

113年第三十八屆天氣分析與預報研討會

2024.09.04

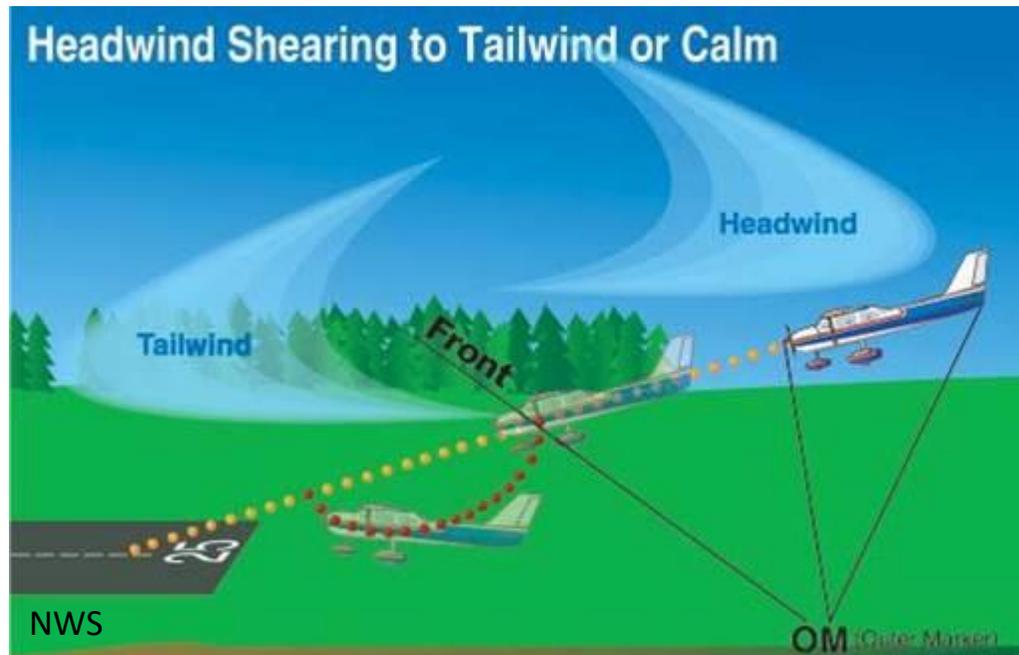
低空風切警報系統的發展與現況

台灣整合防災工程技術顧問有限公司

伍楚穎、賈新興

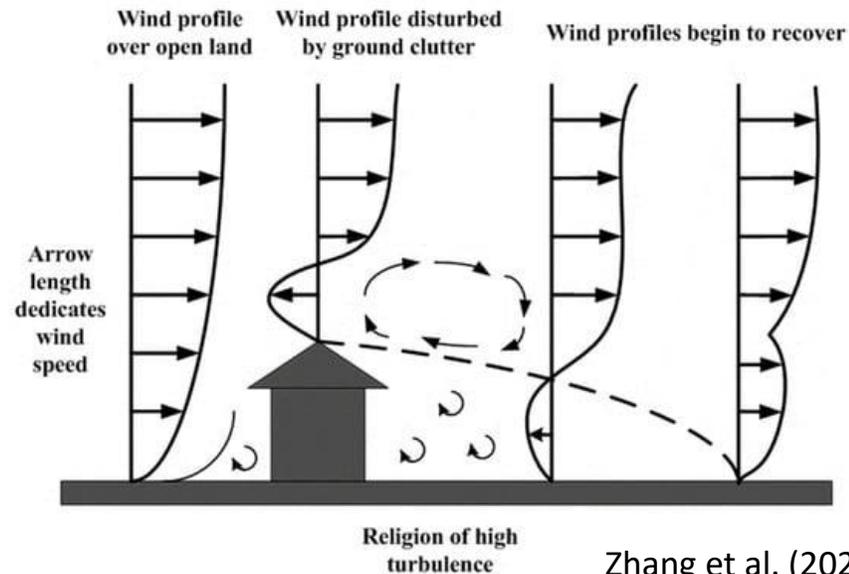
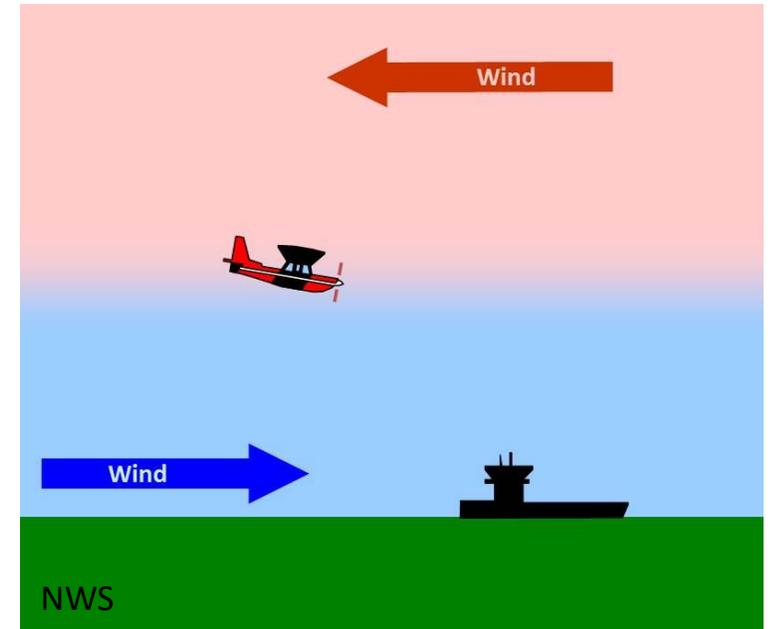
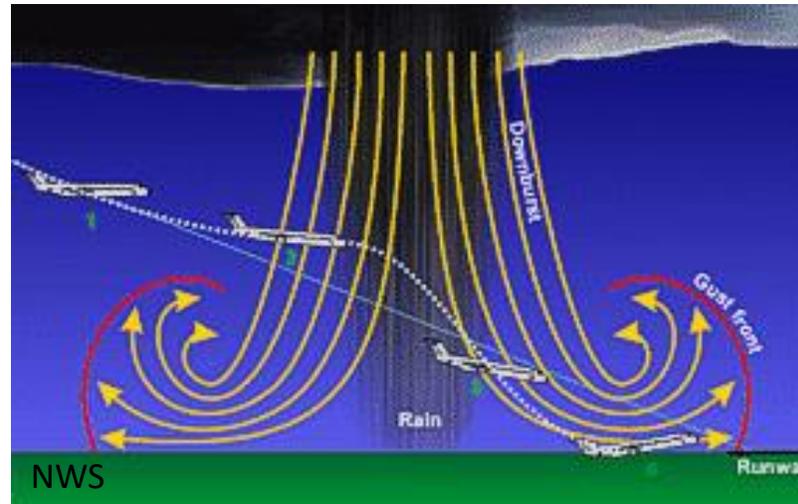
低空風切 – 飛航安全的危害因子

- 飛機的抬升(lift)與逆風(headwind)成正比關係
- 飛機都在逆風情況下進行起降
- 低空(500m以下高度) 風切(15 kt/km 持續不少於10s)
- 當逆風突然減少，而飛行員沒來得及改變操作，飛機將偏離航道，升力減少令飛行高度下降，可導致飛機撞擊地形的事故



低空風切成因

- 鋒面
- 噴流
- 雷暴 / 微暴氣流
- 山岳波
- 地形
- 海陸風



由低空風切引起的事故

- 根據航空安全網(ASN)數據庫，自1943年以來，全球發生256次由低空風切引起的事故，造成近2,000人喪生
- 死亡人數最多一次為「蘇聯民航4227號班機空難」：1980年7月8日 Tu-154客機從哈薩克阿拉木圖國際機場起飛，1分鐘就墜毀在阿拉木圖機場農田附近
- 機上156名乘客，10名機組人員，總共166人全部罹難
- 客機在爬升過程中就遇到了強烈氣流干擾，順風和微下擊暴流導致客機失速

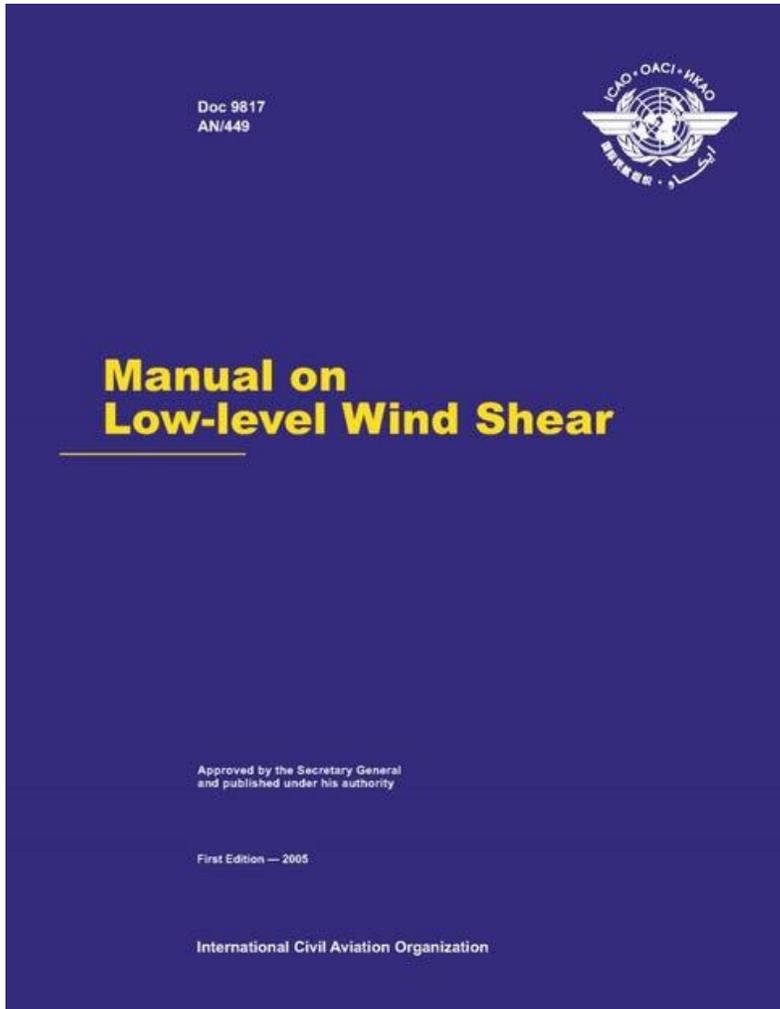


德安航空DA7511班機事故

- 2017年4月13日 DHC-6-400機型於於蘭嶼機場13跑道落地時偏出跑道，航機遭受實質損害，機上3名機組人員、16名乘客，共計19人均安 (4人輕微擦傷)
- 事故機於左側風情況下進場落地，著陸後可能受跑道上順時針風切及飛航操作影響，航機呈現左偏趨勢
- 正駕駛員雖曾加大右舵及使用右煞車之操縱量試圖改正，但因正駕駛員於不知誤用情況下繼續加大左側反推力至最大，終致該機偏出跑道並撞擊機場圍籬受損，機頭與機翼全毀



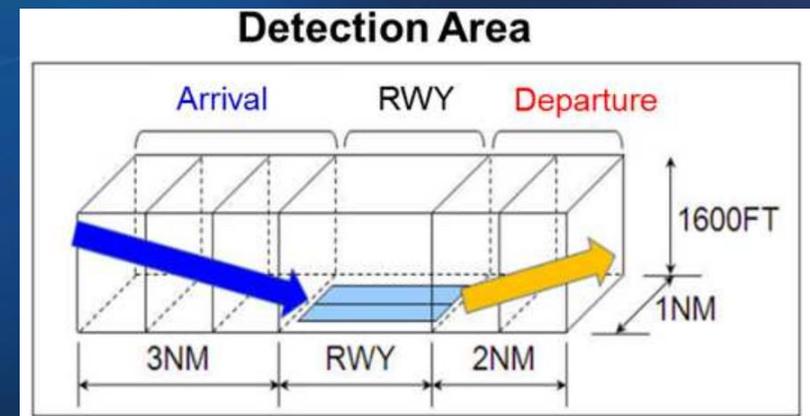
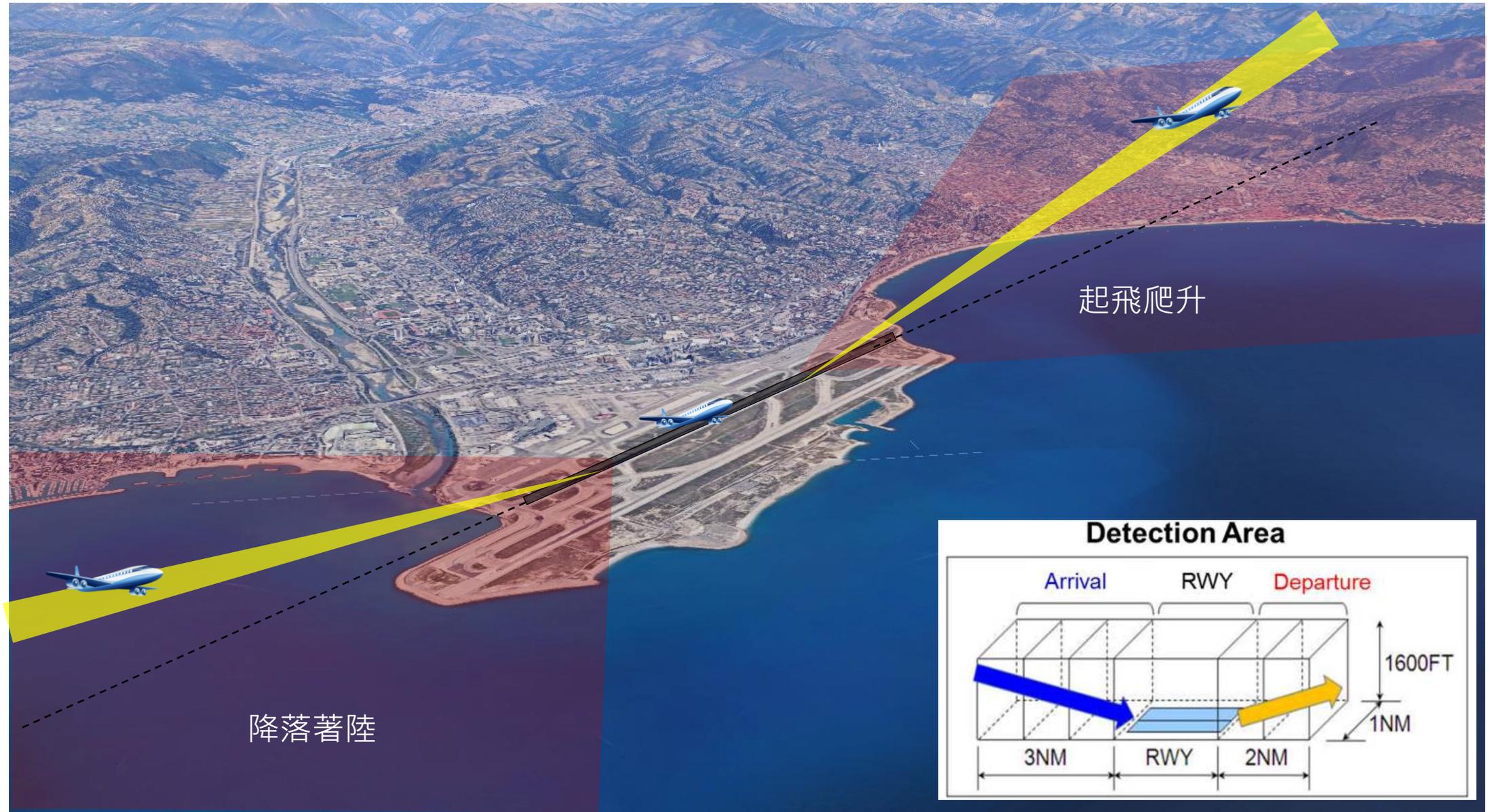
國際民航組織(ICAO): 低空風切手冊



ICAO (2005) Manual on Low-level Wind Shear

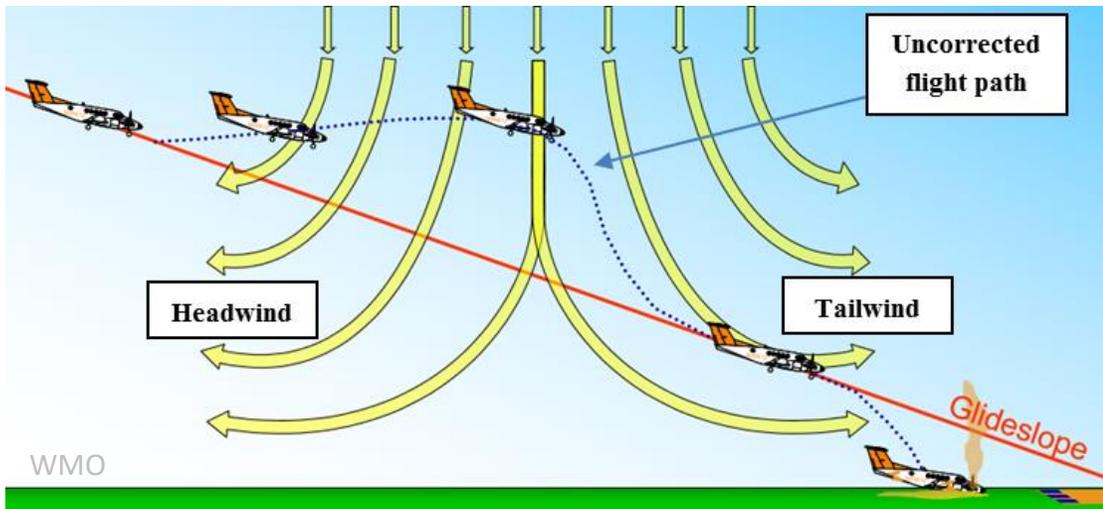
- 為航空氣象服務中對風切探測、報告和警報相關的規定提供指導
- 包含有關最新技術發展和研究的資訊：包括地面和機載風切監測和警報設備的開發進展
- 手冊旨在協助各國實施高效率的風切預警系統

低空風切最有影響，亦是飛航最大風險的階段



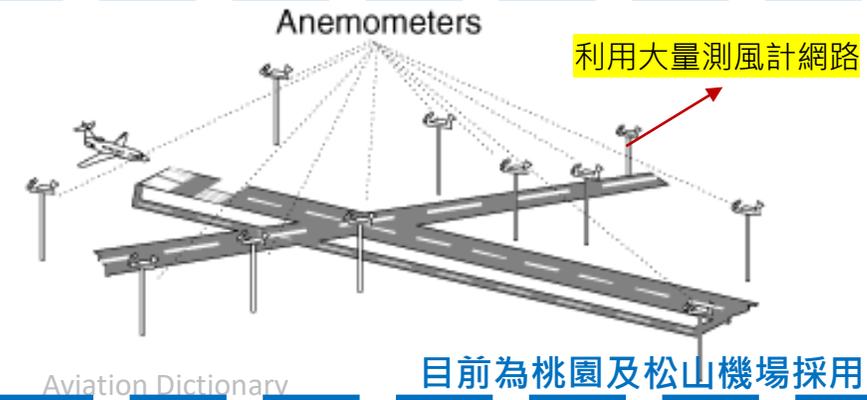
低空風切與監測技術

風切可令飛機偏離原本航道：
 逆風急劇增加(Gain) → 飛行高度提高
 逆風急劇減少(Loss) → 飛行高度下降



偵測風切是指：
觀測風場在短距離短時間出現的變化
 (15 kt/km 持續不少於10s)
 使命: 提供風切資訊予飛行員，
 透過改變飛機操作，減緩風切影響

LLWAS
 (Low-level Windshear Warning System)



Radar
 氣象雷達



Lidar
 測風光達



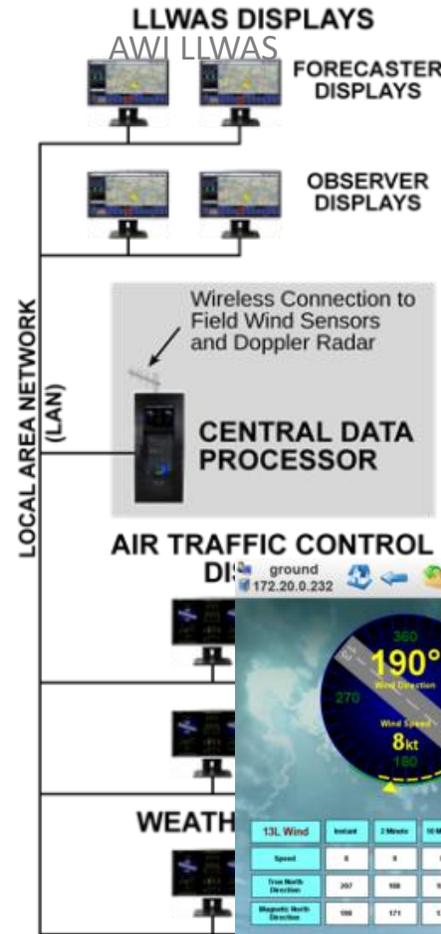
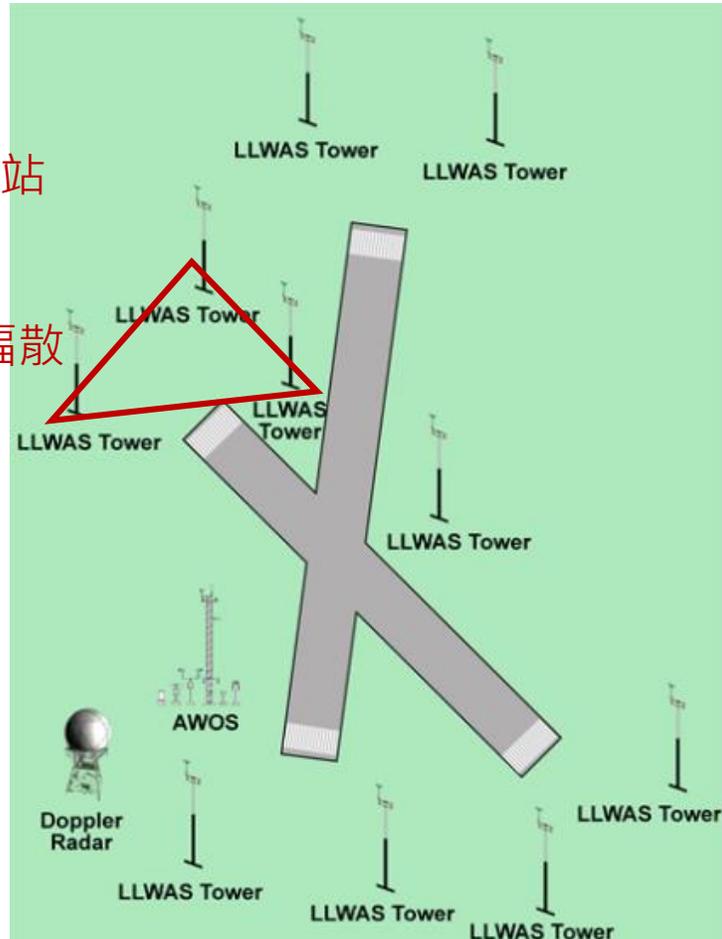
基於測風計網路的低空風切警報系統(LLWAS)

- 美國FAA於1970年代，因紐約JFK機場發生事故，開始發展LLWAS
- **Phase-1 LLWAS**是基於機場中心與5個機場周圍測風計的觀測
 - 當出現有測風站與機場中心 15kt vector difference
 - ATC將向飛行員讀出各測風計數據，由飛行員自行計算逆風變化
- 此系統的問題是各測風計距離遠，只能偵測較大尺度的天氣形態，而錯過微爆氣流等小尺度風切現象
- 經過改良及測試，FAA與NCAR於1990年代發展**Phase-3 LLWAS**系統
 - 針對機場跑道及其延伸放置測風計 (站點位置經特別設計)
 - 測風計數量大幅增加，通常是12-16個測計，Denver機場LLWAS甚至達32個測風計
 - 演算法直接換算成飛機航道的逆風變化，並提供發生風切的跑道、位置資訊

LLWAS

以多個觀測站
構成三角形

計算輻合/輻散



機場低空風切警報例子:
“YUDO WS WRNG 01 211230 VALID
211245/211330 WS APCH RWY12 FCST SFC
WIND: 320/10KT 60 M-WIND: 360/25KT”

CF 210 04G00 1336 ALM ON

13RA MBA 50k- RWY 210 05
13LA MBA 50k- RWY 210 04

26 A 220 06
08 D 220 06

13LD MBA 50K- RWY 180 45

13L Wind	Instant	2 Minute	10 Minute	60 Minute	24 Hour
Speed	8	8	8	8	8
True North Direction	267	268	268	268	268
Magnetic North Direction	268	271	272	272	272

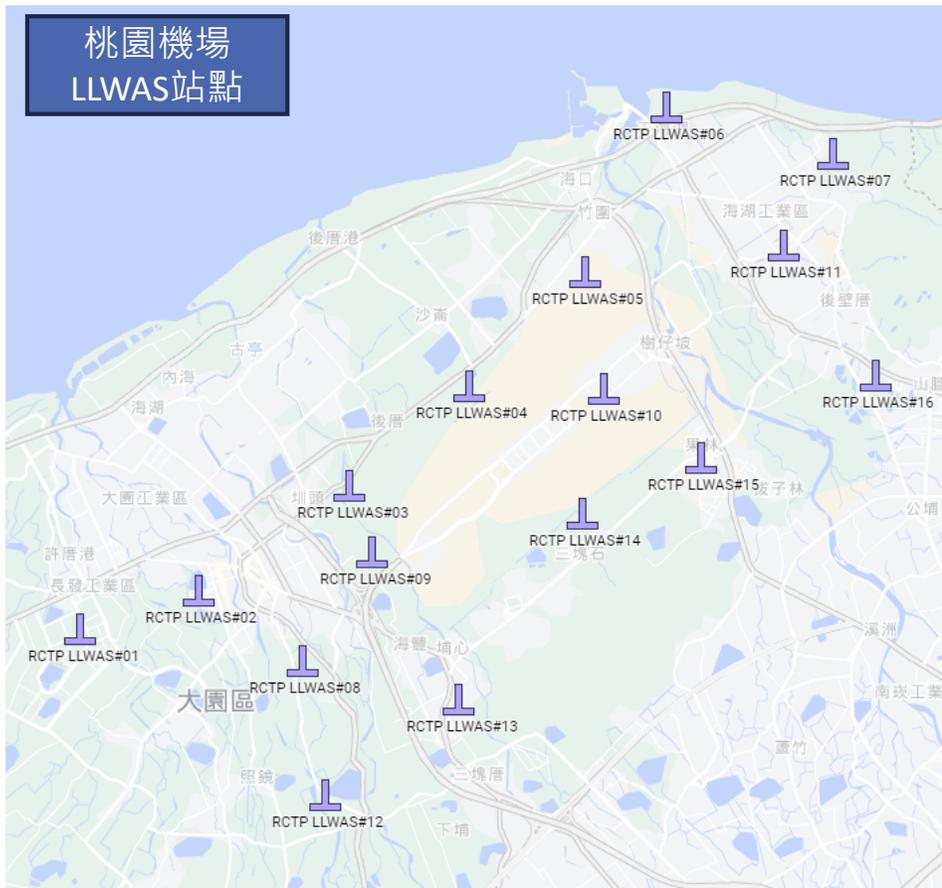
13L Visibility	1 Minute	2 Minute	5 Minute	10 Minute	60 Minute
	2414	2414	2414	2414	2414

Barometric Pressure	Instant	2 Minute	10 Minute
	25.50	25.51	25.50

Solar	Day / Night	Absorbed Light	Sun Duration
Value	10.0	10.0	

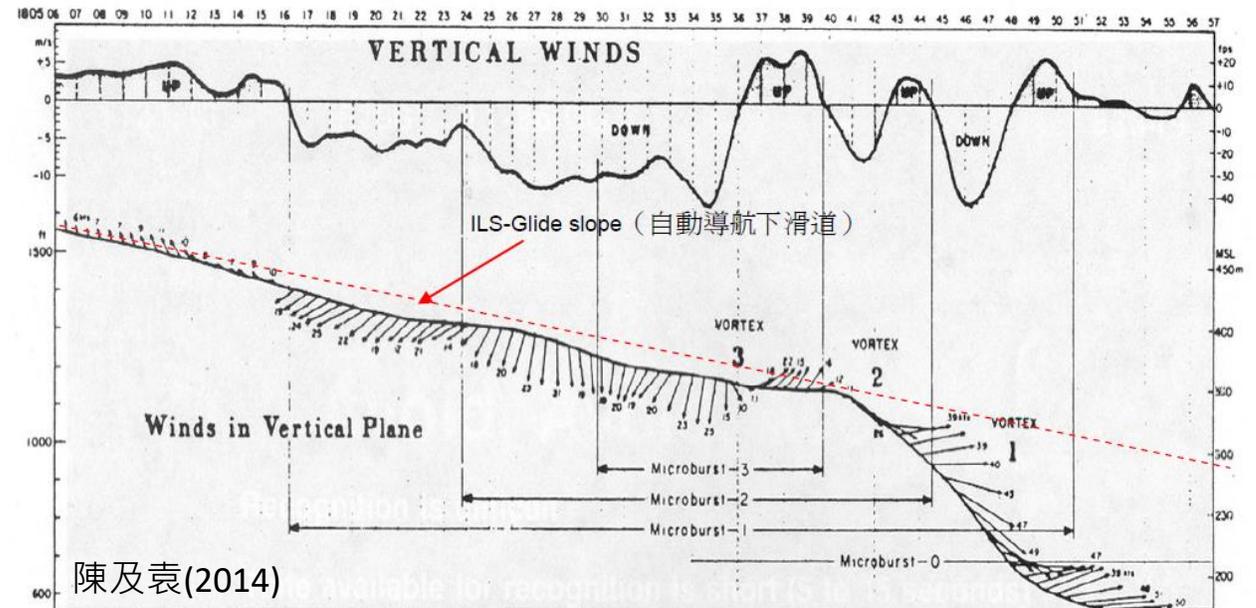
臺灣機場的LLWAS現況

- 現時桃園及松山機場使用LLWAS進行風切警報作業
- 桃園LLWAS測風計16站點，而松山12站點



基於測風計的LLWAS的限制

- 風切的計算是基於地面測風計
- 如微爆氣流那樣在機場上空發生，從上而下移動，到地面才被LLWAS偵測及警報，會有時間上的延遲
- 1982年達美航空Delta 191號班機空難，降落Dallas機場時遭遇微爆氣流，導致飛機高速撞上地面，事故造成136人喪生
- Dallas機場的LLWAS系統在事故發生後才報出風切警報

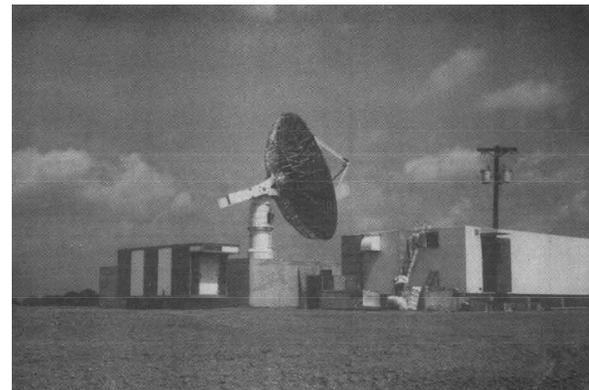


圖七：黑盒子記錄 191 航班降落時的風場

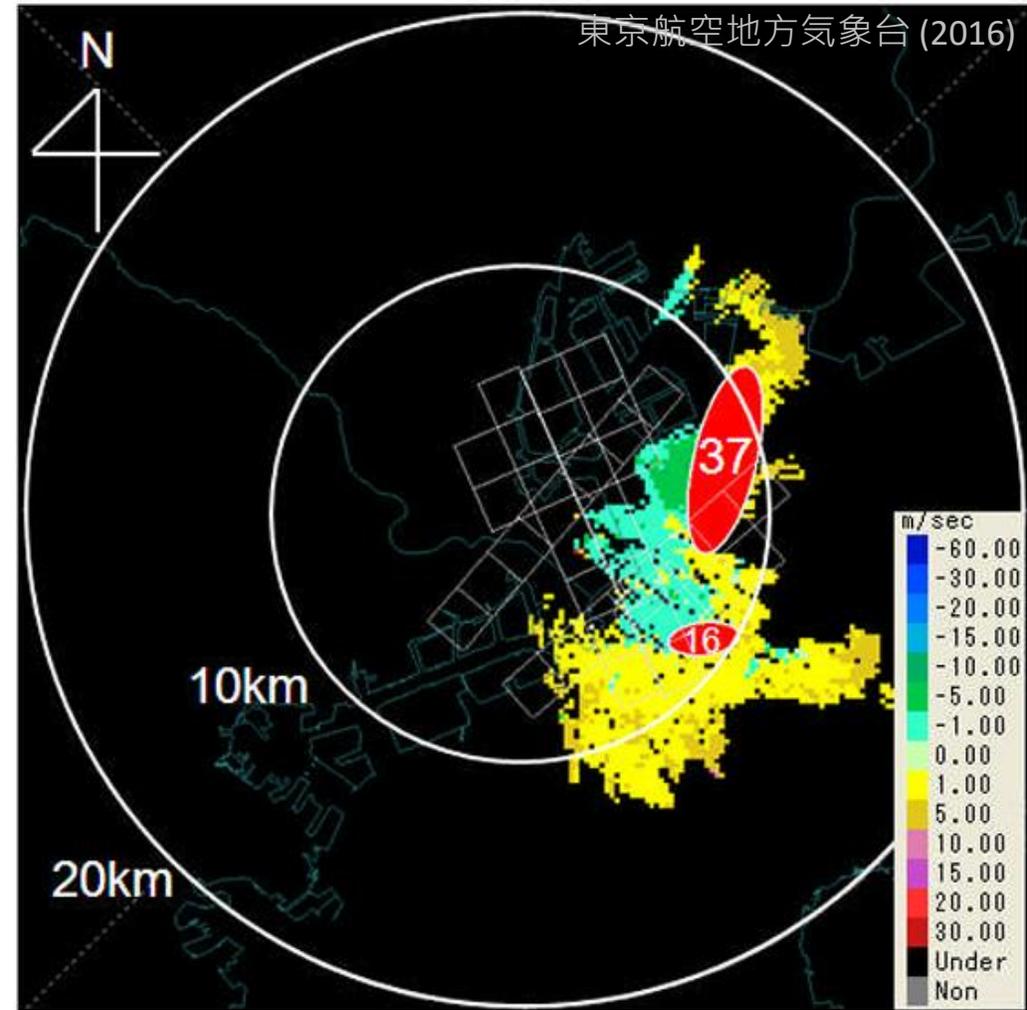
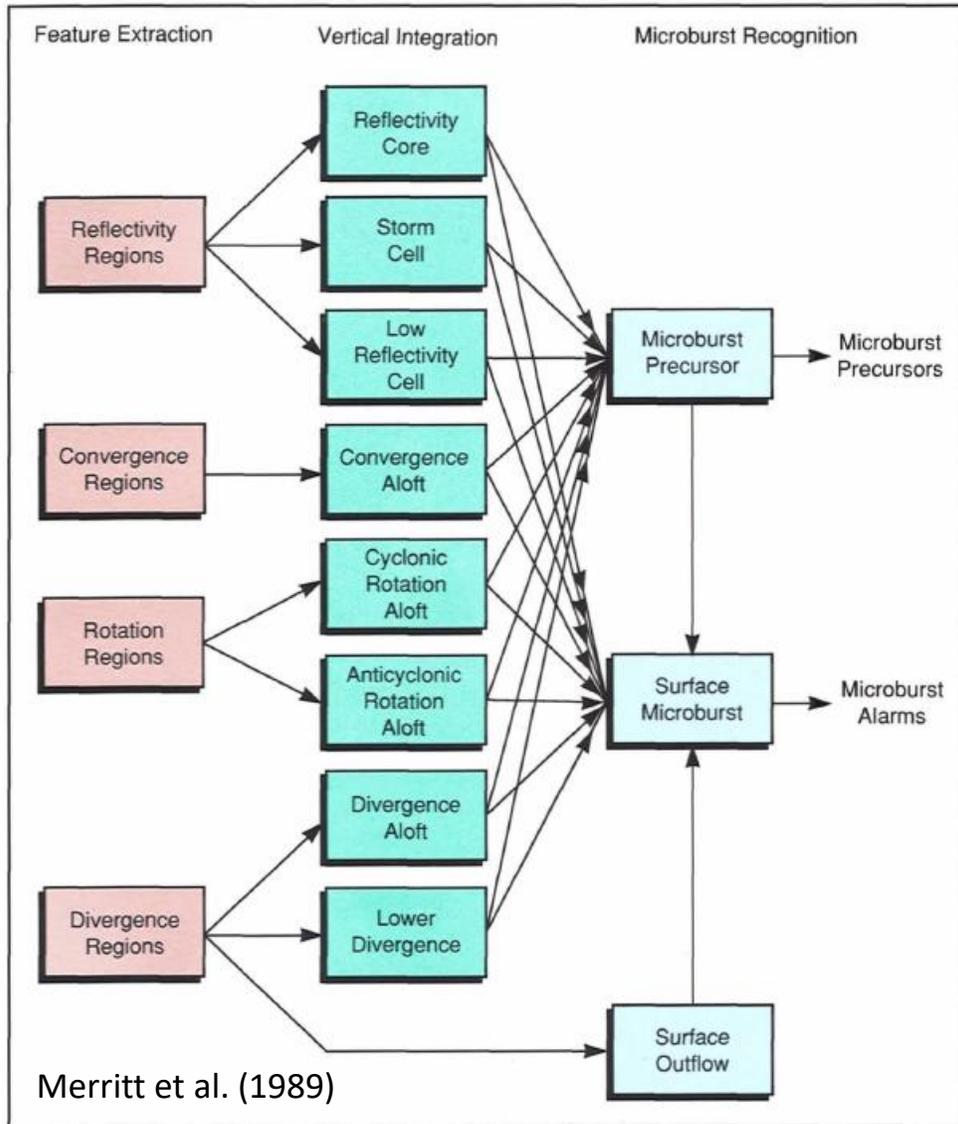
機場都卜勒氣象雷達

- 由美國FAA主導，自1980年代起開發TDWR (Terminal Doppler Weather Radar)
- TDWR為專用於機場偵測低空風切及微爆氣流的雷達
- TDWR與國家氣象局NEXRAD因觀測目的不同，在距離、高度及掃瞄頻率有不同要求

	NEXRAD (WSR-88D)	TDWR-testbed (Memphis 1985)	TDWR-operational
Frequency	2700 - 3000 MHz (S-band)	2880 MHz (S-band)	5600 - 5650 MHz (C-band)
PRF	320 - 1300 Hz	700 - 1200 Hz	Up to 2000 Hz
Beamwidth	0.88° - 0.96°	0.96°	0.55°
Antenna	8.54 m	8.5 m	7.62 m

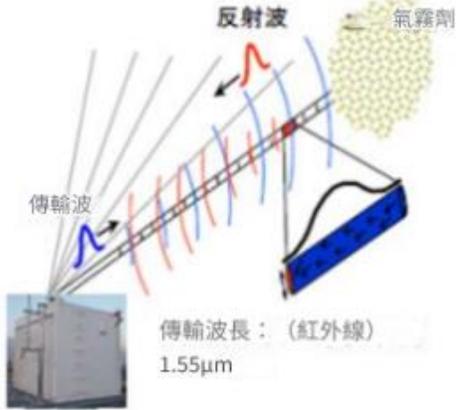
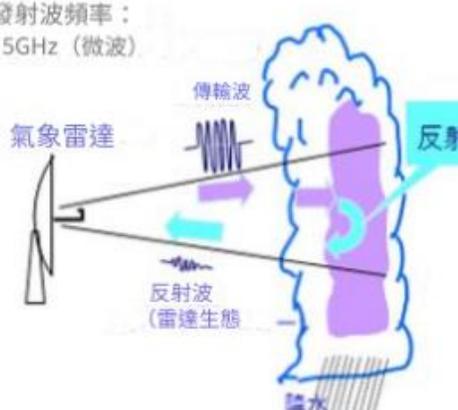
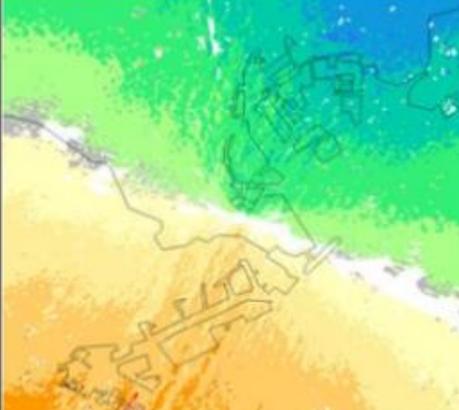
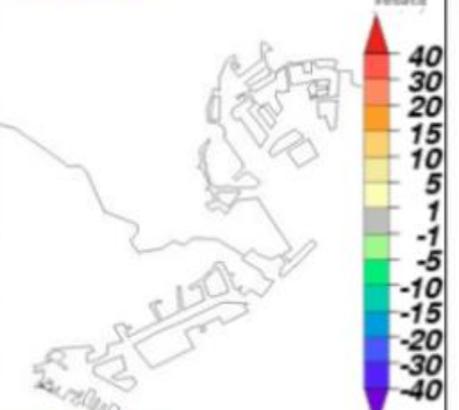


都卜勒氣象雷達偵測低空風切



2011年1月26日 08:07 UTC，羽田機場TDWR風速圖，及雷達系統偵測的微爆氣流範圍及強度

測風光達

	目的	觀測方法	☂ 雨天觀測例子	★ 晴空觀測例子	
光達	○ 非降水期間的氣流觀測	 <p>反射波</p> <p>氣霧劑</p> <p>傳輸波</p> <p>傳輸波長：(紅外線) 1.55μm</p>			<p>光達和雷達是觀測條件和偵測範圍不同的設備，兩者相輔相成。</p> <p>↓</p> <p>監測風切，無論是否下雨，風切都會對飛機安全運作構成危險。</p>
雷達	○ 降水時氣流觀測	 <p>發射波頻率：5GHz (微波)</p> <p>氣象雷達</p> <p>傳輸波</p> <p>反射</p> <p>反射波 (雷達生感)</p> <p>降水</p>			

東京航空地方气象台 (2022)

國外應用例子 – 東京



雷達建置位置為羽田機場內的整備區。



光達建置位置分別為羽田機場整備區大樓屋頂上，以及東消防局旁建造金屬塔。



國外應用例子 – 新加坡



樟宜機場的雷達與光達同時設置在第二航廈屋頂上，兩者相距約25公尺。

國外應用例子 – 北京



北京大興國際機場

Long range Lidar
>10 km

C-band PAR

光達建置位置為東跑道東側塔臺附近，並建造金屬塔提升儀器高度。由2021年開始運作。

雷達建置位置為大興機場南方距離約20公里的位置。

國外應用例子 – 南韓

仁川國際機場

C-band TDWR



另外，濟州國際機場將於今年(2024)安裝TDWR+2*Lidar

基於測風計LLWAS與遙感偵測設備比較

	LLWAS	雷達	光達
測風原理	直接量測	都卜勒效應	都卜勒效應
對「風」準確度	直接觀測故較高	適當校準下仍高	適當校準下仍高
偵測風切方法	以輻合值等估算	直接算風場變化	直接算風場變化
「風切」準確度	視數量位置而定	特定天氣下較高	特定天氣下較高
用於什麼天氣	任何天氣	有降雨	無降雨/霧
儀器成本	較低	較高	較高
水平觀測距離	視乎測風塔位置	超過100公里	超過10公里
垂直觀測距離	單一高度	可垂直分層掃瞄	可垂直分層掃瞄
空間解析率	低	高	高
時間解析度	最高 (每10秒可進行一次觀測)	高 (一般3-5分鐘完成一組體積掃瞄)	高 (每1-2分鐘一組PPI掃瞄+下滑道掃瞄)
提早預警的可能	為分散單點觀測，難以提早預警	透過特徵追蹤、雙偏極化參數等，可能提早預警	透過特徵追蹤，可能提早預警

其他風切偵測方式

- **SODAR**: 原理類似雷達
- SODAR易受嘈吵環境影響，且積分時間久
- **剖風儀**
- 可觀測低空噴流、特定地形造成的風切，但無法偵測對流型風切
- **機載(airborne)儀器**
- 基於飛行參數(pitch angle, angle of attack, true airspeed, vertical acceleration and longitudinal acceleration)判斷飛機是否受風切影響 (reactive)
- 機載雷達/光達 (forward-looking)



低空風切警報系統的未來發展趨勢

- 美國FAA的TDWR自1990年代起投入作業，至今已30年，未來將逐步汰換
- FAA正進行發展**相控陣雷達**取代TDWR，同為NextGen Surveillance and Weather Radar Capability (NSWRC)計畫，預期2030年代運行
- 相控陣雷達2分鐘完成體積掃瞄，更提升對劇烈天氣的監控
- 研究階段：雷達/光達觀測的real-time data assimilation，以數值模擬/AI等方法**預測風切**發生
- 光達搭配200mm口徑**恆溫望遠鏡**→觀測距離增至30km，且可在有降雨情況下使用



Xia et al. (2024)