

光學雷達於航空氣象的應用

伍楚穎¹ 賈新興¹

一、前言

氣象與飛航安全息息相關，根據臺灣飛安統計報告（國家運輸安全調查委員會，2022），我國在 2012 至 2021 年之間共發生 46 次民航重大飛航事故，當中有 28% 的事故原因與天氣有關。對航機運作而言，空氣流動除了提供水平移動的動力還會產生升力，所以風力是最關鍵的氣象要素之一，而風的劇烈變化會導致著名的航空天氣災害如低空風切和亂流。

低空風切由國際民航組織（International Civil Aviation Organization；ICAO）定義為 1600 呎以下風向或風速的突然變化，由於航機的逆風變化會影響升力，假如飛行員來不及反應並調整航機的仰角，航機將偏離航道。而在起飛及降落階段，航機距離地面較近，當遇上減少升力的低空風切，航機有機會發生撞向地面的事故。航空安全網（Aviation Safety Network；ASN）的資料庫記載了在國際間發生過的航空事故詳細報告，報告顯示，自 1943 年以來低空風切引起了 129 次事故，並導致超過 1900 人的死亡。

因此，全球多個國家都投入眾多資源發展低空風切偵測及警報技術，以提升航空安全水平。1999 年 8 月 22 日，當時的中華航空 CI642 號航班由泰國曼谷起飛，計劃途徑香港後再轉飛桃園。然而在香港國際機場降落期間，受颱風山姆影響，航機遭遇低空風切，逆風及升力突然減弱，最後導致航機著地時右機翼折斷至機身翻轉

¹台灣整合防災工程技術顧問有限公司

並發生爆炸，造成 3 名乘客死亡及多人重傷。在事故發生後，為了提高對低空風切的偵測能力，香港天文台於 2002 年首次在香港國際機場設置光學雷達（Light Detection And Ranging；LIDAR，簡稱光達），為世界上第一台用於業務機場低空風切預警的光達。

自首次使用光達偵測低空風切以來，在近 20 年期間，除了有多個國際城市機場相繼引入該技術之外，光達亦被應用在觀測更多不同的天氣現象，包括亂流和能見度等。本文將以國外光達在航空氣象的應用為主軸，介紹光達技術的發展，並在最後初步就臺灣光達使用層面作討論。

二、光達結構與掃描方式

光達與雷達都是利用都卜勒效應（Doppler Effect）運作的遙感探測器，透過發射與接收的電磁波頻率之差來推算目標物件的移動速度，但光達跟雷達的主要差異在於使用波長不一樣的電磁脈波。表一是日本氣象廳（Japan Meteorological Agency；JMA）應用於關西國際機場的都卜勒氣象雷達及東京羽田國際機場的光達作為例子，表一呈現兩個機場各自在儀器規格上的不同。

一般氣象雷達使用的微波波長為 1-10cm，用以偵測降水粒子，而光達使用的是紅外光波長為 $1-10\mu\text{m}$ ，遠比雷達的短得多，因此能夠偵測更細小的粒子如空中氣膠。這種波長的差異導致氣象雷達只能在有降水的天氣下才能觀測風力，而光達則是在晴空下運作（更短的波長使訊號在雨天急速衰減而無法傳遞）。圖一為設置在香港國際機場南跑道旁的光達，可見相較於氣象雷達，光達佔的空間較少。一般來說，光達保護外殼的長約 2-3m，能夠容易安裝於建築物的屋

頂上。另外，圖中四方體外殼正上方外表像攝影機的部分就是光達的掃瞄器（用作發射及接收紅外光），體積亦是相當小，因此能夠進行靈活的掃描方式。

光達的掃描方式除了有雷達常用的固定仰角（Plan Position Indicator；PPI）、固定方位角（Range Height Indicator；RHI）、固定視角（Line Of Sight；LOS）及風廓線模式（Doppler Beam Swinging；DBS）。另外，為了觀測影響航機升降的低空風切，香港天文台在最初設置光達的時候，特別設計了「下滑道掃描」模式（Glide Path Scan）。圖二為光達「下滑道掃描」模式的示意圖，航機在起飛時，航道跟地面之間的角度一般為 6° ，而在降落時則是 3° 。光達透過預先定義好的仰角跟方位角的同步變化（跟傳統雷達會固定其中一個角的掃瞄方式不同），沿著下滑道路徑掃描，再透過計算，便能得到航機在航道上的風場資訊。值得注意的是，由於光達跟雷達一樣以都卜勒效應探測速度，該速度為相對於掃瞄器位置的徑向速度（Radial Velocity）。因此，應用「下滑道掃瞄」模式的光達所發射的光束跟機場跑道方位越接近越好（香港的選擇為夾角不大於 30° ）。而在香港國際機場這個例子當中，光達的「下滑道掃瞄」在1-2分鐘左右便能重複一次整套的掃瞄動作，因此能夠以很高的時間解析度提供下滑道上逆風變化的資訊。

三、光達低空風切演算法與實例討論

根據 ICAO 出版的「低空風切及亂流手冊（Doc 9817）」，低空風切的強度分級以及每 30m 距離的風速變化分別為：輕微（0-4kt）、中等（5-8kt）、強烈（9-12kt）及嚴重（>12kt），如果風力變化只在極短的一瞬間出現，然後就回復正常的話，對航機的軌跡並不會

造成明顯的影響。相反，如果風力在經過一段很長的距離期間平均地緩緩地改變，讓飛行員有足夠的時間調整航機的操作，亦不會危害飛航安全。因此，如何從光達探測到的下滑道風場數據把不會影響航機的過小跟過大尺度的變化過濾掉，便是設計低空風切偵測演算法要考慮的一項重點。

香港天文台開發的「飛機下滑道掃瞄風切變探測運算程序」(GLide-path scan windshear alert Generation Algorithm；GLYGA)，程式包含了三大部分：建立沿著下滑道的逆風廓線、從逆風廓線辨認風切變、以及產生風切預警（黃與陳，2005）。圖三為文獻中提供的一個模擬例子，圖中藍線代表由機場光達為跑道進行「下滑道掃瞄」後經過幾何計算所得出的下滑道逆風廓線（詳情可參考黃與陳，2005）。然後運算程序會從逆風廓線初步找出逆風在增加或減少的地方，而這些地方稱之為「斜坡」(Ramp)。經過擬合及把小於 200m 跟大於 2000m 的「斜坡」過濾掉後，便成了圖中紅色的部分，均藉由程式辨認風切位置及強度。最後程式便會根據航機在此航道上最先遇到的風切位置判斷風切預警的定位，而強度則是根據升降範圍內出現最高強度的風切而定（而且負值風切優先於正值，因為代表失去升力）。當預料風切強度超過 12kt 時，便產生風切預警。

圖四為 GLYGA 在香港國際機場的使用案例，當地時間是 2010 年 1 月 15 日中午左右，機場吹著盛行東風，另一方面白天陸地受熱，海風從機場西側緩緩吹來，所以我們從圖四（左）可以看到中心位置的光達往東跟往西兩個方向都觀測到以綠色表示的「向心」徑向風。由於機場的跑道呈西南—東北走向，這東風跟西風的交界便導致在跑道上升降的航機出現逆風改變。圖四（右）藍線顯示當時一架 B777 型的航機在北跑道（07LA）降落，機上快速存取記錄器計算

出的 F-Factor (一項量化航機受力變化的風切危害指標，詳見 Proctor et al. (1993)) 在距離跑道門檻約 1-2NM 處出現劇烈變化，而機上飛行員報告遭遇顯著風切 (逆風增加 15kt)。圖中粉紅線為以光達觀測到的下滑道逆風廓線 (GLYGA) 所計算出的 F-Factor，研究發現兩者的趨勢大致上一致。因此光達作為遙感探測器，在偵測跑道上的低空風切的效果令人滿意。

另外，美國拉斯維加斯麥卡倫國際機場在 2005 年 7 月 29 日至 10 月 14 日期間做過一個光達的實驗，由於拉斯維加斯屬副熱帶沙漠氣候，降水日子少，麥卡倫機場上發生的低空風切多為「晴天型」，因此氣象雷達的偵測效率並不高。Keohan et al. 2006, 利用雷達及光達以 PPI 掃瞄作風切偵測，並統計各自的成效。表二顯示了使用不同儀器的偵測率及虛警率，研究結果表明，由於雷達跟光達在截然不同的天氣狀態下運作，兩者的存在並不會造成衝突反而可以相輔相成，同時使用光達及雷達可以令偵測率達至 91% 而虛警率降至 5%。而在日本方面，JMA 與宇宙航空研究開發機構 (Japan Aerospace Exploration Agency；JAXA) 共同開發的「機場低空風場資訊系統 (Airport Low-level Wind Information；ALWIN)」自 2017 年起在東京羽田及成田國際機場投入運作，ALWIN 是一個把雷達跟光達資料融合在一起 (圖五) 提供低空風切及亂流的資訊系統，問卷調查顯示飛行員對於 ALWIN 的表現相當滿意 (JAXA (2017))。

四、光達其他的應用

在第一台都卜勒光達被應用在航空氣象為香港機場跑道提供風切警報以來，世界上包括美國、日本、英國、德國、法國等等，都陸續設置機場都卜勒光達，其主要用途都是用作偵測低空風切，亦

有像英國倫敦希斯洛機場以光達觀測航機的尾渦（Wake Vortex）來減少航班升降的間隔，繼而提升機場承載量。

由於光達能以遙感方式，並以高時間空間解析度觀測遠處氣膠粒子，因此有更多有利於航空氣象的應用發展的潛力。首先是能見度方面的應用，在航機升降的時候，低能見度會影響飛行員判斷機場本身以及周邊範圍地形的狀況，而對於使用目視飛航（Visual Flight Rules；VFR）的飛行員尤其重要。當出現霾害天氣，空氣中的氣膠粒子密度提高，由散射造成的消光系數（Extinction Coefficient）便會增加，令環境背景光線難以傳遞，造成能見度降低。由於光達的原理為透過反散射（Backscattering）對空氣中的氣膠粒子進行觀測，以接收到的反散射功率逆向計算便能反演出消光系數、氣膠光學厚度（Aerosol Optical Depth；AOD）以及能見度。香港國際機場的光達被應用在能見度觀測的例子可參考 Chan et al. (2007) 及 Chan (2010b)，研究除了以光達數據計算機場能見度（見圖六案例）外，亦有比較光達跟傳統能見度或 AOD 觀測儀器，如向前散射儀（Forward Scatter Meter）、太陽光度計（Sunphotometer），結果顯示光達的觀測具有不錯的參考性。

此外是觀測大氣邊界層垂直風廓線的應用，都卜勒光達量度的風速是一維的徑向風速，當有兩台都卜勒光達的時候，便能得出二維的水平風場。筆者於 2020 年利用香港國際機場的兩台光達作實驗（Ng and Hon (2020)），當時香港的光達除了每 1-2 分鐘執行本文第二部分提到的「下滑道掃瞄」以及每 3-4 分鐘執行 PPI 掃瞄以外，還有在光達運作空檔的時間補上 RHI 掃瞄，以輔助航空氣象預報員分析山風對機場的影響。

Ng and Hon (2020) 利用兩台光達的 RHI 掃瞄（方位角分別為 70° 及 163° ），透過幾何計算及修正，得到這兩個視角方向相交點（位於南跑道跟航空貨運大樓之間）的高解析度垂直風廓線（圖七）。在經過與位於機場外的傳統垂直風剖儀以及飛機氣象資料中繼（Aircraft Meteorological Data Relay；AMDAR）的數據驗證，發現在 250m 以上較為高空的部分，光達計算的垂直風廓線跟其他觀測一致，而 200m 以下較為接近地表的部分的差異則明顯增加，顯示在大氣邊界層靠近表面的風場因受到建築物的影響，出現不均勻的特徵。換句話說，此方法能觀測到跑道附近的風場會怎樣受其他建築物的影響，而且這資料不需要額外安裝剖風儀等等的儀器便能獲得。

另一個利用光達風場觀測的高解析度優勢的，就是應用在數值天氣預報資料同化（NWP Data Assimilation）。Wong and Chan (2013) 研究使用雷達及光達數據進行香港天文台非靜力模式（Nonhydrostatic Model）三維風場資料同化，結果顯示在使用了光達資料後，模式對於香港國際機場附近由複雜地形產生的低空風切及陣風捲的掌握度提高許多，而且在配合雷達資料下，模式對於雷暴的劇烈對流發展以及動力演變的分析能力也明顯增強。總括來說，光達除了為機場提供即時航空風險的監測，還為航空氣象的預報能力提供有利協助。

自 2002 年起很多國際機場採用光達來觀測機場風場，並大幅應用在低空風切偵測。大部分的光達都屬於「長程」型，而在近 10 年，「短程」光達（Short-range LIDAR）亦開始被發展起來。這兩個名字分類源自不一樣的觀測距離：長程光達視野較遠，可達 10 公里；而短程光達一般小於 3-4 公里，但短程光達擁有的優勢為更高的解析度，空間、時間解析度分別為 75m、20s；而長程光達為 105m、120s。

因此，短程光達可被應用於觀測更小尺度的航空天氣現象，包括跑道附近建築物引致的亂流 (Hon and Chan (2020))。此外，歐盟科研架構下的「光達晴空亂流偵測展示計畫」(Demonstration of Lidar Based Clear Air Turbulence Detection ; DELICAT1) 在過去數年亦開發安裝在航機上的光達，用以偵測飛行中遇到的晴空亂流。根據 Vrancken et al. (2016) 的報告顯示，計畫中的研究專用航機搭載了高功率 Rayleigh UV 光達系統，成功偵測 10km 距離內發生的中等強度晴空亂流。因此，未來利用高功率 Rayleigh UV 機載光達系統，仔細分析和研究晴空亂流的特性、以及改良機上光達技術，期望能應用到一般航機上，減少由晴空亂流導致的空中事故。

五、結語

飛航安全是航空業界順利運作的核心，為了把由氣象造成的風險降至最低，氣象界一直大力投入資源及研究人員開發工具及技術，光達的引入為機場低空風切偵測提供了許多改良及更多發展的可能性。光達與雷達分別在晴天跟雨天之下運作，兩者相互補足。除了低空風切，光達的數據還能被應用在能見度觀測、垂直風廓線計算及預報模式資料同化等等，為機場氣象業務提供更多實用的資料。而擁有更高解析度的短程光達，亦被應用於觀測機場亂流等更小尺度的現象，相信未來還有更多的發展潛力。

2020 年，國立中央大學用於觀測大氣混合層的光達站，因設置環境標準及保養質素極高，被全球光達觀測網 (Micro-Pulse Lidar Network ; MPLNET) 評為「亞洲指標站」(中央通訊社，2021)，而且有能力為亞洲其他國家的光達進行校準及測試。相信臺灣未來在光

¹ DEmonstration of Lidar based Clear Air Turbulence detection: <http://www.delicat.inoe.ro/>

達技術發展的路上能夠繼續充分發揮本地人才實力，開拓多元航空氣象的應用，守護臺灣的天空。

六、參考文獻

- 國家運輸安全調查委員會，2022：台灣飛安統計 2012–2021。檢自 <https://www.ttsb.gov.tw/1133/1150/1151/> (Oct. 20, 2022)。
- 黃秀霞與陳柏緯，2005：激光雷達的風切變探測運算程序的發展及其在二零零四年八月二十八日至三十日的風切變過程中的表現。「第十九屆粵港澳氣象科技研討會」發表之論文，中國，廣東陽江。
- 中央通訊社，2021：光達系統監測混合層 亞洲指標站在台灣。檢自 <https://www.cna.com.tw/news/ahel/202104110081.aspx> (Oct. 21, 2022)。
- Chan, P. W., 2010a: LIDAR Windshear Alerting System at the Hong Kong International Airport – An Application of Information and Communication Technologies. Paper presented at the ICT Conference: The Way to Digital City – Sustainable Public Services and Solutions, Hong Kong.
- Chan, P. W., 2010b: Determination of Backscatter-Extinction Coefficient Ratio for LIDAR-Retrieved Aerosol Optical Depth Based on Sunphotometer Data. *Remote Sensing*, 2, 2127–2135.
- Chan, P. W., 2011: Latest aviation applications of LIDAR at the Hong Kong International Airport. Paper presented at the 15th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Los Angeles, California.
- Chan, R. L. M., Chan, P. W. and Cheng, A. Y. S., 2007: Generation of Visibility Map at the Hong Kong International Airport (HKIA) using LIDAR Data. Paper presented at the Third Symposium on Lidar Atmospheric Applications, American Meteorological Society, San Antonio, Texas.
- Hon, K. K. and Chan, P. W., 2020: Alerting of hectometric turbulence features at Hong Kong International Airport using a short-range LIDAR. *Meteorol. Appl.*, 27, e1945.
- ICAO, 2005: DOC 9817-Manual on Low-level Wind Shear and Turbulence.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2017: Airport Low-level Wind Information (ALWIN) starts operation at Haneda and Narita airports. Retrieved from

- https://global.jaxa.jp/press/2017/04/20170419_alwin.html (Oct 21, 2022)
- Japan Meteorological Agency (JMA), 2010: Wind Shear Detection Systems in Japan. Presented at ICAO Asia/Pacific Wind Shear Systems Acquisition Workshop, Bangkok, Thailand.
- Keohan, C. F., Barr, K. and Hannon, S. M., 2006: Evaluation of Pulsed Lidar Wind Hazard Detection at Las Vegas International Airport. Paper presented at the 12th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA.
- Ng, C. W. and Hon, K. K., 2020: Fast Dual-Doppler LiDAR Retrieval of Boundary Layer Wind Profiles. *Weather*, 77, 134–142.
- Proctor, F. H., Hinton D. A. and Bowles R. L., 2000: A Windshear Hazard Index. Paper presented at the 9th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Orlando, Florida.
- Shun, C. M. and Chan, P. W., 2008: Applications of an Infrared Doppler Lidar in Detection of Wind Shear. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 637–655.
- Vrancken, P. et al., 2016: Airborne forward-pointing UV Rayleigh lidar for remote clear air turbulence detection: system design and performance. *Appl. Opt.*, 55, 9314–9328.
- Wong, W. K. and Chan, P. W., 2013: Data Assimilation of Weather Radar and LIDAR for Convection Forecasting and Windshear Alerting in Aviation Applications. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*, Vol. II, 527–554.

表一：日本氣象廳應用於航空氣象的雷達跟光達的儀器規格。(JMA (2010))

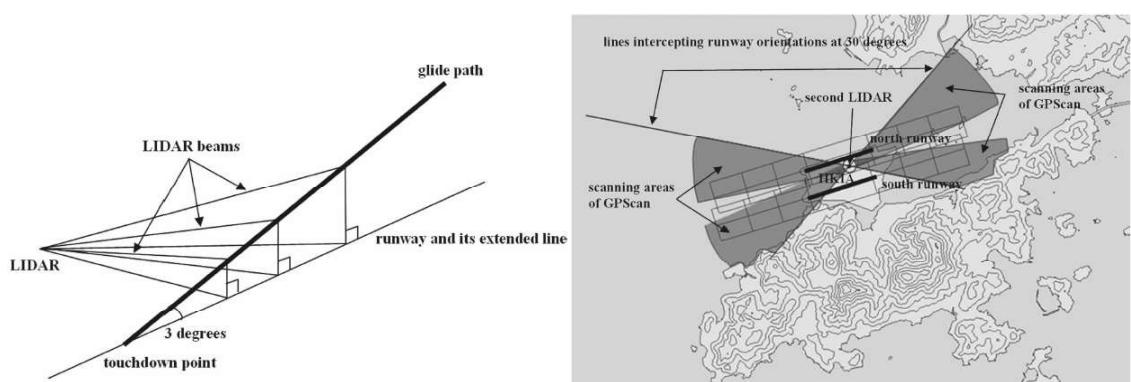
	雷達 TDWR  Kansai(1995)	光達 LIDAR  Tokyo(2007)
頻率/波長	5250~5350MHz (C-band)	2.0μm, 1.6μm
峰值功率	200kW	4.5kW, 7.3kW
脈衝波寬度	1.0μs	0.425μs, 0.300μs
脈衝波重複頻率	840Hz, 1120Hz	500Hz, 750Hz
天線/望遠鏡孔徑直徑	7m (光束寬度小於 0.7°)	10cm, 12cm
接收器靈敏度	-112dBm	--
產品輸出	22 種回波產品 39 種都卜勒速度產品 3 種風切產品	5 種反散射產品 11 種都卜勒速度產品 3 種風切產品

表二：拉斯維加斯麥卡倫機場在 2005 年 7 月 29 日至 10 月 14 日期間進行的低空風切實驗結果 (Keohan et al. (2006))。POD (Probability of Detection) 為偵測率；PFA (Probability of False Alarm) 為虛警率。

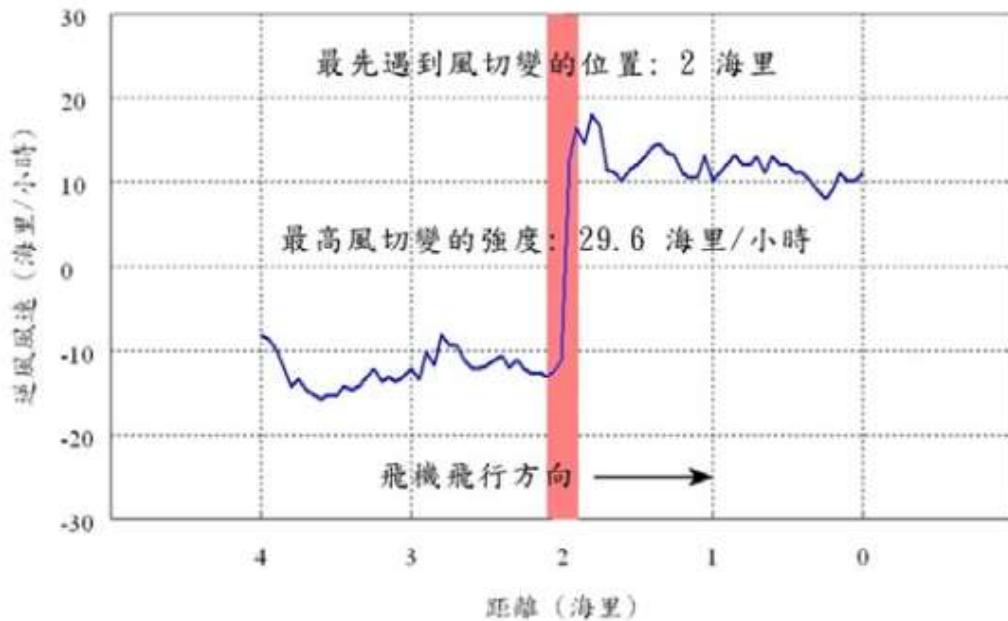
	只有雷達 TDWR	只有光達 LIDAR	雷達 + 光達 ALL
POD	35%	58%	91%
PFA	25%	0%	5%



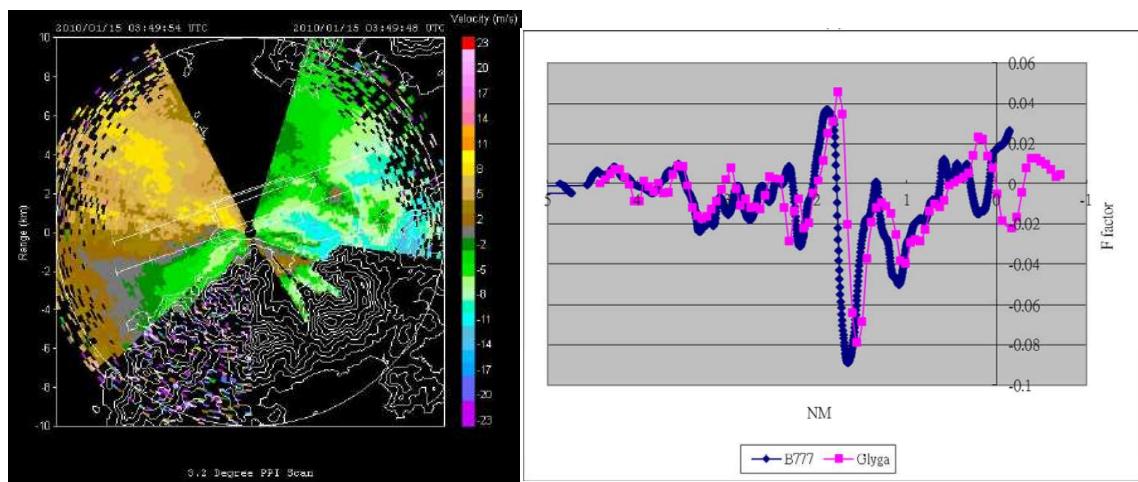
圖一：位於香港國際機場南跑道旁的光學雷達。(Chan (2010a))



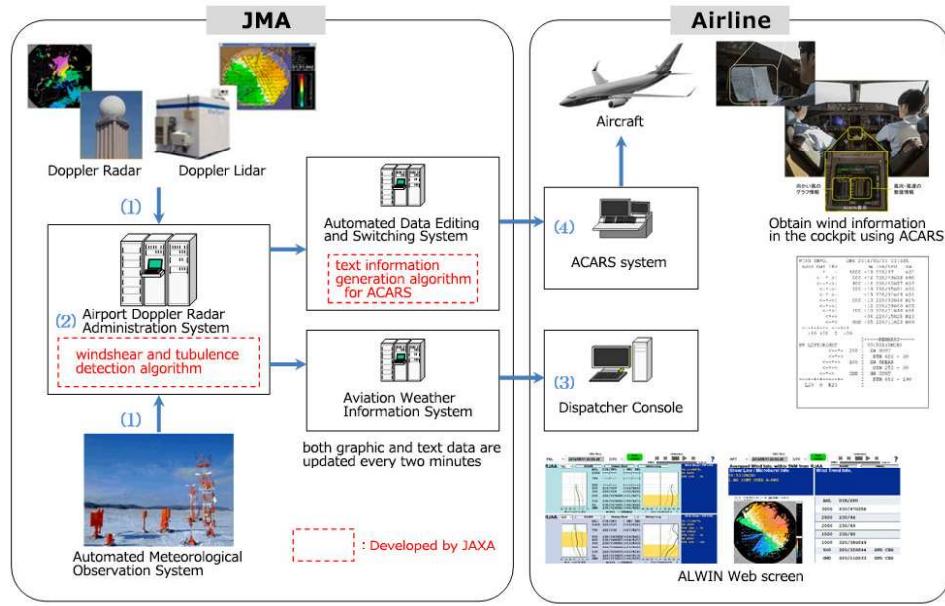
圖二：(左) 香港國際機場光達「下滑道掃瞄」示意圖；(右) 香港國際機場附近地圖，跑道與光達的位置，及「下滑道掃瞄」覆蓋的水平範圍。(Shun and Chan (2008))



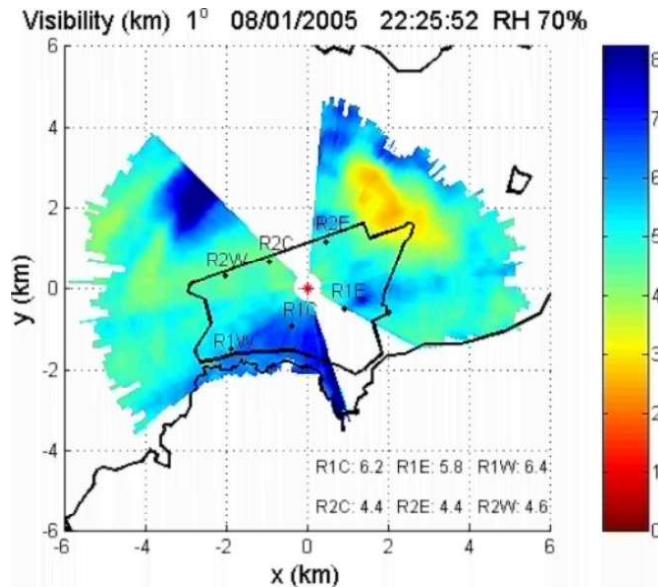
圖三：香港天文台開發的 GLYGA 風切探測運算程序的模擬例子。藍線為逆風廓線，紅色陰影為辨認風切變的「斜坡」，「斜坡」中最大和最小逆風風速之差為風切的強度。(黃與陳，2005)



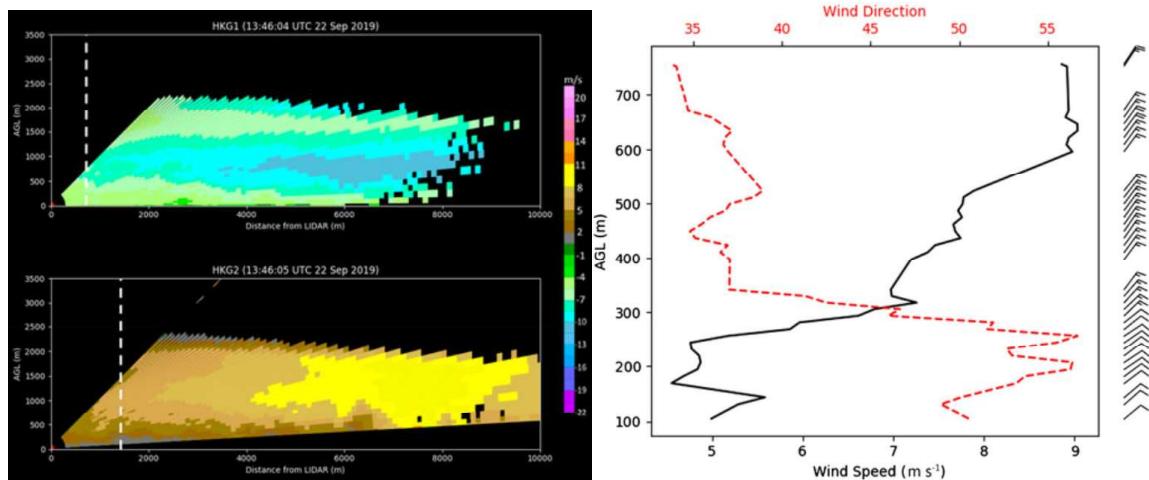
圖四：(左) 2010 年 1 月 15 日 03:50UTC 香港國際機場南跑道光達 3.2° PPI 掃瞄都卜勒速度圖像，冷色代表「向心」風向，暖色代表「離心」風向；(右) 同一天 03:51UTC 一架 B777 型航機量度的 F-Factor (藍線) 以及光達的估算 (粉紅線)。(Chan (2011))



圖五：日本「機場低空風場資訊系統（ALWIN）」系統，自 2017 年起在東京羽田及成田國際機場投入運作。（JAXA (2017)）



圖六：香港機場利用光達反散射功率推算能見度，案例發生於 2005 年 1 月 8 日，當時機場北跑道受霾害影響，向前散射儀量得低於 5 公里的能見度。然而南跑道受盛行東風影響，能見度高於 6 公里。（Chan et al. (2007)）



圖七：香港機場利用雙光達 RHI(左)計算相交點高解析度垂直風廓線(右)，案例為 2019 年 9 月 22 日，當然香港正受東北季風影響。(Ng and Hon (2020))