

擴充ABLER法為分區聯合最佳化估計降水系統移速場

鄭哲榮¹ 李天浩¹
國立台灣大學土木工程學系¹
國立台灣大學

摘 要

利用雷達回波圖來估計降水系統的移動速度，主要藉由ABLER(Advection-based Lagrangian-Eulerian Regression)演算法來進行估計。其中受限於質點的追蹤方法、迴歸窗格的大小以及能夠描述的速度場自由度，而造成估計與預報產生偏估。前者的解決辦法則以雙變數的線性速度場假設為基礎，利用主成份速度追蹤(Principle-Velocity Transform, PVT)來進行估計，該法利用旋轉主軸的概念求解Lagrangian速度。後二者則提出片段線性速度場函數聯合最佳化(Piecewise-Linear Velocity field function with Jointly Optimized, PLJO)的策略，將速度場切割數個彼此不相鄰的區塊，個別迴歸估計。並利用PVT進行追蹤，且於質點跨越區域時更換速度場係數，能夠有較合理的描述行為。藉由觀測系統模擬實驗(Observed Systems Simulation Experiments, OSSE)來進行改善策略的驗證，並利用2014年05月21日及2017年06月02日的實際案例來進行探討。在OSSE試驗中，PVT及PLJO確實能夠改善單一區域ABLER演算法。於實際案例之中，也能夠獲得改善。但若系統具有強烈的源滅特性，會使得演算式無法準確地提供降水系統的估計移速而造成偏估。

關鍵字：雷達、外延、ABLER、OSSE、降水系統、移速場

一、前言

利用雷達影像即時定量預報降水(Quantitative Precipitation Nowcasting)作業，主要需要辨識降水系統移動速度場(advection)，以及辨識對流雨胞和其生命週期階段(convection)。前者的估計方法主要分三類：(1)比對追蹤法，如Rinehart和Garvey(1978)發展的TREC(Tracking Radar Echo by Correlation)；(2)迴歸法，如Takasao和Shiiba(1984)(以下稱Shiiba法)；以及(3)變分法，如Germann和Zawadzki(2002)發展的MAPLE(McGill Algorithm for Precipitation-nowcasting by Lagrangian Extrapolation)。

TREC法(1978)為Lagrangian描述法，並以計算相關係數為主軸。缺點是僅能以平移的方式來描述速度場且速度場為空間解析度除以時間解析度的整數被。Shiiba法為Eulerian的描述法，以移流方程式(advection eq.)為主軸，並以有限差分法來進行數值離散且建立迴歸式。缺點是若Courant#>1的情況下，會使差分過程產生代表性的錯誤。MAPLE法調整節點移速來估計移速，使用Semi-Lagrangian法以迭代方式找出回波值來源點。而李天浩(2013)提出的ABLER(Advection-Based Lagrangian-Eulerian Regression)法整合Lagrangian及Eulerian的架構。缺點為速度場估計係數仍具有偏估量，以及描述範圍過大所導致描述彈性不足。

本研究在追蹤方法上以PVT(Principle-Velocity Transform)為主，解決ABLER因差分作用所導致的係數偏差，並以PLJO (Piecewise-Linear and Jointly Optimized)的策略，增加速度場描述自由度、速度場一致性，與質點追蹤的合理性。且於實際應用於短延時(6-30分鐘)的預報影像。

二、研究方法

2.1 ABLER法(李，2013)

ABLER法以Shiiba法為基礎架構，並將速度場假設為Lagrangian與Eulerian的組合，且在x和y方向中平移。進行迴歸作業與計算所有的解釋變異量比(R^2)。除可描述流體運動行為(如旋轉、縮放、剪變等)，亦適用在Courant#>1的情況下。而本研究將針對移流進行討論，故假設源滅項為零。

2.2 主成份速度轉換(Principle-Velocity Transform)

在雙空間變數的線性速度場假設下，該系統為一階非齊次聯立ODE之系統。藉由求解特徵值以及特徵向量可將系統映射至主軸。並帶入初始條件，則可求得任意時刻的質點位置。優點為代數式計算快速，且質點追蹤過程在該假設下沒有誤差。

2.3 分區聯合最佳化 (Piecewise-Linear and Jointly Optimized)

PLJO與單一區域ABLER法比較，利用分區個別迴歸的策略，可增加速度場的描述自由度。並參考MAPLE法之概念，設置目標函數(L)為平均回波殘差平方和(L1)與平滑化的代價函數(L2)。除了可以調整速度場係數外，亦提供速度場具有一致性，降低某些區塊偏估的特性。而在質點追蹤方面，採取跨越區塊更換係數的策略，保留各速度場特性，且使得質點追蹤過程更具有合理性。

$$L = w_1 L_1 + w_2 L_2$$

$$L_1 = (1/N) \sum (\hat{\phi} - \phi)^2$$

$$L_2 = \sum \left\{ \begin{aligned} &(d^2u/dx^2)^2 + (d^2u/dy^2)^2 + (d^2u/dxdy)^2 \\ &+ (d^2v/dx^2)^2 + (d^2v/dy^2)^2 + (d^2v/dxdy)^2 \end{aligned} \right\}$$

$$= \sum \left\{ \begin{aligned} &(dC_1/dx)^2 + (dC_2/dy)^2 + (dC_1/dy)^2 + (dC_2/dx)^2 \\ &+ (dC_4/dx)^2 + (dC_5/dy)^2 + (dC_4/dy)^2 + (dC_5/dx)^2 \end{aligned} \right\}$$

2.4 試驗建立與分析方法

(a). 觀測系統模擬試驗 (Observing Systems Simulation Experiments)

第一為產生影像，藉由250組雙高斯分布作為起始影像，且利用線性或非線性的速度場係數，分別可產生相鄰及預報影像。第二為估計移速，建立控制組實驗(0)One-Area-ABLER與比較組實驗(1)One-Area-Simplex、實驗(2)PL-ABLER-persist、實驗(3)PL-Simplex-persist及實驗(4)PL-Simplex-change。第三為評估方法，以平均回波殘差平方和討論PLJO的效果：最佳化調整估計係數是否能夠改善預報結果、分區策略是否能夠增加速度場描述自由度、跨區更換係數是否具有合理性。

(b). 實例應用

主要將分成CAPPI(4-km)與QPESUMS兩種資料，並針對不同的降水事件進行分析。其中分區作業會使得區域之中資料點數產生不充足的情形，造成無法利用ABLER法估計速度場。故以PL-Simplex的係數為主，One-Area-Simplex的係數為輔，描述整張影像的速度場以便進行外延預報。並藉由外延預報的目標函數來討論(1)權重設置對於目標函數的敏感度；(2)預報時距對於目標函數的敏感度；(3)外延預報30分鐘各策略與One-Area-ABLER的改進效率。

三、 分析結果

3.1 結果

在線性OSSE試驗中，圖2和圖3分別表示估計結果與外延預報之目標函數。且最佳化的過程，亦可使得目標函數皆為零的情況。圖2了解到ABLER法之估計係數受限於有限差分的數值離散過程，使得係數僅能以直線的方式來進行描述，故在估計結果會比PVT來得好，而目標函數隨變形量增加而遞增。圖3說明若進行預報作業時，PVT之結果能夠較具有優勢。

在非線性的OSSE試驗預報之結果中，圖4和5，分別代表實驗(0,1)，說明以最佳化的過程調整ABLER法估計係數確實會有更好的描述行為，但改善能力受到速度場自由度的限制。圖6代表實驗(2)，說明分區個別估計，確實能夠提供更多的描述自由度，但邊界會有不連續的現象，原因為區塊各自獨立進行運算的結果。圖7代表實驗(3)，說明分區且最佳化效果亦能改善。圖8代表實驗(4)，除更加改善實驗(3)外，亦舒緩預報時邊界不連續現象。

在實際案例中，(1) CAPPI：PLJO之目標函數對於權重數值顯示為不敏感(表2)，原因為聯合最佳化的最佳化方法效率不佳。隨預報時距增加，目標函數會遞增(圖9)，原因為緣滅的特性開始產生影響，但仍對於單一區塊的ABLER法有更好的預報結果。外延預報30分鐘(圖10~13)，各策略幾乎皆能夠改善控制組，且實驗(4)會有更佳的改善能力，而實驗(4)之結果為PLJO速度場估計係數的起始猜值。(2) QPESUMS資料(圖14,15)，由於系統較完整區域主導估計移速，使得其他區域之估計結果並不理想，且各區塊PLJO也由於緣滅效應強烈及兩胞之相對作用顯著，使估計結果並未改善太多。但強回波區系統，確實比單一區塊的ABLER法有改善情況。

3.2 討論

本研究將雷達影像直接切割成彼此不相臨的網格，並以Lagrangian方式追蹤質點，且使用最佳化調整速度場估計係數，提升速度場掌握度。OSSE試驗中也可說明PLJO中，增加速度場描述自由度與質點追蹤的合理性。而實際應用上，雖聯合最佳化效率較為不足，但PLJO之初始值在實際情況上，已能夠大幅改善單一區塊ABLER法之估計結果。然而此擴充策略還是無法描述雷達影像本身具備源滅的特性，及影像雜波訊號干擾，所致使速度場產生偏估。且區塊之中具系統具有分離或合併之效應，亦產生估計不理想的情況。

四、 結論與後續建議

4.1 結論

PVT在演算法的線性假設下，提供解析的方式推求質點軌跡與終點，除大幅提高計算效率，亦提

升估計準確性。非線性OSSE證實：(1)個別最佳化速度場估計係數能夠些微改善速度場；(2)多區描述結果能提供更多的描述能力；(3)跨區換係數可改善質點追蹤的合理性。於實際應用時，最佳化的效率有待改進，但目前PLJO之初始值與各項策略已能夠改善單一區塊的ABLER法的短延時(6-30分鐘)之預報影像。

4.2 建議

由於本研究的最佳化方法在多維問題中效率較差，需要提高最佳化方法效率，以利實務應用。本研究測試時，僅使用連續兩張雷達影像估計移速場和進行外延預報，未來可評估使用三張或更多時間的雷達觀測影像估計移速場，是否會提升預報準確度。本研究的OSSE，無法考慮源滅項的影響，未來可考慮使用高時空解析度模式輸出的定量水產品來檢驗演算法，以利評估降水源滅項對移速場估計的影響。本研究未針對同類別降水系統作測試，未來建議應用演算式於估計颱風降水系統移速場，以及估計由場內部生成午後雷雨移速之效益。

五、參考文獻

[1] 李天浩,張鳳吟,丘君翹,蔡雅婷,黃椿喜,劉承昕,薛宏宇,2013:”應用QPESUMS資料迴歸估計台灣地區降水系統移速場”,102年天氣分析與預報研討會

[2] 洪國展,李天浩,馮智勇,黃椿喜,丘君翹,林彥廷,2014:”以改良式ABLER法應用於台灣地區降雨系統移速場外延估計”,103年天氣分析與預報研討會

[3] 洪國展,馮智勇,陳姿瑾,李天浩,黃椿喜,2015:”利用ABLER法發展台灣地區雷達迴波外延估計”,104年天氣分析與預報研討會

[4] 洪國展,馮智勇,劉承昕,鄭育昆,黃椿喜,2016:”以ABLER法發展台灣地區極短期QPE外延估計”,105年天氣分析與預報研討會

[5] 劉承昕,2014:”利用ABLER移流迴歸法估計颱風降雨回波移速之研究”,國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文

[6] Bellon, A., Zawadzki, I., Kilambi, A., Lee, H. C., Lee, Y. H., & Lee, G, 2010:”McGill algorithm for precipitation nowcasting by lagrangian extrapolation (MAPLE) applied to the South Korean radar network. Part I: Sensitivity studies of the Variational Echo Tracking (VET) technique”, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 46(3), 369-381.

[7] Germann, U., & Zawadzki, I, 2002:” Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology”, Monthly Weather Review, 130(12), 2859-2873.

[8] Rinehart, R.E. and E.T. Garvey, 1978:” Three-dimensional Storm Motion Detection by Conventional Weather Radar”, Nature, 273,287-289.

[9] Takassao, T. and M. Shiiba, 1984: “Development of techniques for on-line forecasting of rainfall and flood runoff”, Natural Disaster Science, 6,83.

[10] Takasao, T., M. Shiiba, and E. Nakakita., 1994: “A real-time estimation of the accuracy of short-term rainfall prediction using radar.”, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, 7, 339-351.

六、附表及附圖

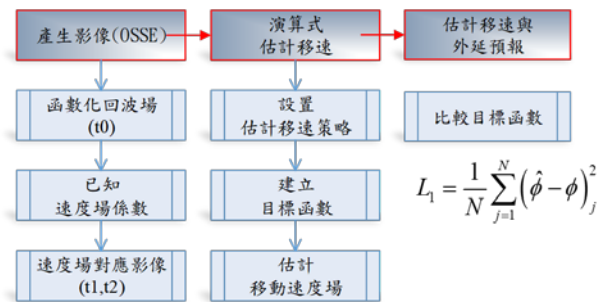


圖1: 演算策略流程圖。

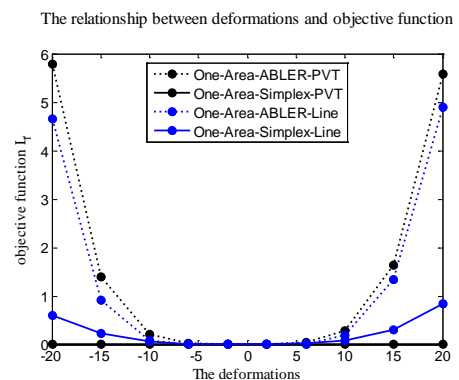


圖2：移速策略目標函數與縣性OSSE變形量之關係圖(估計 $t_1 - t_0 = \Delta t$)

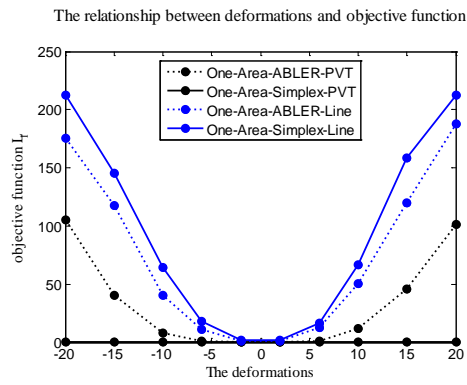


圖3：移速策略目標含數與線性OSSE變形量之關係圖(預報 $t_2 - t_0 = 6\Delta t$)

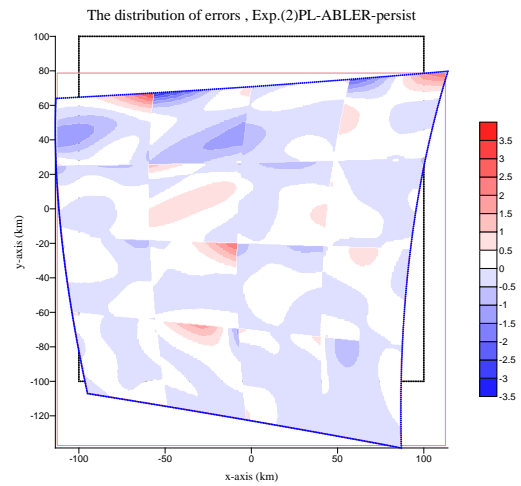


圖6：非線性OSSE，實驗(2) PL-ABLER-persist於預報結果之誤差分布圖。

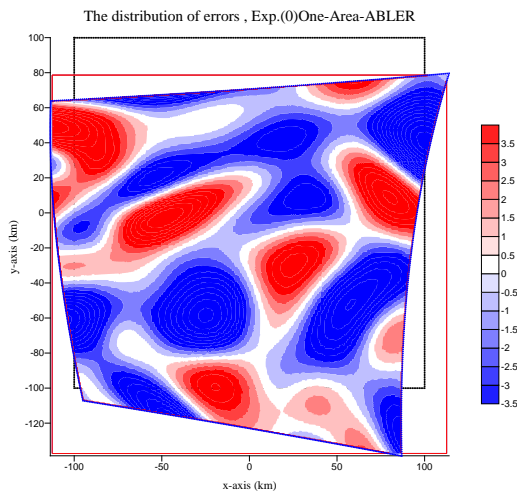


圖4：非線性OSSE，實驗(0) One-Area-ABLER於預報結果之誤差分布圖。

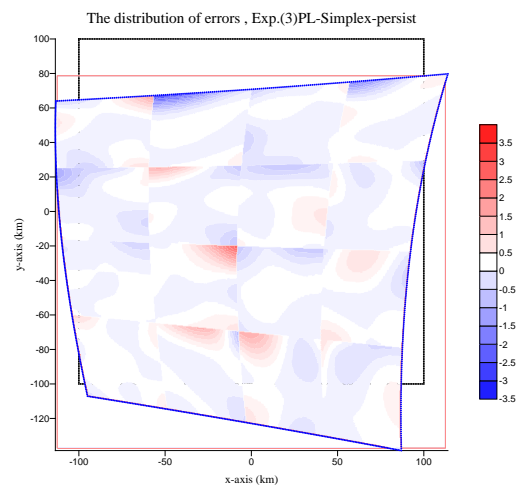


圖7：非線性OSSE，實驗(3)PL-Simplex-persist於預報結果之誤差分布圖。

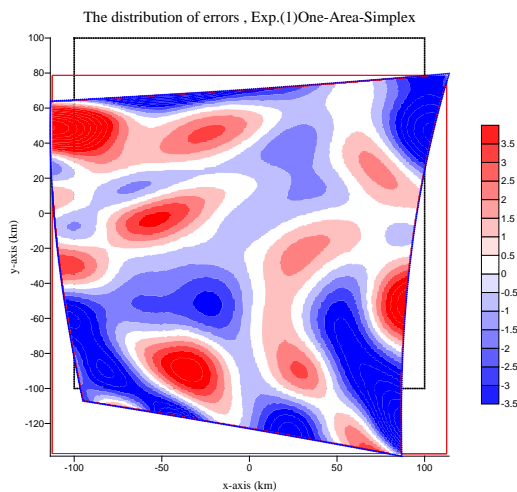


圖5：非線性OSSE，實驗(1) One-Area-Simplex於預報結果之誤差分布圖。

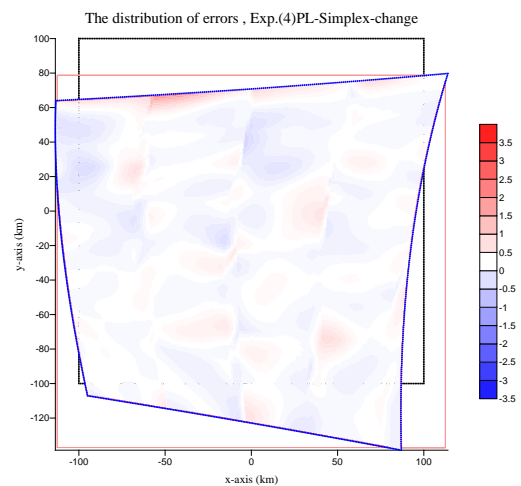


圖8：非線性OSSE，實驗(4)PL-Simplex-change於預報結果之誤差分布圖。

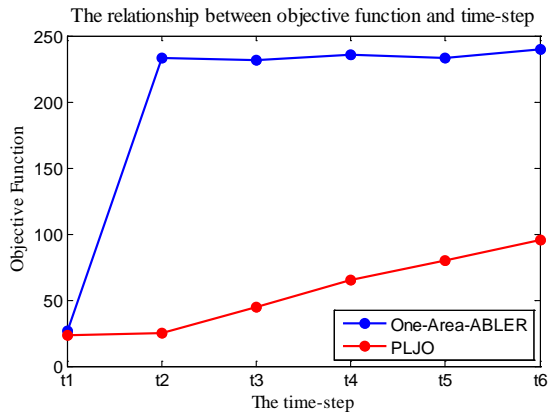


圖9：CAPPI，目標函數與預報時距敏感度測試。

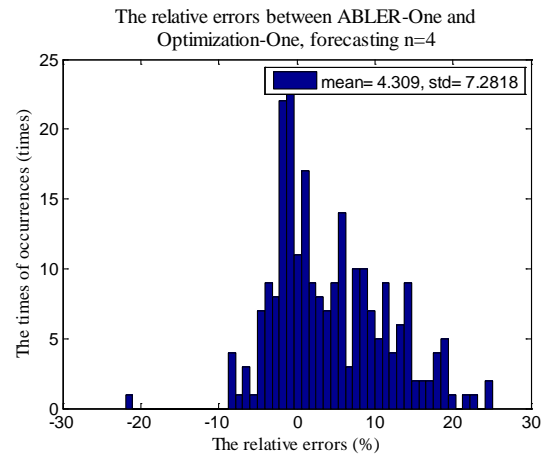


圖10：CAPPI，預報30分鐘，One-Area-Simplex對於One-Area-ABLER改善效率直方圖(100組)。

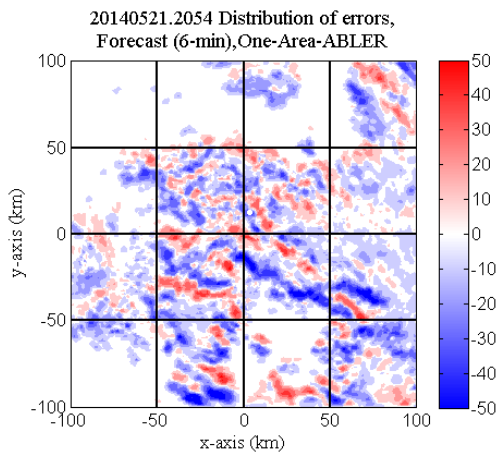


圖10：CAPPI，預報6分鐘，One-Area-ABLER之誤差分布圖。

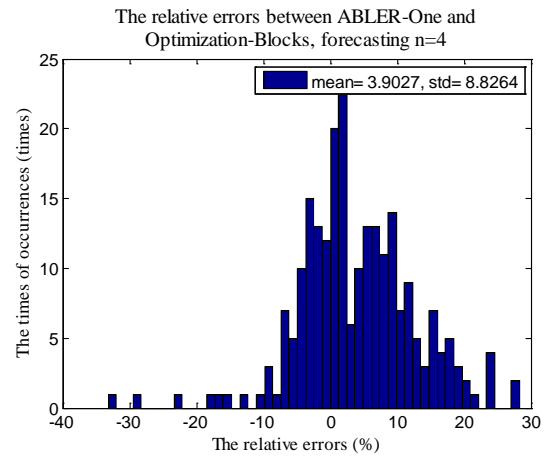


圖12：CAPPI，預報30分鐘，PL-Simplex-persist對於One-Area-ABLER改善效率直方圖(100組)。

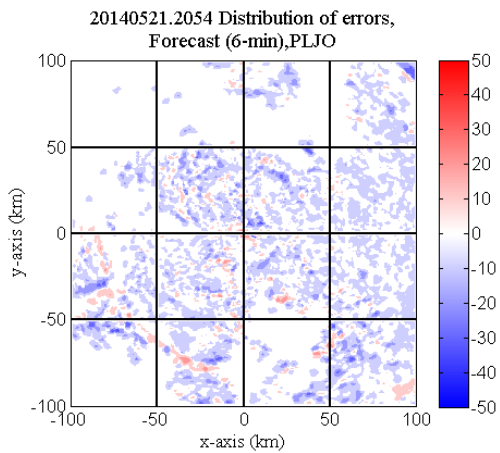


圖11：CAPPI，預報6分鐘，PLJO之誤差分布圖。

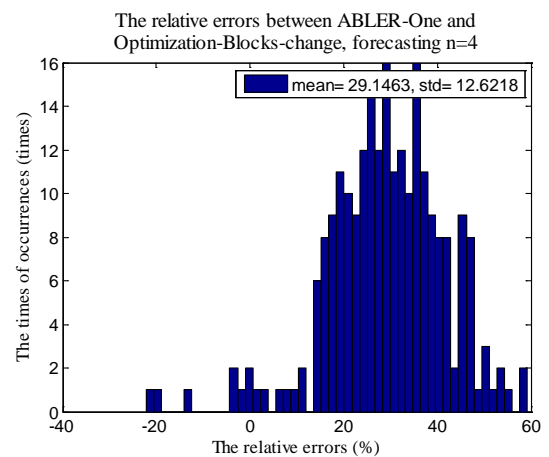


圖13：CAPPI，預報30分鐘，PL-Simplex-change對於One-Area-ABLER改善效率直方圖(100組)。

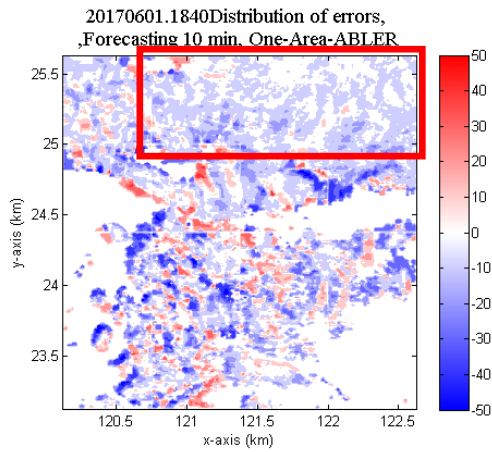


圖14：QPESUMS，預報10分鐘，One-Area-ABLER之誤差分布圖。

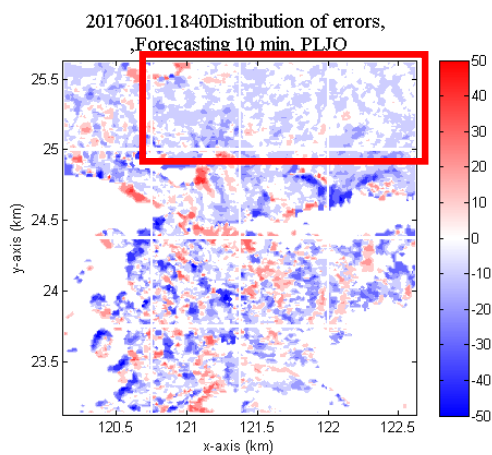


圖15：QPESUMS，預報10分鐘，PLJO誤差分布圖。

表1：非線性OSSE，不同移速策略之目標函數

Non-linear OSSE	Estimate	Forecast
(0) One-Area-ABLER	0.695	15.454
(1) One-Area-Simplex	0.391	8.794
(2) PL-ABLER-persist	3.145E-03	1.37E-01
(3) PL-Simplex-persist	7.290E-04	8.30E-02
(4) PL-Simplex-change	7.367E-04	3.17E-02

表2：實例應用，目標函數與權重函數敏感度測試

權重函數(W2)	估計移速 (Estimate)	外延預報 (Forecast)(1dt)
0.000000E+00	2.3768617E+01	2.4870491E+01
1.000000E+01	2.3768617E+01	2.4870491E+01
1.000000E+03	2.3768617E+01	2.4870491E+01
1.000000E+04	2.3768617E+01	2.4870491E+01
1.000000E+05	2.3768617E+01	2.4870491E+01
1.000000E+07	2.3768618E+01	2.4870453E+01
1.000000E+10	2.4372504E+01	2.5623076E+01
1.000000E+14	2.4372504E+01	2.5623076E+01
1.000000E+20	2.4372504E+01	2.5623076E+01
1.000000E+27	2.4372504E+01	2.5623076E+01

