

利用激光雷達數據製作香港國際機場的能見度圖

陳禮文^(a) 陳柏緯^(b)

(a) 香港城市大學

(b) 香港天文台

摘要

天文台在香港國際機場操作一台激光雷達以預警風切變。該雷達除量度風力外，並提供激光束的反射功率數據。反射功率與大氣中懸浮粒子和水汽的份量有關，可用作推算能見度。

本文探討一個新的運算程式，結合激光雷達的反射功率及在機場運作的前置散射儀的數據來製作能見度圖。這些圖像清楚地顯示低能見度天氣的特徵，例如薄霧和煙霞的來臨及消散。本文將討論它們在實時監測機場能見度的應用。

Generation of visibility map at the Hong Kong International Airport using LIDAR data

R.L.M. Chan^(a) and P.W. Chan^(b)

(a) City University of Hong Kong

(b) Hong Kong Observatory

Abstract

The Hong Kong Observatory operates a Light Detection and Ranging (LIDAR) system at the Hong Kong International Airport for windshear alerting. Apart from wind data, the LIDAR outputs the backscattered power of the laser beam, which is related to the amount of suspending particulates and water vapour in the air and could be used to deduce visibility.

This paper discusses the development of a new algorithm that combines the LIDAR's backscattered power data and measurements from forward scatter sensors at the airport to generate visibility map. The map is found to depict many salient features of low visibility events, such as the arrival and clearance of mist and haze. Its potential application in real-time visibility monitoring at the airport will be discussed.

利用激光雷達數據製作香港國際機場的能見度圖

陳禮文^(a) 陳柏緯^(b)

(a) 香港城市大學

(b) 香港天文台

1. 引言

天文台在香港國際機場操作一部激光雷達(位置見圖 1)，用作風切變預警服務。除了徑向風速外，激光雷達亦提供反射功率數據。文獻[1]探討在煙霞天氣下，基於激光雷達的波長(約 2 微米)與可見光波長衰減系數之間的經驗關係，利用反射功率數據反演能見度。在機場的一些煙霞天氣個案中，由激光雷達推導的能見度與前置散射儀(位置見圖 1)的數據十分吻合。

本文討論一個新的運算方法，結合激光雷達的反射功率與前置散射儀的數據，在不同的天氣情況下製作機場及鄰近地區的能見度圖，而不需倚賴某種特定天氣類型的經驗關係。第二節將介紹能見度圖的製作，這些圖像清楚地顯示機場地區能見度分佈的特徵，第三節將描述多個個案，第四節為本文總結。

2. 能見度圖的製作

機場的激光雷達不斷地作以下掃瞄：

- (a) 平面位置顯示器(Plan-position Indicator, PPI)，仰角為 0 度、1 度及 4.5 度；
- (b) 在兩個方位角作距離—高度顯示器(Range-height Indicator, RHI)；及
- (c) 沿著機場的八個下滑道作掃瞄。

本文只使用從激光雷達 1 度 PPI 掃瞄所得到的反射功率數據來反演機場地區的能見度分佈。

從激光雷達的反射功率廓線 $P(r)$ (其中 r 為離開激光雷達的距離)，首先使用 Klett 反演法[2]得到衰減系數 $\sigma(r)$ 。對於較接近激光雷達的距離，由於光學儀器的限制，須對反射功率作近距修正(near-range correction)，才可應用於反演中。Klett 法並不考慮空氣中分子的瑞利散射(Rayleigh scattering)，對於機場激光雷達的波長來說應可忽略不計。對於距離 r 小於參考距離 r_m ，衰減系數由以下公式求得：

$$\sigma(r) = \frac{\exp[(S(r) - S_m)/k]}{\left\{ \sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_r^{r_m} \exp[(S(r') - S_m)/k] dr' \right\}} \quad (1)$$

其中 $S(r) = \ln(r^2 P(r))$ 是經距離修正的反射功率的對數， $S_m = S(r_m)$ ， $\sigma_m = \sigma(r_m)$ ， k 是與激光雷達波長及氣溶膠性質有關的常數。在 Klett 方法中，氣溶膠的反射系數 β 與空氣的衰減系數 σ 之間假定存在著乘幂關係 $\beta \propto \sigma^k$ 。如文獻[1]，本文中 k 假定為 1。

參考距離 r_m 為激光雷達訊噪比足夠大 ($> -5\text{dB}$) 及激光遇到固定硬物(如建築物及地勢)兩者之間的較短距離，然而一般來說這距離的衰減系數並不知道。本文利用機場內六部前置散射儀量度的能見度的調和平均值(harmonic mean)來估計參考距離的衰減系數，假定激光雷達的波長為 λ ，透過以下聯系可見光範圍中部(0.55 微米)的能見度 V 與衰減系數 σ 的公式[3]：

$$V = \frac{3.91}{\sigma} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3} \quad (2)$$

可從能見度的調和平均值求得 σ_m 。

經過 Klett 反演後，整個衰減系數廓線(距離 r 的函數)須使用前置散射儀數據作調整。首先，從衰減系數廓線讀出近距位置(near-range location)的系數值 σ_n ，近距位置定義為激光量度徑向與半徑約 1 公里的近距「圓形」(位置見圖 1)的相交點。然後，利用前置散射儀數據求出近距位置的參考衰減

係數 σ_r ，方法是透過公式(2)計算每部散射儀的衰減係數，再使用徑向基礎函數(radial basis function，文獻[4])計算加權平均值：

$$\sigma_r = \frac{\sum_{i=1}^6 w_i \sigma_i}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad \text{其中} \quad w_i = 1/d_i^2 \quad (3)$$

d_i 為近距位置與第 i 部散射儀的距離， σ_i 為該散射儀的衰減係數。最後， σ_n 與 σ_r 值的相差用作調節整條衰減係數廓線。以上過程重覆應用在激光雷達的所有量度徑向上。

利用公式(2)把衰減係數的分佈轉化為能見度圖，在本文中的圖像皆在方向角上作 9 至 11 度平均，及徑向上作 300 米平均。

3. 能見度分佈個案

以下討論三個不同天氣情況下的能見度個案。

3.1 2004 年 4 月 1 日 – 帶狀薄霧

機場在該日清晨時能見度良好，前置散射儀量度的數字為 9 至 11 公里。然而從能見度圖(圖 2a)，可見有一條能見度只有約 4 公里的低能見度帶，從老虎頭以南山谷(位置見圖 1)一直伸延至機場以北。由激光雷達的風速圖(圖 2b)，可見低能見度帶內主要吹東至東南風。

當時在大嶼山上游地區受薄霧影響，天文台的能見度下降至只有約 3000 米。從當日早上 8 時的溫熵圖，可見離地面 280 至 450 米高度上存在著幅度為數度攝氏的逆溫層(圖 2c)。近地面較穩定的大氣使底層東風大部份被大嶼山阻擋(大嶼山的山峰達到離海平面約 1 公里)，但東風仍可攀過較低的山谷(如老虎頭以南只有 150 米高的山谷)，把上游地區的薄霧帶進機場

鄰近區域。因此，機場以東及以北地方出現弧形薄霧帶。另一條位於機場以西的低能見度帶(圖 2a)則可能與攀過大風坳(位置見圖 1)的氣流有關。

3.2 2004 年 5 月 20 日 – 薄霧的局部消散

一股季末的北風潮在該日清晨影響華南沿岸。機場在午夜過後有薄霧及微雨，能見度只有約 1800 米。西北風隨後稍為增強，在早上 2 時至 3 時期間，機場的露點下降 1 度，機場內及以北地區的能見度亦上升至 5 至 6 公里(圖 3a)，同時機場以東及以西海域的能見度則持續偏低，只有 2 至 3 公里。與此相反，從激光雷達的風速圖像(圖 3c)可見整個機場區域吹頗為平均的西北風。

這股較弱的北風潮帶來較乾燥的空氣(如露點下降所顯示)，使機場鄰近地區的薄霧消散，在早上較後時間能見度普遍上升至 6 公里或以上(圖 3b)。

3.3 2005 年 1 月 8 日 – 西北風下的煙霞

該日黃昏時，機場吹輕微東風，能見度約 6 公里。西北風在珠江口向南擴展，在 10 時半左右到達機場北部。受煙霞影響，北跑道的能見度轉差，前置散射儀量度的能見度下降至 5 公里以下。另一方面，南跑道仍然主要受盛行東風影響，能見度維持在約 6 公里。能見度圖(圖 4a)亦顯示煙霞分佈很不平均，機場以北一兩公里的地方能見度較高(達 8 公里)，但同時機場東北面海域的能見度只有約 2000 米，可能與西北風與背景東風相遇有關。

4. 結論

本文討論一個新的方法，結合激光雷達的反射功率及激光雷達覆蓋範圍內有限數目的前置散射儀數據，製作能見度圖像。本文主要使用 Klett 反演

法，但作出以下改進：(i)利用散射儀能見度值的調和平均，對參考距離的衰減系數值作初步估算；及(ii)所反演的衰減系數廓線，使用散射儀數據的加權平均來作調整。

用以上方法產生的能見度圖清楚地顯示機場鄰近地區一些有趣的能見度分佈，它可以應用於不同的低能見度天氣，包括薄霧和煙霞。與前置散射儀的量度比較，能見度圖大大增加了監測範圍，可應用於機場及其他地區的低能見度短時預報。當然，由於激光在非常潮濕的空氣中衰減極快，能見度圖在霧及大雨的天氣下應用較為有限。

參考文獻

- [1] Chan, P.W., 2003: Application of LIDAR backscattered power to visibility monitoring at the Hong Kong International Airport: some initial results. *6th International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technologies*, Leipzig, Germany.
- [2] Klett, J.D., 1981: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics*, **20**, 211-220.
- [3] Hinkley, E., 1976: *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Springer-Verlag, 416 pp.
- [4] Hon, Y.C., and R. Schaback, 2001: On unsymmetric collocation by radial basis functions, *Applied Mathematics and Computation*, **119**, 177-186.

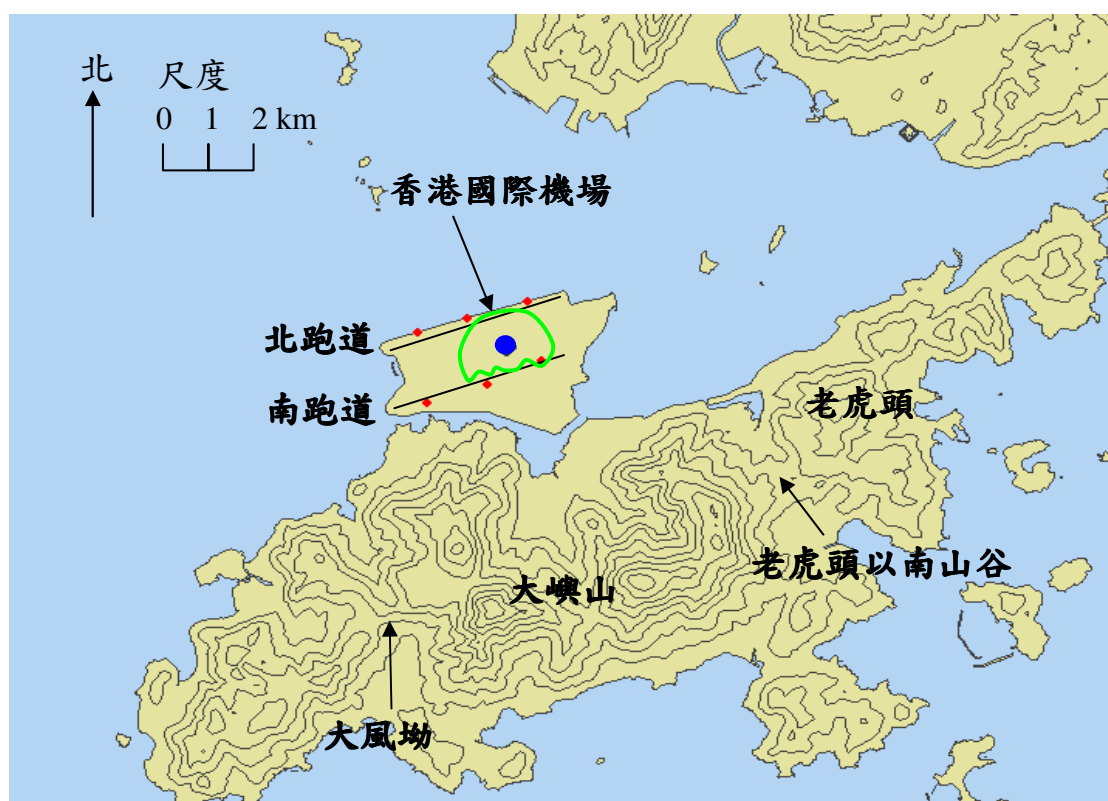


圖 1 激光雷達(藍點)及前置散射儀(紅點)的位置，近距「圓形」(第二節)以淺綠色顯示。等高線相隔 100 米。

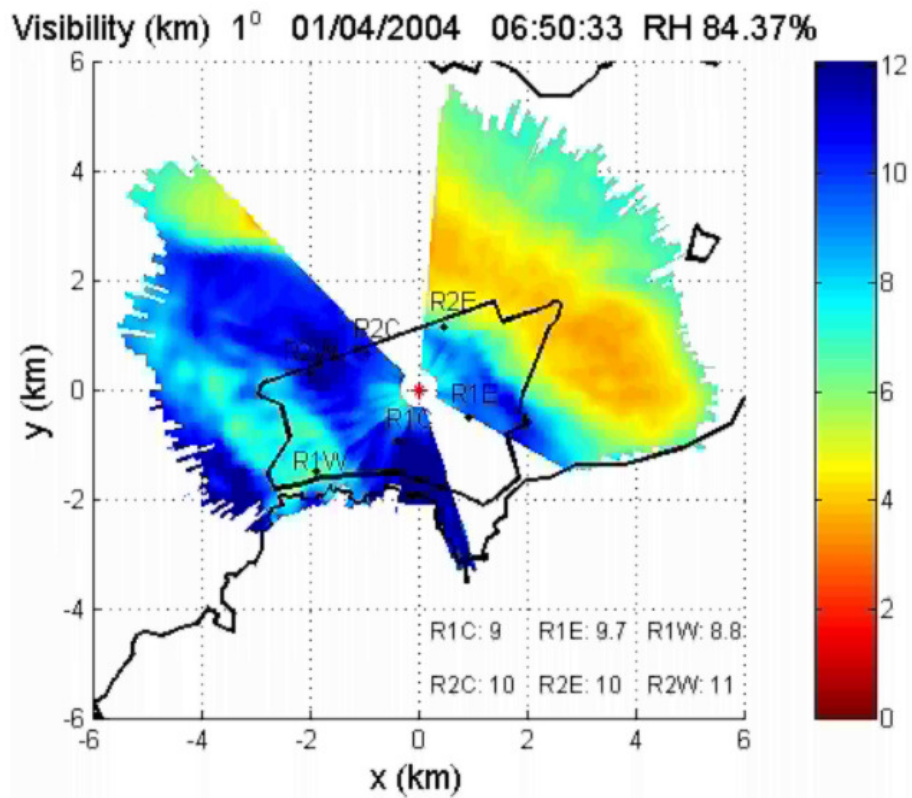


圖 2(a) 2004 年 4 月 1 日早上 6 時 51 分的能見度圖，彩色尺度中能見度的單位是公里，前置散射儀的數據在圖下方顯示，機場的濕度顯示在圖的上方。

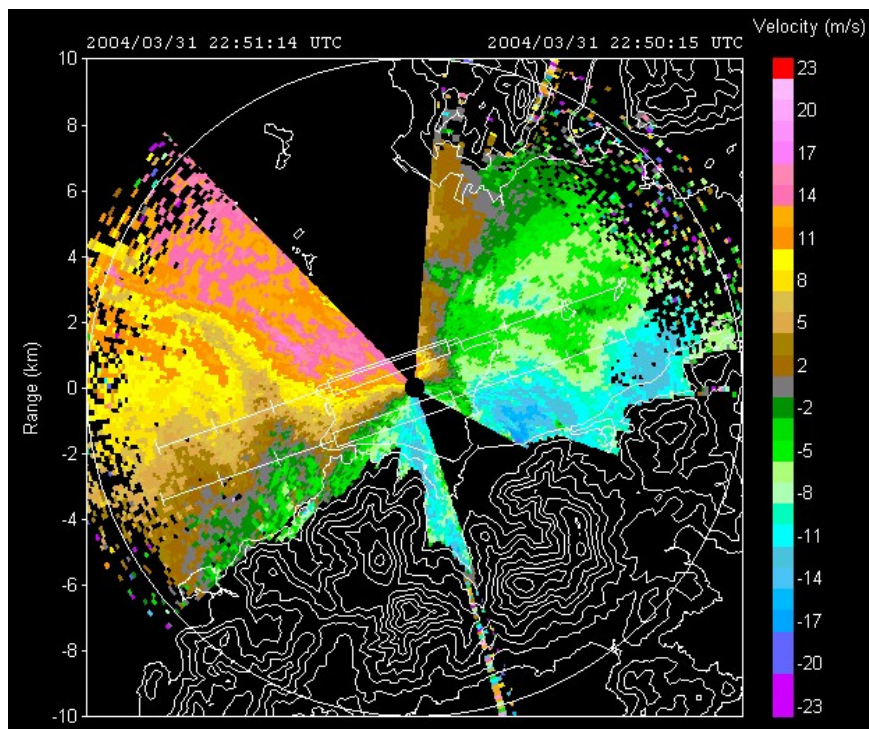


圖 2(b) 是同時間激光雷達 1 度 PPI 掃描的徑向風圖，彩色尺度中徑向風的單位是米/秒，暖/冷色表示離開/趨向雷達的風。

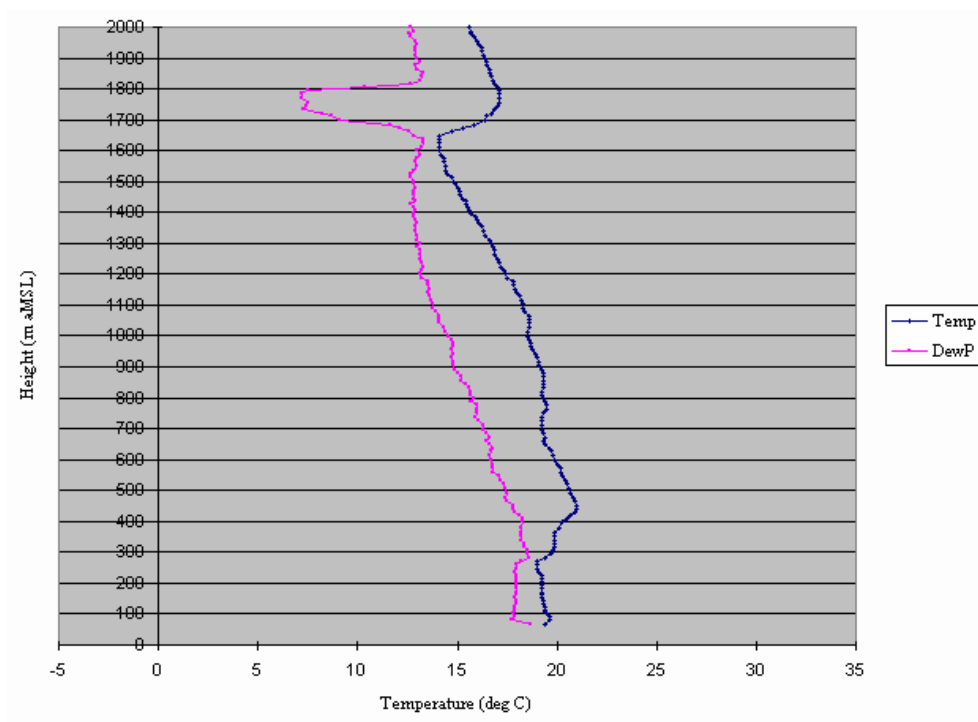


圖 2(c) 顯示 2004 年 4 月 1 日早上 8 時香港的探空數據，藍/粉紅色分別為離海平面 2000 米的溫度/露點廓線。

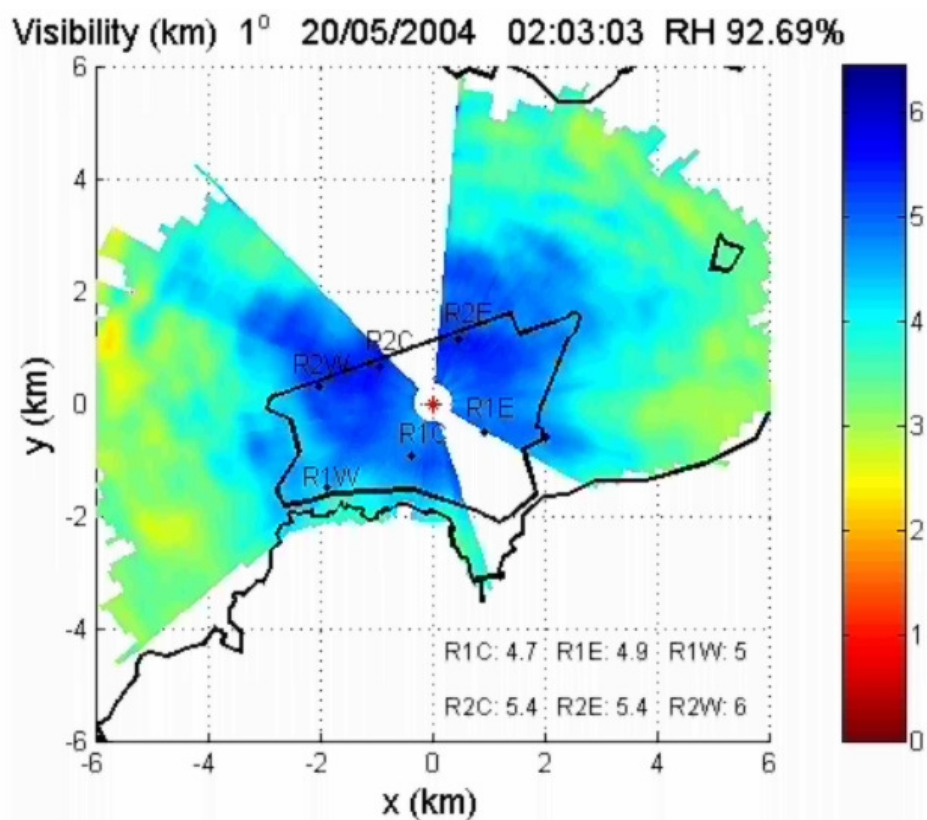


圖 3(a) 2004 年 5 月 20 日上午 2 時及 3 時 30 分的能見度圖。

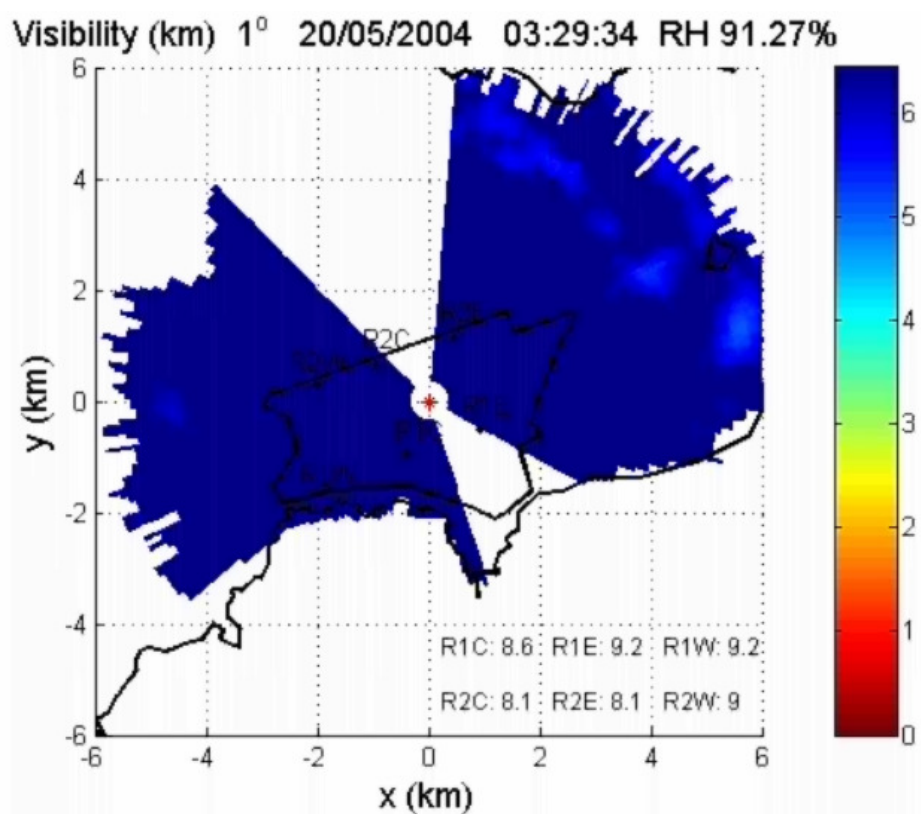


圖 3(b) 2004 年 5 月 20 日上午 2 時及 3 時 30 分的能見度圖。

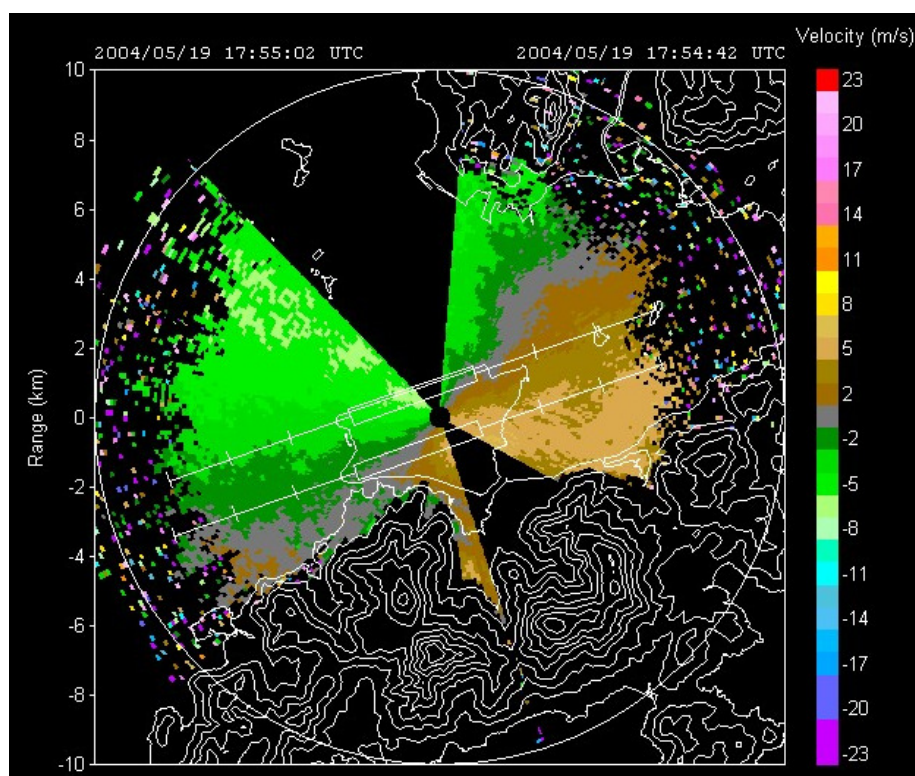


圖 3(c) 與圖 3 (a)同時間的徑向風圖像。

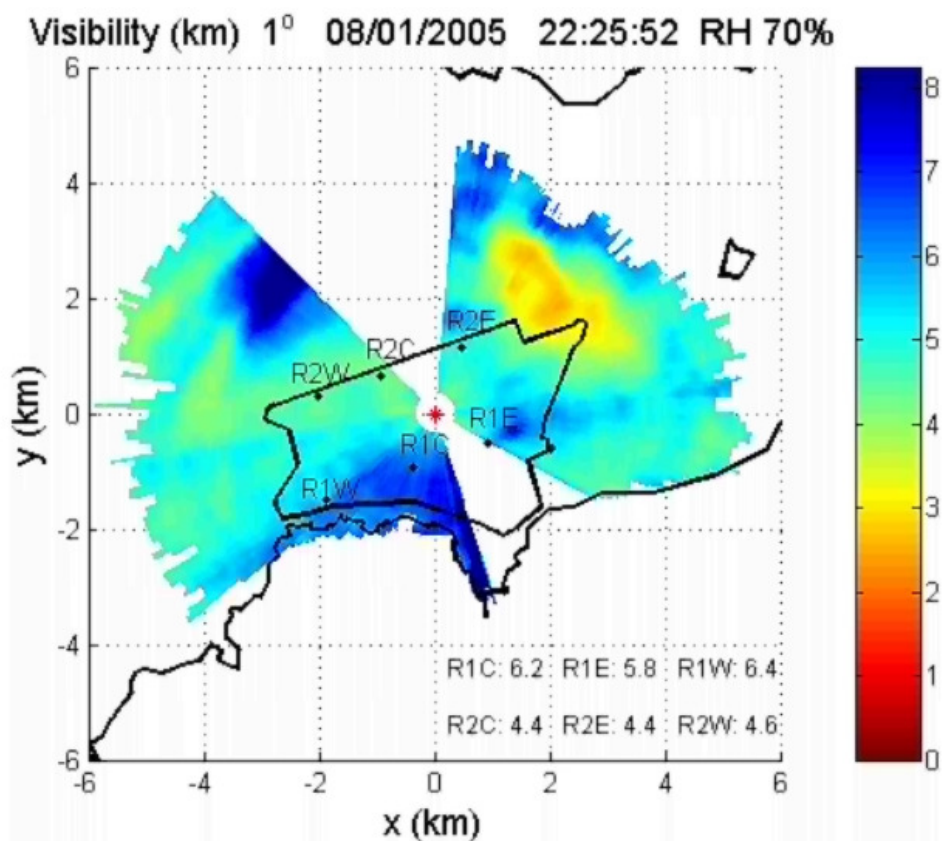


圖 4(a) 2005 年 1 月 8 日上午 10 時 26 分的能見度圖。

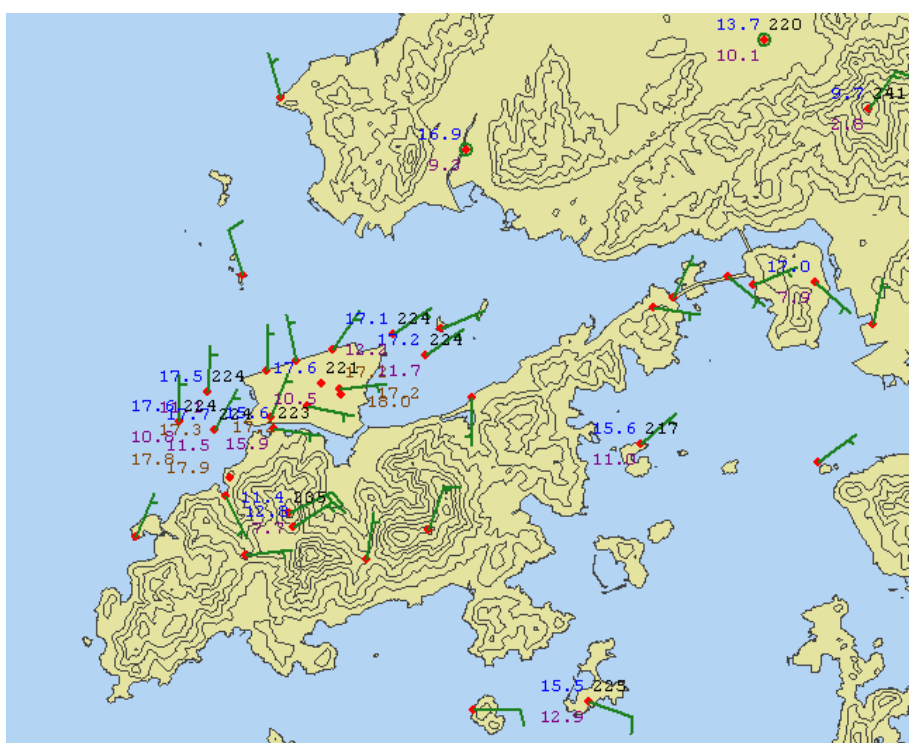


圖 4 (b) 同時間機場鄰近地區自動氣象站(紅點)所量度的風(綠色風矢)。