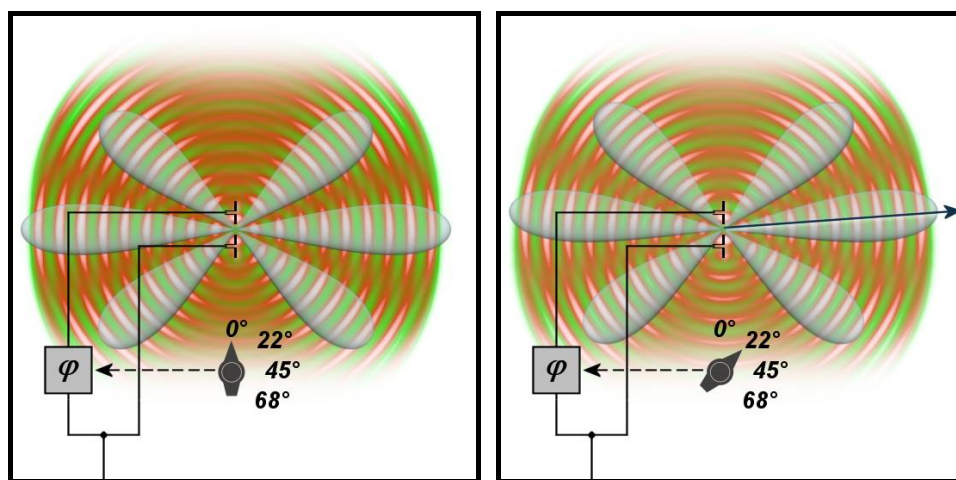
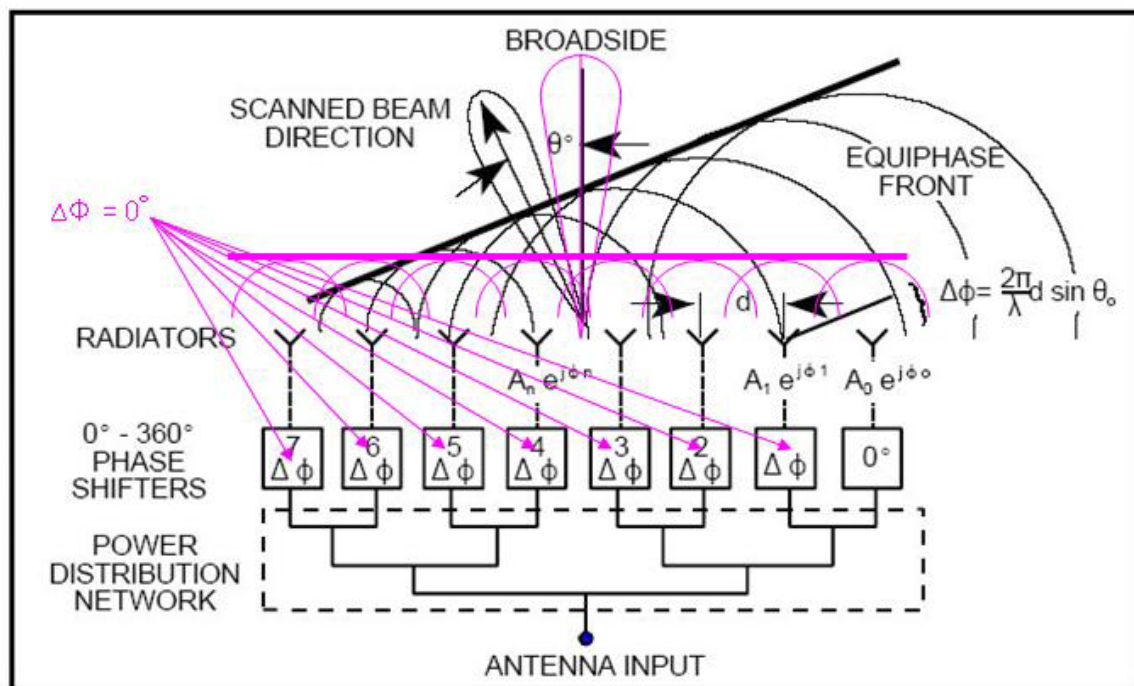


圖 3 兩個發射單元 (天線) 分別以相同 (左) 及不同 (右) 的相位發射訊號。(資料來源：Radartutorial.eu 網站)

相位陣列雷達又分為「被動式」與「主動式」，被動式相位陣列雷達是指天線表面的陣列單元只有改變訊號相位的能力而沒有發射訊號的能力，訊號的產生還是依靠天線後方的訊號產生器；由於每個陣列單元自身不能作為訊號源主動發射電磁波，所以被稱作被動相控陣列。主動式相位陣列雷達是指天線表面的每一個陣列單元都包含訊號產生、發射與接收的能力，也就是將訊號產生器、放大器等等全部縮小放在每一個陣列單元之內；由於每個陣列單元都可以單獨作為訊號源主動發射電磁波，所以被稱作主動相控陣列，這是目前相位陣列天線發展的主流趨勢。

美國為了將相位陣列技術應用到大氣探測領域上，因此整合 9 家研究機構合作將退役的神盾相位陣列雷達進行氣象探測改造，此雷達天線具有 4 個陣面，其中一個陣面用於天氣探測，主要用於冰雹、龍捲風等劇烈天氣的偵測，並與都卜勒氣象雷達進行觀測驗證，獲取的資料顯示，可以明顯的改善對劇烈天氣系統的偵測能力與預警功能，特別是龍捲風。目前相位陣列氣象雷達的掃瞄方式已再改進成多波束轉換掃瞄方式，可同時探測多個目標物，且增加雙偏極化功能，完成天氣探測及飛機追蹤等多用途任務。雖然這一系統已取得初步研究成果，但因技術條件的限制及資金的短缺，使得相位陣列氣象雷達的研制仍僅於起步階段。



當 $\Delta\phi = 0^\circ$ ，各發射/接收天線之間電磁波無相位差，合成主波瓣視軸(boresight)  $\theta = 0^\circ$

圖 4 多個天線單元發射的訊號相位具有 $\Delta\phi$ 的相位差時，即可調控雷達電磁波束的方向。

### 3. 結語

目前使用中的都卜勒氣象雷達屬於機械式掃瞄雷達，天線由旋轉的拋物線面和饋源所組成，單一的發射/接收機，發射的電磁波束的轉向是依靠機械轉動天線來完成 $360^\circ$ 方位掃瞄，並調整天線仰角進行連續掃瞄的方式，通常完成一組10至15個不同仰角所組成之空域掃瞄，掃瞄總時間約數分鐘(約5-6分鐘)，對於快速變化的中小尺度天氣系統，如冰雹、微爆氣流、龍捲風及風切變等劇烈天氣，很難同時滿足高時空解析偵測天氣系統的三維結構與發展演變需求。美國目前發展中的多功能相位陣列雷達利用電子掃描雷達的特性，電磁波束可以迅速轉換方位，利用這種靈敏的波束控制能力，能夠將掃瞄時間大幅縮減至1分鐘內，快速獲取大量的氣象回波資料，提高對冰雹、龍捲風等劇烈天氣的追蹤及預警能力。圖5為都卜勒氣

象雷達與靈敏波束相位陣列雷達的比較。

相位陣列雷達具有機動性強、可靠性高、高時空分辨率及多功能等特點，其陣列天線是由數千個小功率的 T/R 元件所組成，因此即使有 5% 的元件故障亦不會影響雷達的正常運作，比起現有雷達的單一 T/R 裝置更具可靠性，也比機械旋轉天線有相對較低的維護費用。由於使用大量的天線元件，使每一陣面天線造價十分昂貴，即使技術上可行，近期仍很難實現作業化。如果目前研究的有源電子掃描雷達，關鍵的技術成本能充分下降，相位陣列雷達將被證明是一個具有成本優勢的多功能雷達，提供美國空域的天氣和航管的監控功能，可替代多個單任務監控雷達如 ASR-9、ASR-11、TDWR、WSR-88D 等，將減少美國雷達總數的 35-40%，雷達維護費用明顯減小。因此，美國持續進行關鍵技術問題的研究，包括發射/接收單元、重疊的子陣列、數位 (digital) 波束合成器，以及天氣和飛機的後端數據處理運算法等，計劃到 2025 年完成對下一代都卜勒氣象雷達的替換。

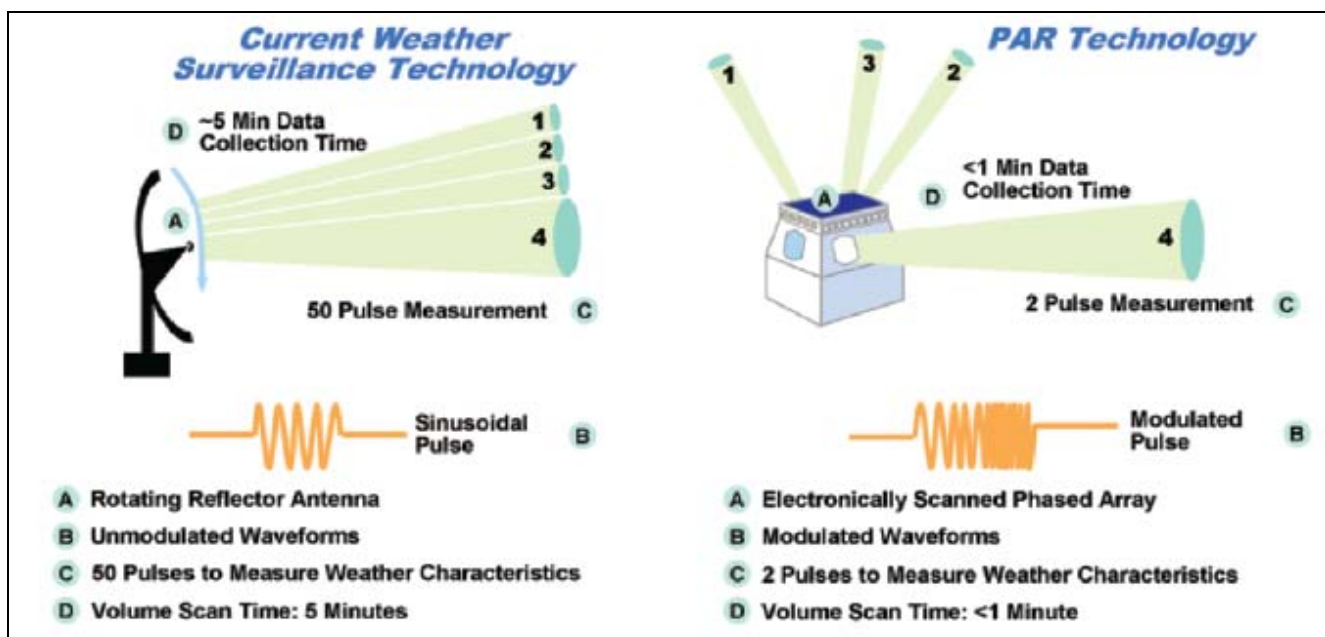


圖 5 機械旋轉氣象雷達與靈敏波束相位陣列雷達的基本差異。(Zrníc et al. 2007))

#### 參考文獻

- 1、維基百科：“電子掃描陣列雷達”。
- 2、Zrníc, D. S., and Co-authors, 2007: Agile beam phased array radar for weather observations. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, 1753 - 1766.
- 3、Tech Notes, 2011: Multifunction Phased Array Radar Panel. Lincoln Laboratory.