



香港天文台  
HONG KONG OBSERVATORY

Reprint 946

利用衛星影像自動追蹤強對流作超短期預報之用

張冰、林靜芝 & 吳家豪\*

第二十五屆粵港澳氣象科技研討會

香港，2011 年 1 月 26-28 日

\*香港中文大學

# 利用衛星影像自動追蹤強對流作超短期預報之用

張冰<sup>(1)</sup> 林靜芝<sup>(1)</sup> 吳家豪<sup>(2)</sup>

(1)香港天文台

(2)香港中文大學

## 摘要

臨近預報產品大都是以外推天氣雷達回波反射率為基礎。礙於單一雷達所監測範圍較小，局地的降雨瞬間變化可以很大，而預報產品更新頻密，以致預報員可能只關注近距離的雨勢變化，而忽略較大範圍的天氣形勢變化。考慮到衛星圖像所顯示的大範圍對流雲隨時間的變化在數小時內相對穩定，且其監測範圍較大，較容易聯繫到相關的天氣尺度或中尺度的天氣系統，有助預報員評估天氣系統最新的發展及移動情況。本文嘗試把臨近預報系統中常用的自動追蹤方案套用於衛星對流產品，預測強對流雲在未來數小時內的移動。基於過往強對流天氣的案例，驗證結果顯示利用衛星影像自動追蹤的方法來預測未來數小時對流雲的位置具備技巧。

## 1. 引言

根據預報員經驗，衛星雲圖上天氣尺度及 $\alpha$ 中尺度(200-2000 km 根據Orlanski 的尺度劃分(文獻[1]))的對流雲團由發展到成熟至消散需數小時或以上。雲團中雷暴單體生消的時間尺度可能只是數十分鐘。考慮到衛星雲圖上顯示的對流雲頂溫度一定程度上反映整個對流雲團的生消過程，其時間尺度亦相對較長，而從雲團的移動亦可顯示整個對流系統的大尺度動向，相比雷達回波所見較小尺度的對流天氣較穩定及有序。除此以外，臨近(nowcasting)或超短期(very short-range)對流天氣預報對航空交通管理甚為有用，未來0-12小時在飛行情報區內的預報有助航空交通流量管制。因此，應用臨近預報方法來追蹤及預報深對流(deep convection)雲團在未來6小時的位置作為預報參考是值得嘗試的。基於此方法，天文台開發了一套衛星對流雲預報系統作試驗。本文介紹這套預報系統及其預報產品驗證結果，並討論該系統的限制及未來發展路向。

## 2. 背景

早期臨近預報泛指對當時天氣的詳細描述(以遙感資料為主)及用外推法預報兩小時內的天氣(文獻[2])。現時，臨近預報亦可指涵蓋外推至6小時預報(文獻[3])。其主要技術是對現時天氣系統或天氣現象有所辨識，假設移動期間系統強度不會有顯著變化，繼而估算該系統或現象的動態資料(移動方向及速度)，並用以作出短時間的預測。在整個流程中，從追蹤天氣現象所得到近似實況的運動矢量是重要的一環。天文台因應臨近預報需要發展了「小渦旋」(SWIRLS)暴雨臨近預報系統。該系統運用了雷達回波相關追蹤(TREC - Tracking of Radar Echoes by Correlation)方法，再利用外推法計算降水的出現時間和經驗程式推算降雨量(文獻[4])。

然而，從雷達反射率回波所識別的雷暴單體的尺度一般是 $\alpha$ 小尺度(200 m - 2 km)至 $\gamma$ 中尺度(2 km - 20 km)，其生命期平均為一小時左右(文獻[1])。因此系統強度維持不變的假設有先天性限制。無論追蹤算法及外推方案如何精確，

預報在一小時後的準確度無可避免下跌迅速(文獻[5])。考慮到衛星雲圖所探測的是較大尺度的天氣演變，其生命史平均在數小時或以上，我們嘗試應用臨近預報方法於衛星遙感資料上，可望增加有效預報時間。圖一為對2010年4月22日的強對流天氣所作的實驗產品。相比實況，可見6小時的外推結果大致能捕捉到雲團的基本動向，但對流的減弱和在西南端的發展則無法準確地預報出來。跟這個方向，我們便發展了現在試行的衛星對流雲預報系統。

### 3. 衛星對流雲預報系統

衛星對流雲預報系統主要由三個部份組成。首先是對深對流的辨認，再利用全域多重網格法(full multi-grid method)追蹤對流雲團的光流場(optical flow)(文獻[11])，以用作對流雲團的運動矢量，最後利用半拉格朗日平流方案外推對流雲團。以下詳細介紹系統的各部份：

#### 3.1 深對流的辨認

利用MTSAT的紅外光通道IR1(10.3 - 11.3  $\mu\text{m}$ )及IR3(IR3: 6.5 - 7.0  $\mu\text{m}$ )的溫度差，可近似地估算雲頂與大氣對流層頂的高度差。當IR1和IR3溫度接近時，雲頂已達對流層上部甚至已超越對流層頂，表示雲團有深對流產生(圖二(a)紅色部份)。天文台據此亦開發了強對流天氣的監測工具(文獻[6])。

#### 3.2 利用光流場方法追蹤及計算雲團移動矢量

衛星雲導風(AMV - Atmospheric Motion Vectors)產品由來已久(文獻[7]及[8])，然而其主要用途是作天氣分析及數值模式的資料同化。限於雲導風產品數據較為稀疏，無法提供足夠的移動矢量作雲團外推。因此，我們嘗試用類似雷達臨近預報用的回波追蹤工具，計算整個二維運動矢量場來外推雲團。考慮到衛星產品的數據量大(1216 x 1352像素對比雷達的480 x 480像素)及臨近預報的實時限制，衛星對流預報系統所採用的不是SWIRLS的TREC程式，而

是一套基於 OpenCV (文獻[9]) 的 VarFlow (文獻[10]) 電腦程式。該程式採用全域多重網格法 (full multi-grid method) 求解前後兩張圖像的光流場(文獻[11])。由於算法及程式都經過相當優化，用在衛星圖像時一般數秒內便可完成運算。

計算光流場(optical flow)的程式需要兩張單位元(8 比特)灰階圖作為輸入，故此衛星對流產品會先行轉為灰階圖像。在處理衛星影像時，為了有效及充份地利用灰階圖像的 256 個色調，衛星圖像會經過前處理。前處理程式會抽取 IR1-IR3 溫差介乎 25K 至-15K 的像素平均分配在 256 灰階內。從過往經驗得知 25K 以上的溫差代表的高度頗為接近地面，程式必須把這些像素過濾。不然的話，追蹤及外推雲團時會誤把地表特徵作雲團對待而得出錯誤的結果。溫差下限-15K 則是由統計數據得出。

衛星對流雲產品是由 MTSAT 衛星的實時數據計算得出。而天文台接收 MTSAT 衛星全盤(full disc)掃描數據的日程為一小時一次。因此系統以兩張時間相隔一小時的衛星灰階圖輸入 VarFlow 程式庫計算出各像素的運動矢量。VarFlow 經調試後，選定程式水平網格最大尺度約為 600 公里，最小尺度約為 30 公里，這大致對應在衛星圖上可見的最大對流天氣系統(如熱帶氣旋)及最小尺度對流天氣系統(如雷暴)。

### 3.3 利用半拉格朗日平流方法外推雲團

由上述軟件所追蹤得出的雲團移動矢量可覆蓋整個圖像，故此可利用一般的平流方案對雲圖外推，衛星對流預報系統所採用的是半拉格朗日平流方案。因兩張衛星圖相隔 1 小時，並考慮到所用平流方案的擴散(diffusive)特性，外推時步亦定為 1 小時。在初步調試系統時，我們亦嘗試用 30 分鐘及 10 分鐘的時步，但預報結果相差不遠。這可能是因為半拉格朗日平流方案具有時步上的穩定性。

#### 4. 對流雲預報產品及驗證結果

衛星對流預報系統由 2010 年 8 月底開始試行。系統外推未來 6 小時內每小時的雲團位置，預報每小時更新。在試行期間，對流雲團以不同 IR1-IR3 溫差作為辨識。預報產品突出顯示 IR1-IR3 溫差小於 1K(紅色)及小於 3K(藍色)的區域(圖三)；而在香港飛行情報區內預報產品則突出顯示溫差小於 8K(黃色)及小於 1K(紅色)的區域(圖四)。

9 月份的預報產品驗證結果列於表一。為剔除邊界效應，驗證範圍是 15°S-40°N、105°E-150°E。驗證以溫差 < 3K 為界，以列聯表(contingency table)方式進行。從表一可見預報系統的 T-評分隨預報時效的增加而下跌，由 1 小時預報的 T-評分 0.5 降至 6 小時預報的 0.14。現時採用的驗證方法極為嚴格，準確的預報指衛星圖上每個像素的強度及位置都準確。初步的驗證結果顯示系統預報未來 2-3 小時具備一定的技巧。

#### 5. 討論

衛星對流預報系統有先天的限制。衛星雲圖的外推有三大困難：首先由於追蹤方案要求時間連續性，故此必需採用地球靜止衛星的產品。受遙感通道數目所限，無法精確地定出雲的分類及雲頂高度。其次是地球靜止衛星一般只能探測到雲頂，因此追蹤得到的運動矢量基本上只能代表近雲頂的移動，不一定對應相關的天氣系統的移動。最後是雲層彼此覆蓋，以單一高度的運動矢量外推時無法重現雲層的三維動態。上面三個問題為預報系統中的對流系統辨識、追蹤及外推這三大要素帶來困難。

由於衛星數據數量龐大，故此要翻做 2010 年整個雨季的預報產品客觀驗證需時，但從主觀驗證得出以下觀察：

- (i) 地球靜止衛星探測技術在高緯度有視差現象，故深對流產品高緯虛報的情況需待改善；
- (ii) 使用中的臨近預報技術沒有加入對流的生消過程，系統對於大範

- 圍、對流顯著、移動明顯的雲團預測效果較佳；
- (iii) 對於不少個案，縱使外推後的預報技巧不高，但從預報系統所追蹤得到的運動矢量亦有不錯的參考價值；
  - (iv) 對於熱帶氣旋，系統現時 VarFlow 程式的設定無法顯示氣旋式的風場，預報系統只能捕捉到氣旋的平移運動。

## 6. 未來發展及總結

天文台開發了一套應用臨近預報技術的衛星對流雲預報系統。2010 年 9 月的驗證結果顯示系統 2-3 小時預報的 T-評分為 0.27，並且  $POD > 0.5 > FAR$ ，具備一定的技巧。未來我們將會進行更多個案的驗證以瞭解系統的特性，並重新設計驗證方法，以較適用於業務運作方式和實用性來評估系統的表現。由於近年對於衛星的應用有不少新發展(文獻[12]及[13])，我們將嘗試從衛星資料捕捉雷暴的發展及利用探測過衝雲頂技術改善現時衛星對流預報產品的不足之處。

## 鳴謝

感謝楊漢賢先生介紹應用追蹤軟件 VarFlow 和蘇志權先生協助提供衛星對流雲預報系統驗證結果。

## 參考文獻

- [1] Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scale for atmospheric processes. Bull. Am. Meteor. Soc., 56, 527-530.
- [2] Browning, K. A. (Editor), 1982: Nowcasting, Academic Press Inc. London.
- [3] WMO 網頁: <http://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/Nowcasting.htm>.
- [4] Li, P. W., Edwin S. T. Lai, 2004: Applications of radar-based nowcasting techniques for mesoscale weather forecasting in Hong Kong, Met. Appl., 11, 253-264.
- [5] 李炳華, 2010: 應用於珠三角空域的雷暴臨近預報系統的發展, 第 24 屆粵港澳氣象科技研討會, 深圳, 2010 年 1 月 20-22 日
- [6] 蘇志權, 2009: 監測對流天氣的衛星產品, 第 23 屆粵港澳氣象科技研討會, 澳門, 2009 年 2 月 18-20 日
- [7] Menzel, W. Paul, 2001: Cloud tracking with satellite imagery: From the pioneering work of Ted Fujita to the present, Bull. Amer. Meteor. Soc., 82, 33-48.
- [8] Bedka, K. M., J. R. Mecikalski, 2005: Application of satellite-derived atmospheric motion vectors for estimating mesoscale flows. J. Appl. Meteor., 44, 1761-1772.
- [9] Bradski, G., A. Kaehler, 2008: Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library, O'Reilly Media (<http://opencv.willowgarage.com>)
- [10] VarFlow 程式網頁: <http://sourceforge.net/projects/varflow/>
- [11] Bruhn, Andrés, J. Weickert, C. Feddern, T. Kohlberger and C. Schnörr, 2003: Real-Time Optic Flow Computation with Variational Methods, Lecture Notes in Computer Science, 2003, Vol. 2756/2003, 222-229.

- [12] Mecikalski, J. R., K. M. Bedka, 2006: Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 49–78.
- [13] Mecikalski, J. R., W. F. Feltz, J. J. Murray, D. B. Johnson, K. M. Bedka, S. T. Bedka, A. J. Wimmers, M. Pavolonis, T. A. Berendes, J. Haggerty, P. Minnis, B. Bernstein, and E. Williams, 2007: Aviation applications for satellite-based observations of cloud properties, convection initiation, in-flight icing, turbulence, and volcanic ash. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1589-1607.

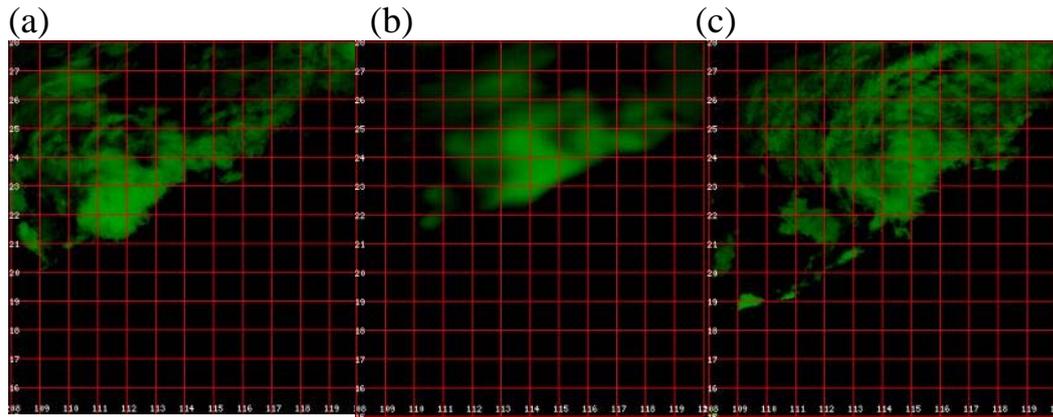


圖 1：2010 年 4 月 22 日的強對流天氣預報實驗。圖(a)為當日 02UTC 衛星對流分析產品；圖(b)是外推 6 小時後的預報圖；而圖(c)則為 6 小時後的衛星對流分析產品。

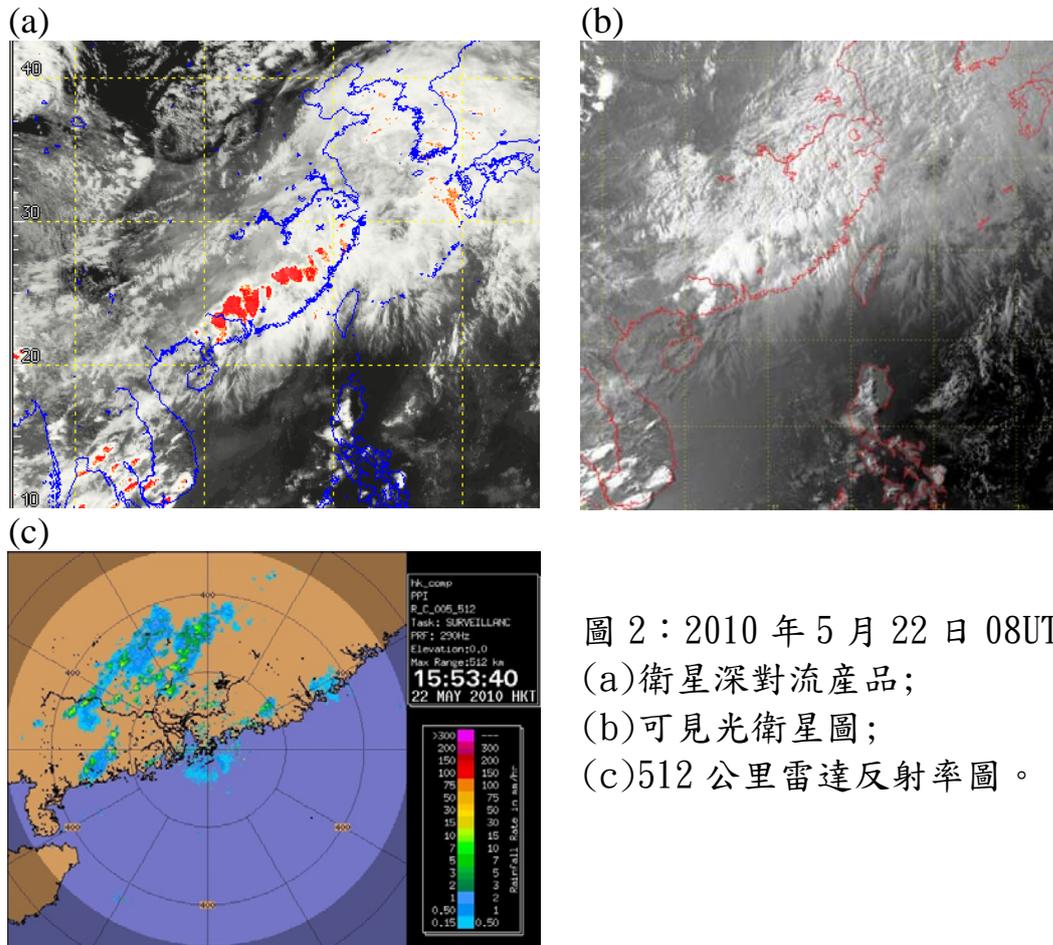


圖 2：2010 年 5 月 22 日 08UTC 的  
 (a)衛星深對流產品；  
 (b)可見光衛星圖；  
 (c)512 公里雷達反射率圖。

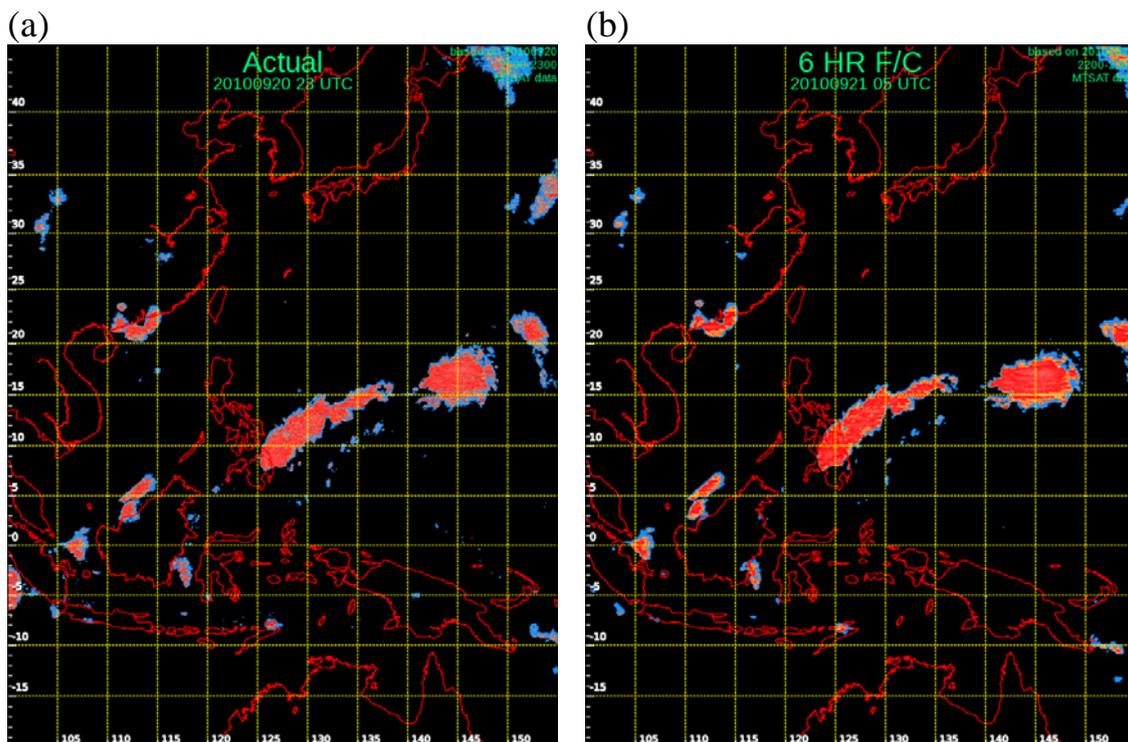


圖 3：衛星對流雲預報系統輸出的產品範例。圖(a)為對流分析產品；圖(b)是 6 小時預報。預報產品以每小時動畫形式給預報員參考。

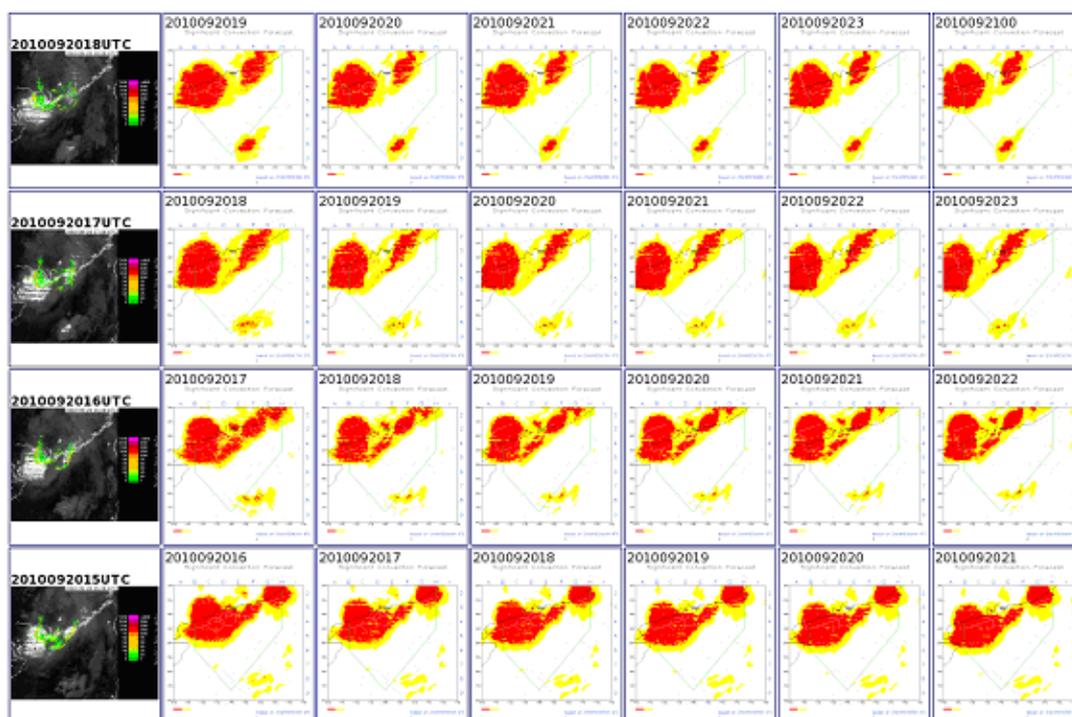


圖 4：衛星對流雲預報系統輸出覆蓋香港飛行情報區的產品範例。最左的直列顯示衛星對流分析產品疊加了雷達回波的實況圖像，每小時的預報更新放在最頂排。衛星對流預報圖從左到右顯示未來 6 小時每小時的預測。

預報時效	捕捉率 (POD)	虛報比 (FARatio)	T-評分 (CSI)
1 小時	0.67	0.33	0.50
2 小時	0.53	0.47	0.36
3 小時	0.42	0.57	0.27
4 小時	0.34	0.65	0.21
5 小時	0.29	0.71	0.17
6 小時	0.24	0.75	0.14

表一：2010 年 9 月衛星對流雲預報系統的驗證結果。