

多普勒激光雷達在熱帶氣旋方面的觀測

胡仲偉 李淑明

香港天文台

摘要

香港天文台於 2002 年中在香港國際機場裝置了一套激光雷達系統。該系統設置於空中交通管制大樓上，能讓激光雷達系統掃瞄兩條平行跑道的升降區，便於探測影響飛機升降的風切變。激光雷達利用紅外線探測空氣中塵粒和微細粒子的移動，在無雨情況下最能發揮作用。

激光雷達在 7 月底完成驗收後已開始試驗性運行，至今已觀測到一些前所未見的現象，其中分別在 8 及 9 月當熱帶氣旋黃蜂和黑格比趨近香港時，激光雷達成功捕捉到熱帶氣旋環流經過機場南面的山脊和山谷後形成的風場特徵。本文將展示這些激光雷達觀測資料，並與機場多普勒天氣雷達資料進行比較，從而探討由地形引起的風場變化。

Doppler LIDAR Observations under Tropical Cyclone Situations

C.W. Wu and Olivia S.M. Lee

Hong Kong Observatory

Abstract

The Hong Kong Observatory implemented a Doppler Light And Ranging (LIDAR) System at the Hong Kong International Airport (HKIA) in mid-2002. Located on the Air Traffic Control Complex (ATCX) between the two parallel runways of the HKIA, the LIDAR is able to scan the approach and departure corridors of the HKIA and detect wind shear affecting departing/landing aircraft. It makes use of infrared radiation to detect the movement of aerosols and works best under rain-free conditions.

The Doppler LIDAR has been on trial operation after system acceptance in late July 2002. Despite the short time, the Doppler LIDAR has detected phenomena not observed before. In particular, in August and September during the approach of Vongfong and Hagupit, the LIDAR was able to capture the wind pattern induced by the storms' outer circulations which crossed the ridges and valleys of the terrain to the south of the airport. This paper presents the LIDAR observations for these cases. Comparison of LIDAR observations with those of the Terminal Doppler Weather Radar is also made with a view to better understanding the effect of terrain on the wind pattern.

多普勒激光雷達在熱帶氣旋方面的觀測

胡仲偉 李淑明

香港天文台

1. 香港國際機場的地理環境

香港國際機場(圖一)位於大嶼山的北面。大嶼山是東北至西南走向，約二十公里長和五公里寬。當中的一系列山峰如彌勒山、鳳凰山、大東山、二東山和蓮花山，形成一個半月形的屏障，而在它們中間的山谷有大風坳和伯公坳等。山峰高度達到 700 至 950 米，而山谷高度約 350 米至 450 米。

當香港吹東、東南、南或西南風時，香港國際機場處於大嶼山山脈的下風位。受到了山脈的阻隔，氣流會出現擾動，並引致山脈的下風地方產生不同程度的風切變和湍流，足以影響正在香港國際機場升降的航機。

2. 機場多普勒天氣雷達和激光雷達

位於大欖涌的機場多普勒天氣雷達—Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) 在 1996 年投入服務，是專為監測機場附近的低空風切變而設。其過去數年的表現顯示它在雨天時最能發揮作用。然而，風切變在晴天時也會發生，在這些情況下，便需要一台能接收空氣裏塵粒和微細粒子回波信號以便監測風切變的新儀器，即激光雷達 – Light Detection And Ranging (LIDAR) System。

2002 年 6 月底，香港天文台在香港國際機場設置了一台激光雷達以輔助機場多普勒天氣雷達來監察機場附近的氣流狀況[1]。激光雷達坐落於香港國際機場航空交通管制大樓天台，離海平面約 50 米，可掃描整個航機的升降區。激光雷達發射紅外線光束，波長 2 微米，能準確地量度空氣中塵粒和微細粒子的徑向風速，從而顯示氣流的變化。

3. 激光雷達的掃描策略

激光雷達自 2002 年 7 月作試驗性運行以來，正不斷進行系統優化，其中一個重要環節是制訂有效的掃描策略。在 2002 年 8 月，即熱帶氣旋黃蜂趨近香港時，激光雷達主要作下述的掃描：

- (i) 仰角為 1.8 度、2.8 度和 5.7 度的平面位置顯示器 (Plan Position Indicator, PPI)；
- (ii) 東涌峽(見圖一)方向的距離高度顯示器 (Range Height Indicator, RHI)；
- (iii) 平行於跑道方向的 RHI。

仰角為 1.8 度及 2.8 度的 PPI 是用作監察飛機降落時的風場變化。仰角為 5.7 度的 PPI 可用作監察飛機起飛時的風場變化。另外東涌峽的 RHI 是用

作剖析氣流越過大嶼山山谷後的變化，而平行跑道的 RHI 是為了觀測跑道附近上空的風場而設的。

同年 9 月(熱帶氣旋黑格比趨近香港前)，為了要進一步了解由地形引致的低空風切變，激光雷達新增了一個仰角為 1.0 度的 PPI。同時亦增加了老虎頭(見圖一)方向的 RHI，這對監測跨越機場東南面的大嶼山山脈的氣流變化有一定幫助。

下文利用 2002 年 8 月熱帶氣旋黃蜂及 9 月黑格比的個案來比較激光雷達和機場多普勒天氣雷達的觀測資料。

4. 熱帶氣旋黃蜂的發展及移動途徑

黃蜂於 2002 年 8 月 15 日在西沙島東南偏南約 280 公里處發展為一熱帶低氣壓(見圖二)。初時黃蜂向東北緩慢移動，其後在 8 月 17 日轉向西北偏西推進。黃蜂於 8 月 18 日增強為一熱帶風暴後再轉向西北偏北移動。8 月 19 日，黃蜂加速移向廣東西部海岸，並於當日下午增強為一強烈熱帶風暴。本港轉吹東至東南風，離岸及高地風力達強風程度。黃蜂在當日晚上最接近香港時位於香港西南偏西約 390 公里。黃蜂於 19 日晚上掠過海南島東北岸後，在湛江附近登陸。

5. 黃蜂為香港國際機場帶來的風場變化及風切變

在 8 月 18 日至 8 月 20 日期間，香港天文台共收到 24 個顯著風切變及湍流的飛機報告，另外有 3 班航機在著陸途中受風切變影響而需要復飛。在這 3 日中有降雨的時候，機場多普勒天氣雷達接收的訊號相當清晰，能有效地監察機場附近的風場變化，而當雨勢減弱時，激光雷達便發揮作用。例如在 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 30 分至 6 時 30 分(09:30 至 10:30 世界協調時 (UTC))，當時正下著微雨，而黃蜂位於香港西南偏西方向(見圖二)，本港普遍吹東南風(見圖三)，期間有 3 班航機從西面降落北跑道時遇上風切變(見表一)。

表一 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 30 分至 6 時 30 分 (09:30 至 10:30 UTC) 期間收到的風切變報告

香港時間	位置	航機遇上之風切變
下午 5 : 49	高度 300 呎，約距離著陸區(TDZ) 1 海里	減速達 15 海里/小時
下午 6 : 06	距離著陸區 1 海里	減速達 20 海里/小時
下午 6 : 30	高度 300 呎以下，約距離著陸區 1 海里內	增速達 20 海里/小時

以下我們利用京士柏高空氣象站在下午八時(12 UTC)的探空來分析當時的背景風場。由於在高度 500 米以下的探空風場可能受到該站附近地形影響，所以我們選取了高度 500 至 1000 米的探空風場來分析氣流情況。當時正吹東南風，風速 U 約 18 米 / 秒。若利用探空位溫來計算 Brunt-Väisälä 頻率(N)，得 N 為 0.018 弧度 / 秒。在這東南風的情況下機場處於大東山及蓮花山這組山脈的下風位，如代入山脈高度 H 約 900 米，得 $NH/U=0.9$ 。過往一些研究[2]結果顯示若 $NH/U<1.1$ ，山脈下風位會出現渦旋或擾動氣流。上面的計算表明，機場上空有條件出現渦旋或擾動氣流。

事實上機場多普勒天氣雷達(見圖四)能夠捕捉到這些渦旋或擾動氣流。留意圖四中貼近大嶼山山脈下風位的氣流大致是遠離雷達的(啡、黃色)。但當中亦出現一些徑向速度趨向雷達(綠色)的區域(橢圓標誌)，這顯示渦旋或擾動氣流的出現。

由於當時雨勢輕微，機場多普勒天氣雷達的雜波較多，雷達圖象顯示下風位的氣流狀況並不太明顯。而激光雷達的徑向風速資料(見圖五)則能清楚的顯示擾動氣流的情況(橢圓標誌)。

若仔細分析激光雷達圖像(見圖六)，可清楚看見大嶼山山脈下風位出現一些徑向速度離開雷達的高風速條紋($V-H1, V-H2$)，這些位置的風速較附近地方高，相信是東南風穿越山谷後的高速氣流。另一方面，貼近大嶼山山脈下游出現一低風速區域($V-L1, V-L2$)，當中夾雜了一些徑向速度趨向雷達的區域(綠色)，這些低風速區域是因山脈的影響而產生的擾動氣流，我們從圖像的時間序列中觀察到這擾動氣流擴散至北跑道區域。基於上述資料，我們推斷在北跑道降落的航機是在穿越這些高速及低速氣流時遇上風切變。

為了方便說明航機遇上的風切變，我們利用 Hovmüller 圖(見圖七)來表達激光雷達在仰角為 1.8 度、極方位角為 262.2 度(見圖六)的一條激光光束的徑向速度時間序列。這光束貼近北跑道，亦接近但稍高於飛機的下滑航道。在著陸區前 1 海里處，LIDAR 仰角 1.8 度的光束高於下滑航道約 300 呎。雖然掃瞄範圍稍為高於航道，但利用其徑向風速來估計飛機降落時遇到的風場變化，仍具有一定的代表性。留意圖七中可看到對應圖六的高 / 低風速條紋 / 區域($V-H1, V-H2$ 及 $V-L1, V-L2$)，由於有渦旋 / 擾動氣流經過，這些高 / 低風速條紋 / 區域在 Hovmüller 圖並非成直線。相信 3 班航機在降落時穿越了這些交錯的高 / 低風速區域時，遇上風切變。圖中紅線標誌著從激光雷達徑向速度估計 3 班航機遇上的風場變化，計算出來的風切變跟航機報告的數值(見表一)大致吻合。由此可見激光雷達在監察風切變方面確實起了積極作用。

6. 熱帶氣旋黑格比的發展及移動途徑

黑格比於 2002 年 9 月 10 日在東沙島東南約 140 公里處發展為一熱帶低氣壓(參考圖二)，並穩定地在南海北部向西北偏西移動。黑格比於當晚迅速增強為一熱帶風暴，並在 9 月 11 日進一步增強為一強烈熱帶風暴，中心附近的最高風速約為每小時 110 公里。當黑格比於 9 月 11 日早上移向廣東沿岸並繼續增強時，本港亦轉吹偏東強風，離岸地區風勢更達烈風程度。在其後數小時，黑格比繼續向廣東沿岸推進，本港風向亦由東轉為東南，離岸及高地的風勢達暴風程度。黑格比最接近香港時位於香港西南偏南約 150 公里。隨著黑格比向西移離香港，本地風力在 9 月 12 日普遍減弱。黑格比於當日在廣東西部的陽江附近登陸，隨後逐步減弱為熱帶低氣壓。

7. 黑格比為香港國際機場帶來的風場變化及風切變

在黑格比影響本港期間，香港國際機場有超過 40 班航機需要取消離港及多班航機出現延誤。由 9 月 11 日至 9 月 12 日，香港天文台共收到 24 班航機在著陸途中受風切變影響而要復飛，另外有 5 個顯著風切變及湍流的飛機報告。

例如在 9 月 11 日下午 6 時 30 分至 7 時 30 分(10:30 至 11:30 世界協調時 (UTC))共有 3 班航機分別在下午 6 時 53 分，7 時 05 分及 7 時 10 分從西面降落北跑道時，在著陸區附近受風切變影響而要復飛。當時黑格比正位於香港西南偏西方向(見圖二)，本港普遍吹東南偏東風(見圖八)。

我們利用京士柏高空氣象站當日下午八時(12 UTC)的探空分析當時的背景風場。由高度 500 至 800 米的探空風場得知當時正吹東南偏東風，風速 U 約 25 米 / 秒。若利用探空位溫來計算 Brunt-Väisälä 頻率(N)，得 N 為 0.006 弧度 / 秒。跟黃峰的情況相似，在東南偏東風的背景風下機場處於大東山及蓮花山這組山脈的下風位，如代入山脈高度 H 約 900 米，得 $NH/U=0.216<1.1$ ，即已具備山脈下風位出現渦旋/擾動氣流的條件。

事實上從機場多普勒天氣雷達圖像(見圖九)確實發現山脈下風位出現渦旋/擾動氣流(橢圓標誌)，這點跟黃峰的情況相若，唯一不同之處在於黑格比的擾動氣流比黃峰較接近大嶼山。

同樣，從激光雷達的圖像(見圖十)也看見這些渦旋/擾動氣流(橢圓標誌)。值得一提的是，由於當時雨勢較大，機場多普勒天氣雷達接受的訊號較黃峰時強，因此天氣雷達資料質素可媲美激光雷達。

若仔細分析機場多普勒天氣雷達及激光雷達圖像(見圖十一)，可清楚看見除了擾動氣流外，大嶼山山脈下風位也出現一些徑向速度離開雷達的、互相交錯的高低風速條紋，這些條紋相信為東風穿越山谷和繞過山脊後的氣流，其影響範圍伸展至北跑道。

我們同樣利用 Hovmüller 圖來說明航機遇上風切變。圖十二(a)及(b)分別表達機場多普勒天氣雷達在仰角為 0.6 度、極方位角為 247 度的一條雷達波束的徑向速度時間序列及激光雷達在仰角為 1.0 度、極方位角為 262.2 度的一條光束的徑向速度時間序列。這兩波束貼近北跑道，而略高於飛機的下滑航道。在距離著陸區 1 海里處，機場多普勒天氣雷達的 0.6 度仰角波束高於下滑航道約 500 呎，而激光雷達的在 1.0 度仰角光束則高於下滑航道約 100 呎。由於波束和光速掃描的地方並非重疊，上述兩圖所顯示的具體氣流變化有所不同，但從兩台雷達的徑向風速來估計飛機降落時遇到的風速變化，仍具有一定的代表性。留意圖十二(a) 及(b)中分別顯示的高速(H-H1, H-H2)及低速(H-L1, H-L2)氣流十分相對應，並與圖十一穿越大嶼山山脈的高低風速氣流吻合。我們推斷在北跑道降落的航機是依次穿越低速及高速氣流，導致增速，偏離下滑航道，需要復飛。這些航機並未有提供當時遇到風切變的強度，但從圖十二的 Hovmüller 圖估計，穿越 H-L1 及 H-H1 時遇到最大的增速可達 21 海里/小時(10.5 米 / 秒)。

8. 總結

激光雷達自 2002 年中安裝後不久，即遇上兩個颱風個案。以上分析顯示它跟機場多普勒天氣雷達一樣具備捕捉由地形引致的風切變的能力，所以激光雷達對加強風切變預警有一定幫助。

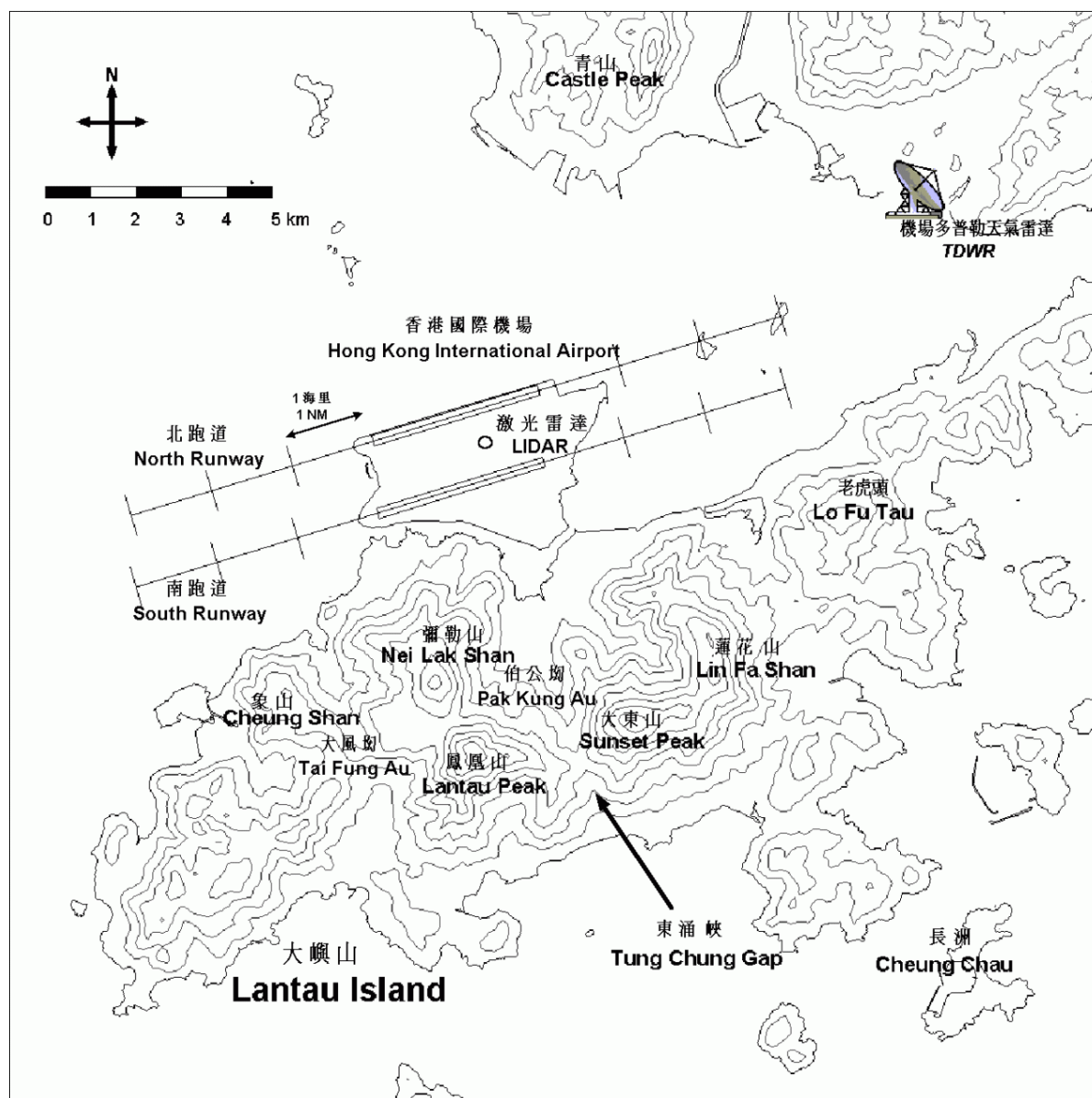
黃峰和黑格比兩個案也充分說明激光雷達和機場多普勒天氣雷達在不同天氣情況下分別發揮作用。在無雨(黃峰)時激光雷達表現較佳，而雨勢較大時(黑格比)，機場多普勒天氣雷達發揮相當好。我們利用黑格比的個案比較兩台雷達的數據，發現兩者風場資料吻合，產生相輔相承的作用。

激光雷達和機場多普勒天氣雷達的結合使用，使天文台能夠更全面地在雨天和晴天裡探測風切變。航空預報員廿四小時不斷利用這些資料，於有需要時發出風切變及湍流預警。

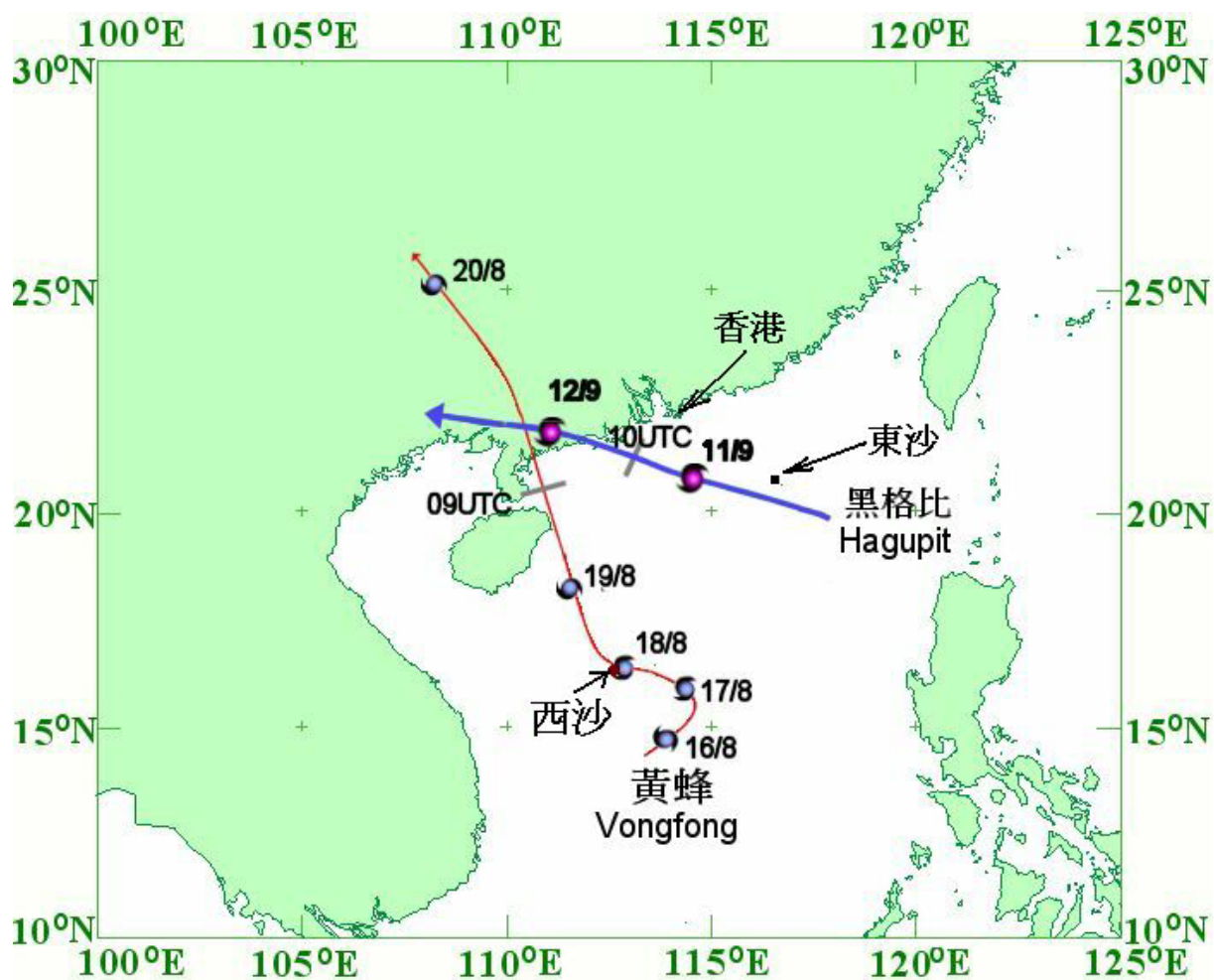
激光雷達將繼續作試驗性運行，天文台會收集足夠數據進行分析，並開發軟件，以優化系統的效能。

參考文獻

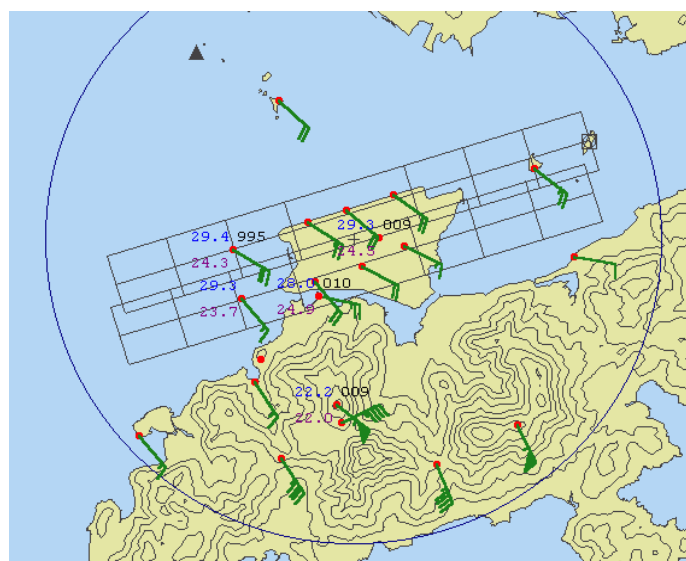
- [1] C.M. Shun and S.Y. Lau , “Implementation of a Doppler Light Detection and Ranging (LIDAR) System for the Hong Kong International Airport”, paper presented in AMS 10th Conference Aviation, Range and Aerospace Meteorology 2002.
- [2] Lin, Q., W.R. Lindberg, D.L. Boyer and H.J.S. Fernando, 1992: “Stratified flow past a sphere”, J. Fluid Mech., 240, 315-354



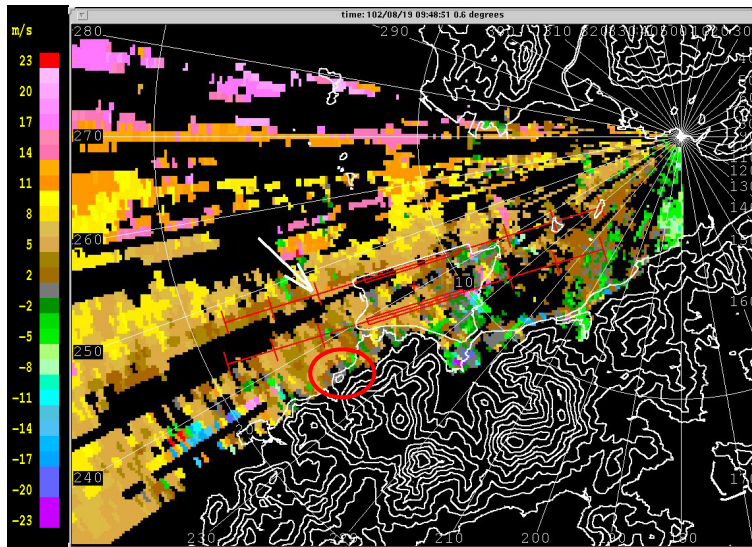
圖一 香港國際機場附近的地理環境。圖中等高線的間隔為 100 米。



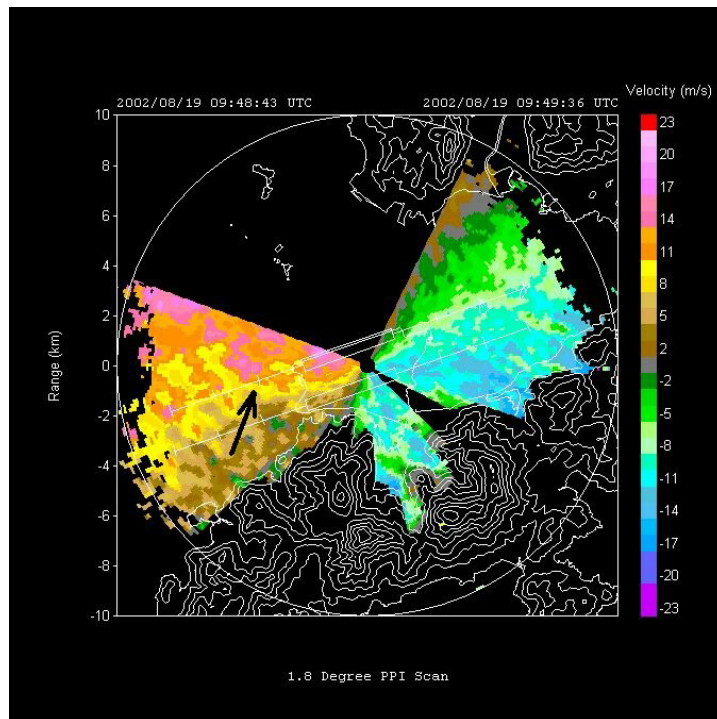
圖二 熱帶氣旋黃蜂及黑格比路徑圖，圖中颱風符號標誌熱帶氣旋中心在上午八時(00UTC)的位置



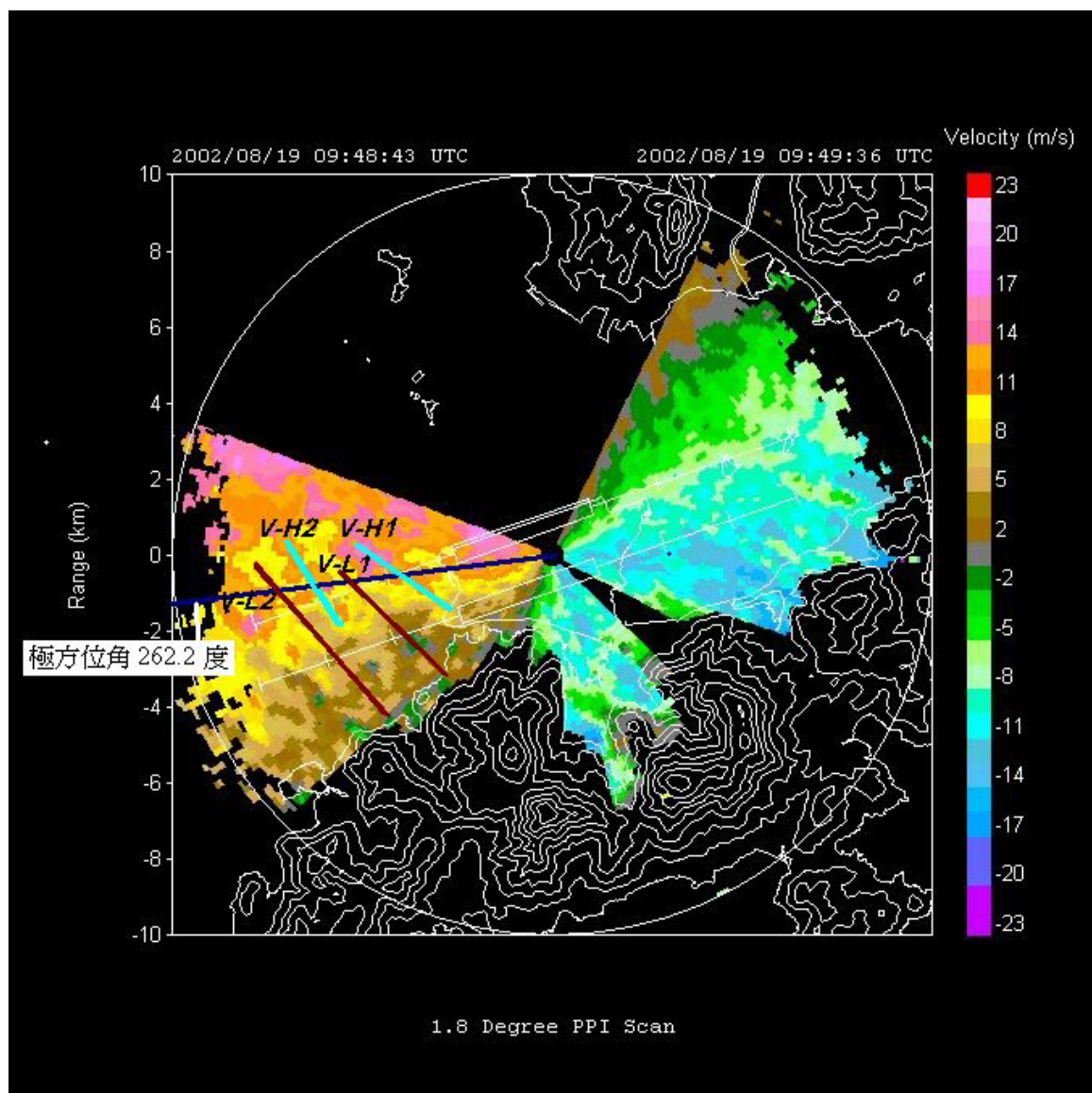
圖三 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 49 分(09:49 UTC)大嶼山附近自動氣象站顯示地面吹東南風。



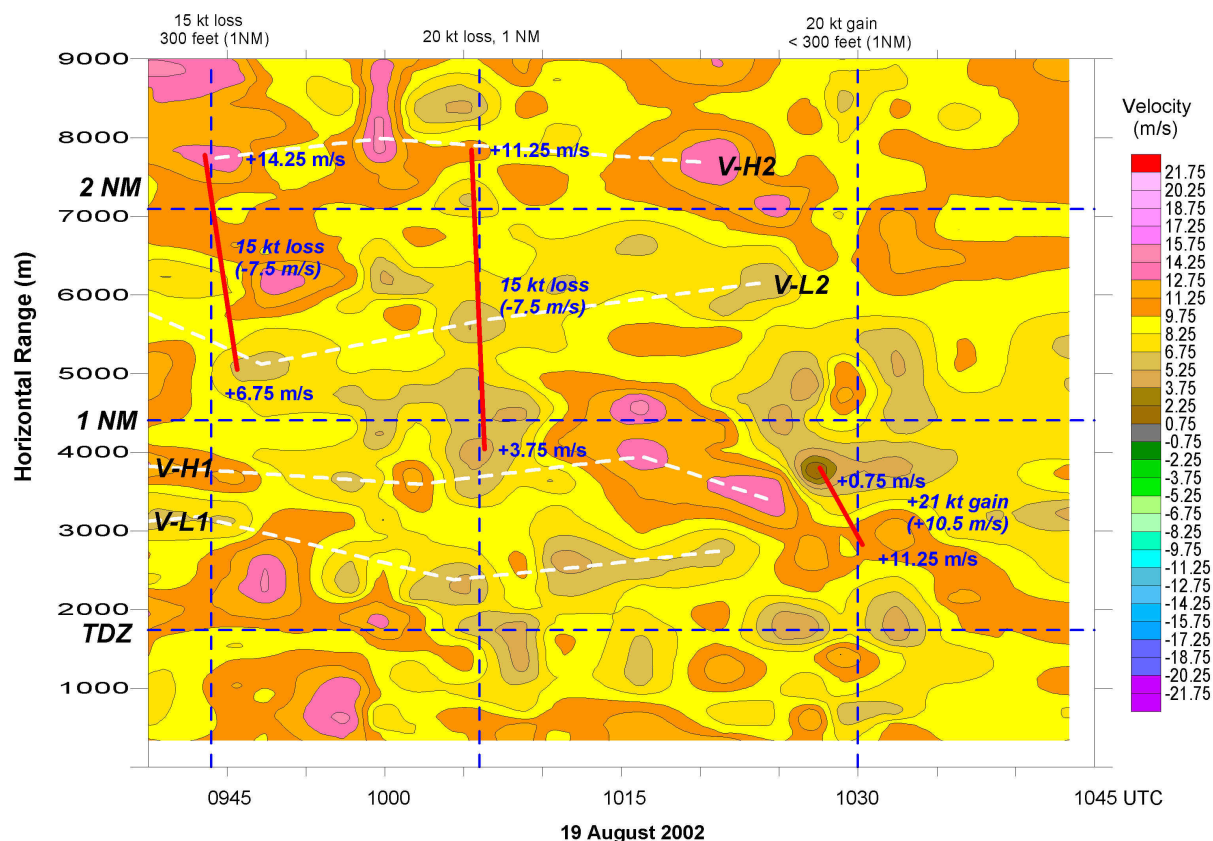
圖四 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 49 分(09:49 UTC)機場多普勒天氣雷達在仰角為 0.6 度的 PPI 徑向速度圖像。圖中以箭頭標示的地方為航機從西面降落北跑道時遇上風切變的位置。



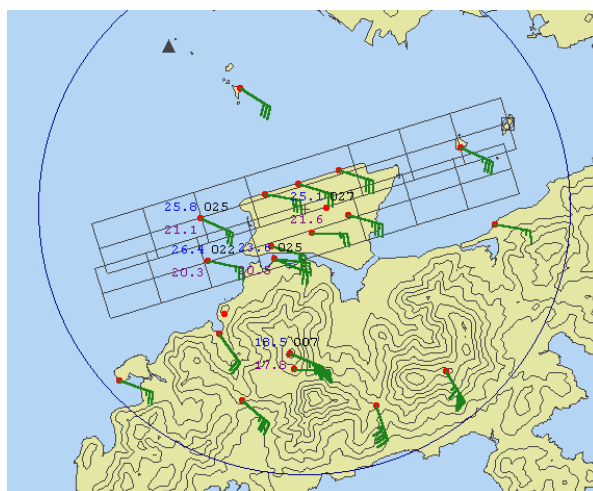
圖五 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 49 分(09:49 UTC)激光雷達在仰角為 1.8 度的 PPI 徑向速度圖像，圖中以箭頭標示的地方為航機從西面降落北跑道時遇上風切變的位置。



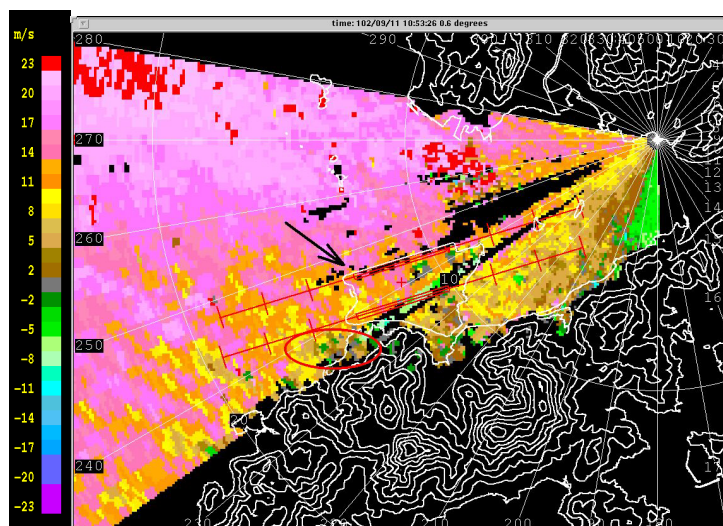
圖六 2002 年 8 月 19 日下午 5 時 49 分(09:49 UTC)激光雷達在仰角為 1.8 度的 PPI 徑向速度圖像。可清楚看見東南風穿越山谷後形成一些高風速條紋，及大嶼山山脈下游出現的低風速(深啡色)或徑向速度趨向雷達(綠色)的區域。



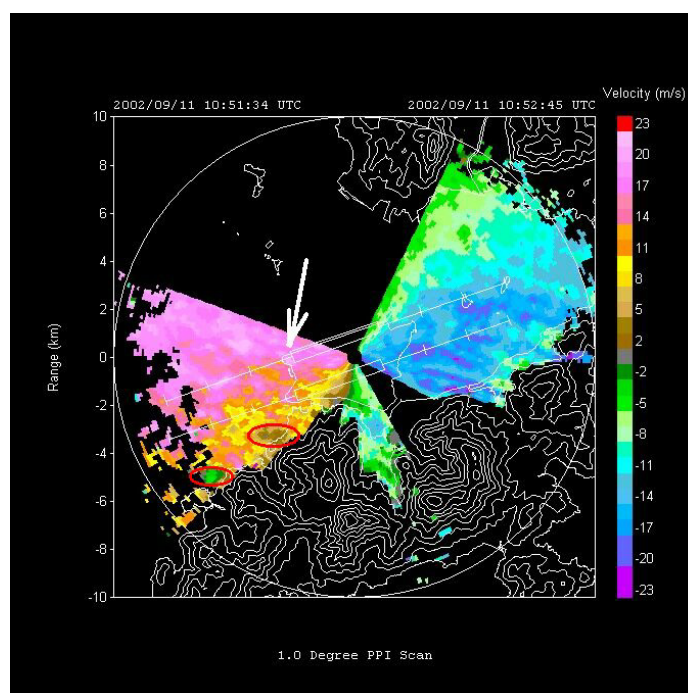
圖七 由8月19日下午5時45分至6時45分(09:45 UTC至10:45 UTC)激光雷達在仰角為1.8度、極方位角為262.2度的徑向速度Hovmüller時間序列。橫軸為時間、縱軸為與激光雷達的水平距離。紅線顯示三班航機遇上的風切變情況。



圖八 2002年9月11日下午6時53分(10:53 UTC)大嶼山附近自動氣象站顯示地面吹東南偏東風

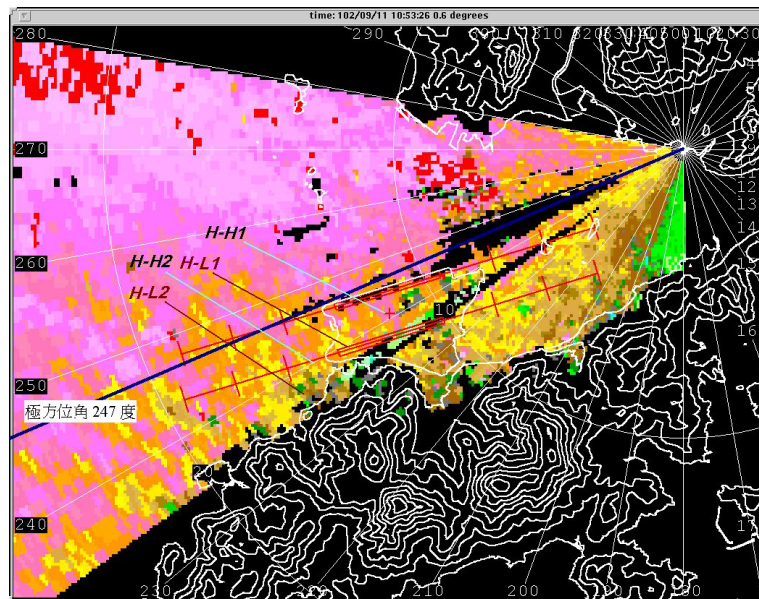


圖九 2002 年 9 月 11 日下午 6 時 53 分(10:53 UTC)機場多普勒天氣雷達在仰角為 0.6 度的 PPI 徑向速度圖像。圖中以箭頭標示的地方為航機從西面降落北跑道時遇上風切變的位置。

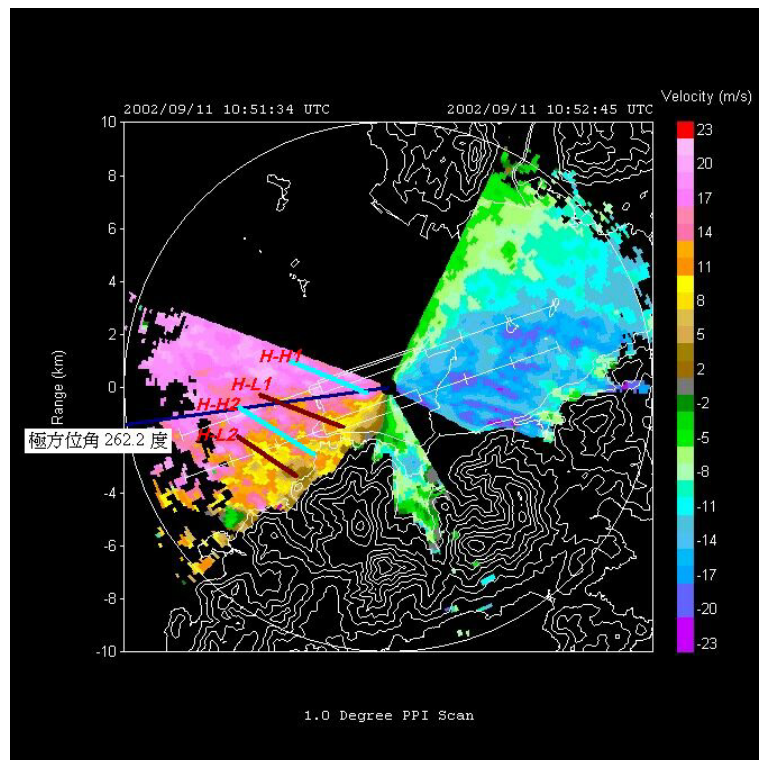


圖十 2002 年 9 月 11 日下午 6 時 53 分(10:53 UTC)激光雷達在仰角為 1.0 度的 PPI 徑向速度圖像。圖中以箭頭標示的地方為航班從西面降落北跑道時遇上風切變的位置。

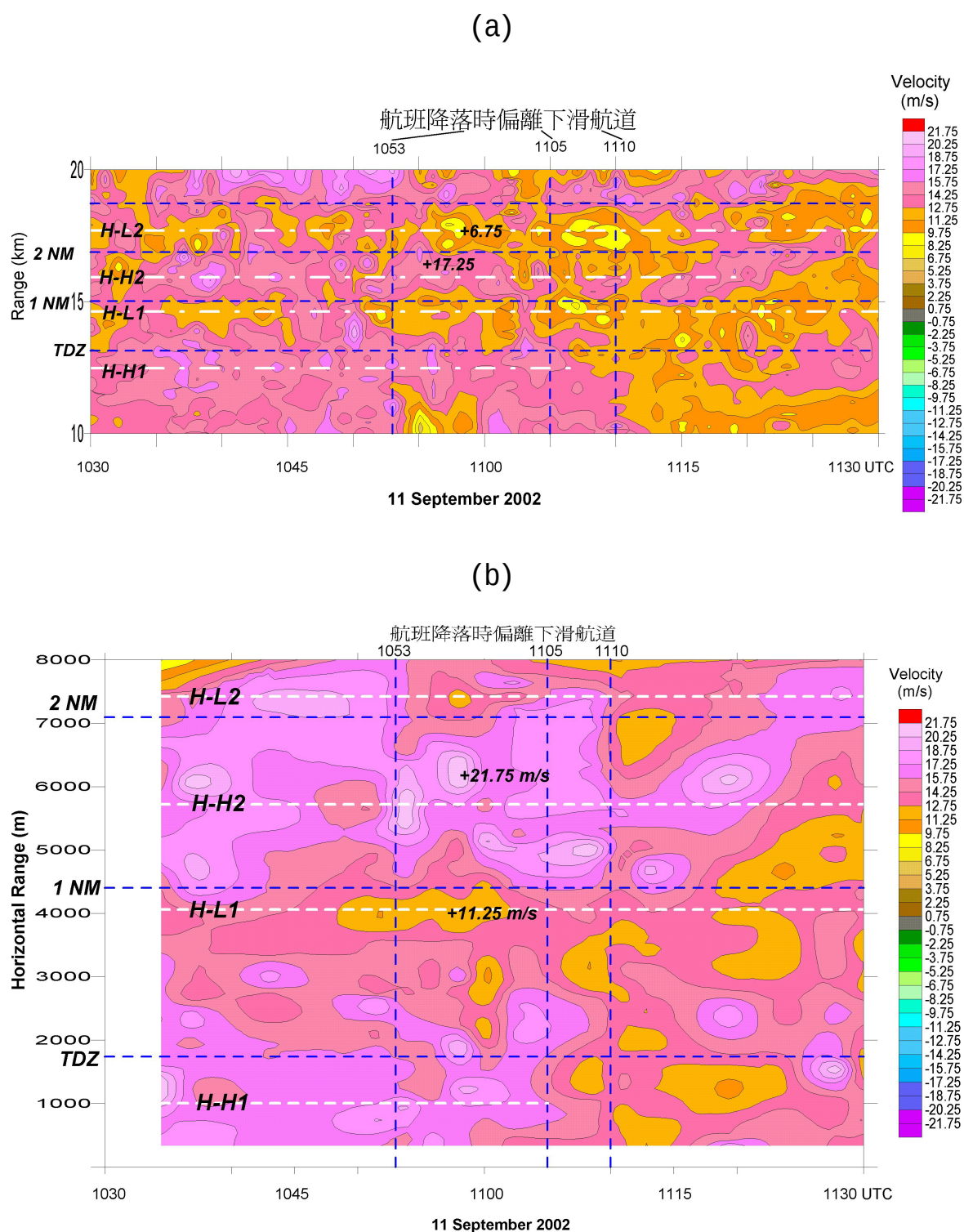
(a)



(b)



圖十一 2002 年 9 月 11 日下午 6 時 53 分(10:53 UTC) (a) 機場多普勒天氣雷達在仰角為 0.6 度的 PPI 徑向速度圖像及(b)激光雷達在仰角為 1.0 度的 PPI 徑向速度圖像皆可清楚看見東風穿越山谷及山脊後相互交錯的高(H-H1,H-H2)及低(H-L1,H-L2)風速氣流



圖十二 (a) 機場多普勒天氣雷達在仰角為 0.6 度、極方位角為 247 度的徑向速度 Hovmüller 時間序列。(b) 激光雷達在仰角為 1.0 度、極方位角為 262.2 度的徑向速度 Hovmüller 時間序列。兩圖的時間為 2002 年 9 月 11 日下午 6 時 30 分至 7 時 30 分(10:30 至 11:30 UTC)。橫軸為時間；縱軸為與雷達的水平距離。