

模糊邏輯分類演算法於臺灣雷達作業資料品質控制之應用

王忠斌 林品芳 張保亮 方偉庭

中央氣象局

摘要

本研究利用模糊邏輯演算法進行非天氣回波之偵測與移除，結果顯示模糊邏輯演算法可有效降低臺灣雷達觀測資料中包括干擾回波、地形雜波、海面雜波、雷達故障雜訊、弧狀回波等非天氣回波訊號的影響，未來將針對異常回波(AP)發展相應之模糊邏輯演算法，以建構更完整之臺灣雷達觀測網作業資料品質控制技術。

關鍵字：雷達資料品質控制、模糊邏輯、弧狀回波、干擾回波、地形雜波、海面雜波

一、前言

雷達為監測劇烈天氣不可或缺的工具，而有效應用雷達定量降水估計技術必須基於能有效濾除非氣象回波之上游雷達資料品質控制技術。雷達觀測資料中未濾除之非氣象回波可導致雷達降水估計場大量偏差，嚴重影響下游雷達相關氣象水文之研究與應用。為建立能有效濾除非氣象回波之雷達資料品質控制技術，本研究在王等(2017)發展之模糊邏輯分類演算法架構上，改進原有干擾回波模糊邏輯演算法並擴大應用至海面雜波、地形雜波以及弧狀回波，以建構更全面之臺灣雷達觀測網資料品質控制技術。

二、資料與方法

(一) 雷達資料

本研究為各種不同非天氣回波分別建立模糊邏輯演算法，透過程式輔助與主觀判斷篩選建立非天氣回波資料集及天氣回波資料集，以建立模糊邏輯演算法之隸屬函數，表 1 為所使用之雷達資料集。干擾回波資料集為自 114 筆 RCWF 雷達 0.5°觀測資料中，選取 4030 條較顯著之干擾回波徑向資料作為代表，並從 2017 年尼莎颱風個案的 RCWF 雷達 0.5°觀測資料，選取 5 筆共 3600 條含有颱風天氣回波之徑向資料作為非干擾回波資料集。弧狀回波資料集是由 1799 筆

RCWF 雷達 1.3°觀測資料中，選取 8102 條較顯著之弧狀回波徑向資料作為代表，並從 RCWF 雷達的 2019 年利奇馬颱風 1.3°觀測資料，選取 41 筆共 29520 條含有颱風天氣回波之徑向資料作為非弧狀回波資料集。海面雜波資料集自 RCWF 雷達 0.5°觀測資料中，選取 370 筆有明顯海面雜波發生同時並無天氣回波之資料作為代表，並選取 36 筆天氣回波資料作為非海面雜波資料代表。地形雜波資料集為自 RCCG 雷達 2.4°觀測資料中，選取 1986 筆晴朗天氣個案資料作為代表，另選取 22 筆 2017 年海棠颱風個案資料作為非地形雜波資料集。雷達故障雜波資料集則自 RCHL 雷達 0.5 度觀測資料中，選取 36 筆發生雷達故障雜波且無天氣回波之資料作為代表，並選取 14 筆天氣回波資料作為非雷達故障雜波資料集。

(二) 模糊邏輯演算法

本研究所使用之特徵參數除原回波資料(Refle)、回波徑向速度資料(RdVel)、回波氣候統計資料(Clima)(圖未示)以外，皆為回波資料之衍生計算並可分為三類。第一類為計算資料在徑向或方位角方向上之全域整體特性，賦予各資料點相同特徵值：CRAzi 計算資料在方位角方向上有效資料比例，fftIF 與 fftI 為計算資料在徑向上特定空間頻率之成分大小，此特定空間頻率取自 RCWF 雷達資料中干擾回波與弧狀回波之資料特徵。第二類為計算資料點與其鄰近資料點之局域差異特性，依差異程度給予不同特徵值：

StdRd 與 StdAz 分別為計算資料在徑向與方位角方向上一給定範圍內之資料標準差，SPIN 為計算一給定區域範圍內各資料點與相鄰資料點之差值取絕對值大於給定門檻值之比例，PRC 與 PAC 分別為計算資料在徑向或方位角方向上與相鄰一定範圍內資料之差值取絕對值小於給定門檻值之比例。第三類為計算資料點與相鄰掃描仰角資料之關聯性，依關聯程度給予不同特徵值：VrAvR 計算資料格點在垂直方向上之相鄰仰角資料之有效資料比例。

頻率分布函數定義為針對任一特徵參數 k ，資料點屬於分類 s 且其特徵值為 $X_k = x$ 時之發生頻率，如下式表示(Berenguer et al. 2006)：

$$f_{k,s}(x) = \frac{n(X_k = x \cap type = s)}{n(type = s)}$$

其中 $n(X_k = x \cap type = s)$ 為資料屬於分類 s 且特徵值為 $X_k = x$ 之資料點數目， $n(type = s)$ 為屬於分類 s 之資料點數目。圖 1a 至圖 1c 為使用 RCWF 雷達干擾回波資料及 RCWF 雷達尼莎颱風資料統計所得各特徵參數之頻率分布函數，其他頻率分布函數分示於：弧狀回波(圖 2a 至圖 2c)、海面雜波(圖 3a 至圖 3d)、地面雜波(圖 4a 至圖 4e)、雷達故障雜波(圖 5a 至圖 5d)。

對應任一頻率分布函數，亦可計算當資料點之特徵值為 $X_k = x$ 時，屬於分類 s 之條件機率函數，如下式表示(Berenguer et al. 2006)：

$$p_{k,s}(x) = \frac{n(X_k = x \cap type = s)}{n(X_k = x)}$$

其中 $n(X_k = x)$ 為資料中特徵值 $X_k = x$ 之資料點數目。圖 1d 至圖 1f 為使用 RCWF 雷達干擾回波資料及 RCWF 雷達尼莎颱風資料統計所得各特徵參數之條件機率函數，與前述頻率分布函數(圖 1a 至圖 1c)一併觀之，干擾回波資料相較非干擾回波資料，其 $fftIF$ 空間頻率成分多在約 4dBZ 以上(圖 1a、圖 1d)，資料在方位角方向連續性偏低(圖 1b、圖 1e)，資料在垂直方向上有效回波資料比例偏低(圖 1c、圖 1f)。弧狀回波資料相較非弧狀回波資料，其 $fftAA$ 特徵頻率成分多在約 20dBZ 以上(圖 2a、圖 2d)，資料在徑向上連續性偏低(圖 2b、圖 2e)，資料在垂直方向上有效回波資料比例偏低(圖 2c、圖 2f)。海面雜波相較非海面雜波資料，

回波值多在 10dBZ 以下(圖 3a、圖 3e)，資料 SPIN 值偏高(圖 3b、圖 3f)，資料在方位角方向標準差較低(圖 3c、圖 3g)，而在徑向上標準差偏高(圖 3d、圖 3h)。地形雜波相對非地形雜波，其回波徑向速度多落在零值附近(圖 4a、圖 4f)，回波資料多在 0 至 20dBZ 之間與 40dBZ 以上(圖 4b、圖 4g)，SPIN 值偏高(圖 4c、圖 4h)，資料在徑向與方位角方向標準差偏高(圖 4d、圖 4e、圖 4i、圖 4j)。雷達故障雜波相較非雷達故障雜波，回波值多在 15dBZ 以下(圖 5a、圖 5f)，SPIN 值偏低(圖 5b、圖 5g)，資料在徑向與方位角方向標準差偏低(圖 5c、圖 5d、圖 5h、圖 5i)，CRAzi 值多落在 90% 以上(圖 5e、圖 5j)。

本研究在所得條件機率函數客觀基礎上，輔以氣象科學主觀經驗修正，並採用分段線性決定隸屬函數 $L_{k,s}(x)$ 。各模糊邏輯演算法使用之特徵參數隸屬函數分示如下：干擾回波(圖 1g 至圖 1i)、弧狀回波(圖 2g 至圖 2i)、海面雜波(圖 3i 至圖 3m)、地形雜波(圖 4k 至圖 4p)、雷達故障雜波(圖 5k 至圖 5o)。

將雷達資料點進行計算得到特徵值 x_k 後，經對應隸屬函數轉換得非天氣回波發生機率值 $L_{k,s}(x_k)$ ，再乘以相應權重 $W_{k,s}$ 平均得資料點屬於分類 s 之機率值：

$$Y_s = \frac{\sum_k L_{k,s}(x_k) \times W_{k,s}}{\sum_k W_{k,s}}$$

上式中權重之決定，為本研究透過個案測試，主觀選擇能較佳偵測並濾除非天氣回波並保留天氣回波之權重。當累加之非天氣回波發生機率值 Y_s 高於給定門檻值 50% 時，則將資料點視為非天氣回波並濾除之。本研究各種非天氣回波模糊邏輯演算法所使用之權重組合列於各隸屬函數圖中方框。

三、 個案評估

在利用前述雷達資料集進行模糊邏輯演算法之建立後，本研究另選取五個案驗證並展示模糊邏輯演算法之表現能力。

(一) 干擾回波個案

2020 年 3 月 23 日 1218 UTC RCWF 雷達 0.5° 觀測資料中，出現之干擾回波幾乎分布在各方位角方向上，與出現在台灣北方之天氣回波資料有大範圍重疊，如

圖 6a 所示。由於出現干擾回波之徑向資料會有較高的特徵參數 fitIF 值，而特徵參數 fitIF 對應之隸屬函數權重達 50%，因此個案經干擾回波模糊邏輯演算法計算所得干擾回波發生機率只在出現有干擾回波之徑向資料有較高發生機率。而在干擾回波與天氣回波沒有重疊處，其回波資料在方位角方向連續性較低，因此對應 PAC 值之干擾回波發生機率較高，反之則較低。由於干擾回波不像天氣回波有垂直發展，因此在與天氣回波沒有重疊處，其對應 VrAvR 值之干擾回波發生機率較高，反之則較低。依權重計算干擾回波總發生機率，在沒有與天氣回波重疊之干擾回波區域會被賦予較高發生機率，反之則較低，如圖 6b 所示。依門檻值 50% 以上可有效移除大部分干擾回波並保留主要天氣回波不被移除，如圖 6c 所示。

(二) 弧狀回波個案

2020 年 3 月 23 日 1218 UTC RCWF 個案為前干擾回波個案同筆掃描資料之 1.3° 觀測資料，個案中弧狀回波出現在幾乎所有方位角方向上，與臺灣北方天氣回波區域重疊，如圖 7a 所示。由於出現弧狀回波之徑向資料會有較高的特徵參數 fitAA 值，經相應隸屬函數轉換後，這些區域會被賦予較高弧狀回波發生機率，然而弧狀回波不像天氣回波在徑向上有較高資料連續性，並且不像天氣回波具有垂直發展特性，因此在弧狀回波沒有和天氣回波重疊之區域，由特徵參數 PRC 與 VrAvR 值轉換所得弧狀回波發生機率會較高，經權重平均所得弧狀回波總發生機率在天氣回波區域會較低，如圖 7b 所示。經門檻值 50% 以上可移除大部分弧狀回波並保留主要天氣回波不被移除，如圖 7c 所示，然而由於個案中干擾回波密集出現在 RCWF 雷達低層仰角資料中的北方區域，導致北方區域中的弧狀回波有較高特徵參數 VrAvR 值，因此易被判定為天氣回波而沒有被移除。

(三) 海面雜波個案

2017 年 3 月 2 日 0000 UTC RCWF 雷達個案受東北季風影響，0.5° 觀測資料中於雷達北方與東方出現明顯海面雜波雜訊，與東南方天氣回波部分重疊，如圖 8a 所示。由於個案中海面雜波之回波值多在 10dBZ 以下，且其資料在方位角方向有較低標準差，並且海面雜波有一定發生位置，故加上氣候統計所貢獻之海面

雜波發生機率，在海面雜波發生區域已能賦予高於門檻值 50% 之海面雜波發生機率(圖 8b) 移除之，同時保留東南方主要天氣回波區域不被移除(圖 8c)。

(四) 地面雜波個案

2020 年 8 月 4 日 1108 UTC RCCG 雷達個案中，自中央山脈反射之地形雜波出現在 2.4° 觀測資料中與天氣回波重疊，如圖 9a 所示。由於地形雜波的回波徑向速度多在零值附近，且其 SPIN 值相對天氣回波明顯偏高，加以地形雜波發生在一定位置上，輔以氣候統計貢獻之地面雜波發生機率後，個案中地形雜波發生區域已被賦予高於門檻值 50% 之地形雜波發生機率(圖 9b)，進而被有效移除同時保留主要天氣回波不被移除(圖 9c)。

(五) 雷達故障雜波

2018 年 4 月 22 日 1337 UTC RCHL 雷達個案中，由於雷達發生不明原因故障導致產出之 1.4° 觀測資料出現環狀雷達故障雜波，與雷達東南方之天氣回波重疊，如圖 10a 所示。由於出現之環狀雜波所具回波值多在 20dBZ 以下，與天氣回波相比，此環狀雜波其回波值在徑向與方位角方向具有較低標準差，以及具有低 SPIN 值與高 CRAzi 值，因此被雷達故障雜波演算法賦予高於 50% 之雷達故障雜波發生機率(圖 10b)，經門檻值 50% 以上可移除之並保留主要天氣回波不被移除，如圖 10c 所示。

四、結論

此研究在王等(2017)發展模糊邏輯演算法之基礎，改進既有干擾回波演算法並擴大應用至海面雜波、地形雜波以及弧狀回波。如第三節個案評估所示，所發展之模糊邏輯演算法已能有效移除臺灣雷達觀測網中常見之干擾回波、弧狀回波、海面雜波、地形雜波與雷達故障雜波，並保留天氣回波不被移除，然而 RCWF 雷達資料中若同時發生嚴重干擾回波以及弧狀回波，會有殘留過多弧狀回波未被移除的情況，尚有改進空間。目前各隸屬函數之權重為透過個案測試主觀決定，若能透過敏感度測試以客觀決定權重，期能提升演算法整體濾除非天氣回波之能力，未來亦將應

用模糊邏輯分類演算法至濾除異常回波(AP)，完善臺灣雷達觀測網作業資料品質控制技術。

達雜波之應用。天氣分析與預報研討會論文集編。

Berenguer, M., D. Sempere-Torres, C. Corral, and R. Sánchez-Diezma, 2006: A fuzzy logic technique for identifying nonprecipitating echoes in radar scans. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **23**, 1157–1180.

參考文獻

王忠斌，Lester Kim M. Lagrimas，林品芳，張保亮，方偉庭，2017：模糊邏輯分類演算法於濾除雷

表 1 建立各種非天氣回波模糊邏輯演算法之隸屬函數所使用之雷達觀測資料集

(1) 干擾回波資料集	RCWF 雷達干擾回波資料 (2018 年) 05.06 # 20 筆，05.13 # 25 筆，06.25 # 61 筆，06.27 # 4 筆，06.28 # 4 筆，共 114 筆，4030 條徑向資料	RCWF 雷達尼莎颱風資料(2017 年) 07.29 #5 筆，共 5 筆，3600 條徑向資料
(2) 弧狀雜波資料集	RCWF 雷達弧狀雜波資料(2019 年) 5 月#318 筆，6 月# 429 筆，7 月#507 筆，8 月#545 筆，共 1799 筆，8102 條徑向資料	RCWF 雷達利奇馬颱風資料(2019 年) 08.08 # 10 筆，08.09 # 31 筆，共 41 筆，29520 條徑向資料
(3) 海面雜波資料集	RCWF 雷達海面雜波資料(2018 年) 01.09 # 21 筆，01.10 # 97 筆，01.11 # 133 筆，01.12 # 94 筆，01.22 # 25 筆，共 370 筆	RCWF 雷達天氣回波資料(2018 年) 01.06 # 13 筆，01.07 # 9 筆，01.08 # 14 筆，共 36 筆
(4) 地面雜波資料集	RCCG 雷達地面雜波資料(2018 年) 01.01 至 01.30，共 1986 筆	RCCG 雷達海棠颱風資料(2017 年) 07.30，共 22 筆
(5) 雷達故障雜波資料集	RCHL 雷達故障雜波資料(2018 年) 04.18 至 04.29，共 36 筆	RCHL 雷達天氣回波資料(2018 年) 06.14，共 14 筆

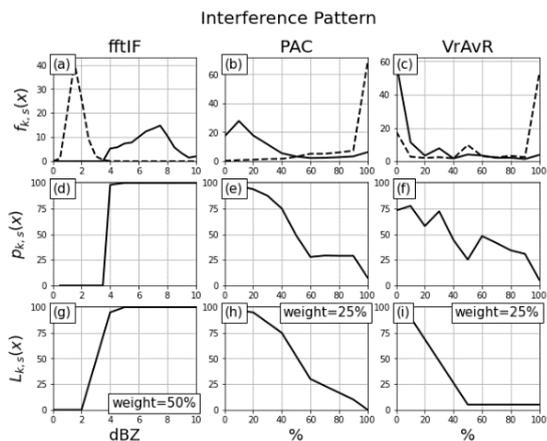


圖 1 干擾回波模糊邏輯演算法之頻率分布函數(a)、(b)、(c)、條件機率函數(d)、(e)、(f)、隸屬函數(g)、(h)、(i)。實線對應干擾回波資料，虛線對應非干擾回波資料。演算法所使用之特徵參數依欄排列，頻率分布函數 Y 軸單位為比例，條件機率函數與隸屬函數 Y 軸單位為機率。各圖 X 軸單位為特徵參數之單位，fftIF 為 dBZ，PAC 和 VrAvR 為 %。各隸屬函數權重示於圖中方框。

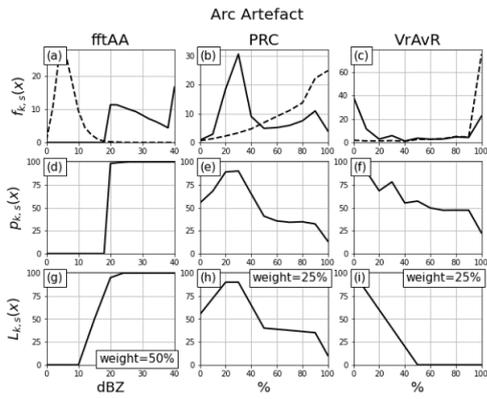


圖 2 弧狀回波模糊邏輯演算法之頻率分布函數、條件機率函數、隸屬函數。實線對應弧狀回波資料，虛線對應非弧狀回波資料。圖示同圖 1 所示。特徵參數 fftAA 單位為 dBZ，PRC 為 %。

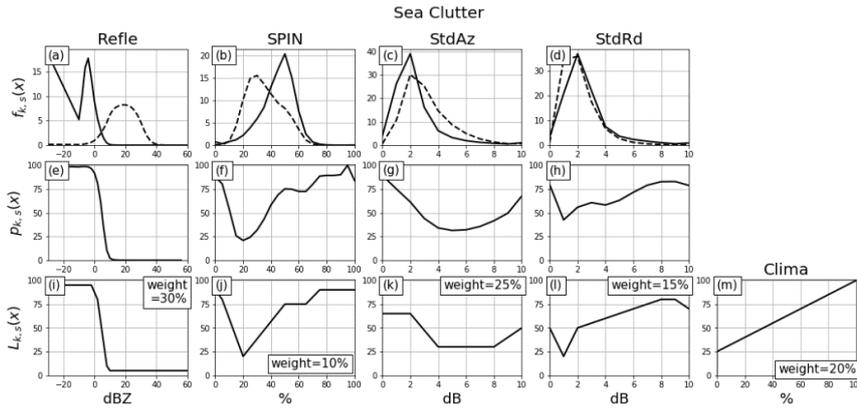


圖 3 海面雜波模糊邏輯演算法之頻率分布函數、條件機率函數、隸屬函數。實線對應海面雜波資料，虛線對應非海面雜波資料。圖示同圖 1 所示。特徵參數 Refle 單位為 dBZ，SPIN 與 Clima 為 %，StdAz 與 StdRd 為 dB。其中特徵參數 Clima 為回波氣候統計，故只有隸屬函數。

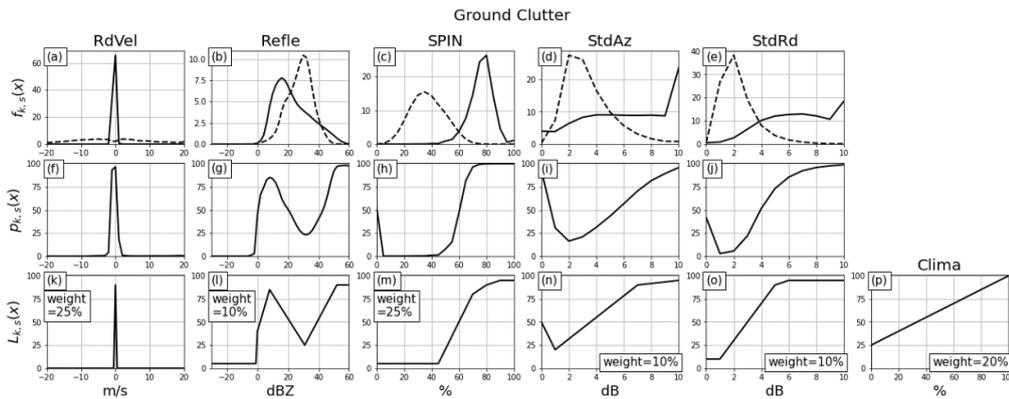


圖 4 地面雜波模糊邏輯演算法之頻率分布函數、條件機率函數、隸屬函數。實線對應地面雜波資料，虛線對應非地面雜波資料。圖示同圖 1 所示。特徵參數 RdVel 單位為 m/s。

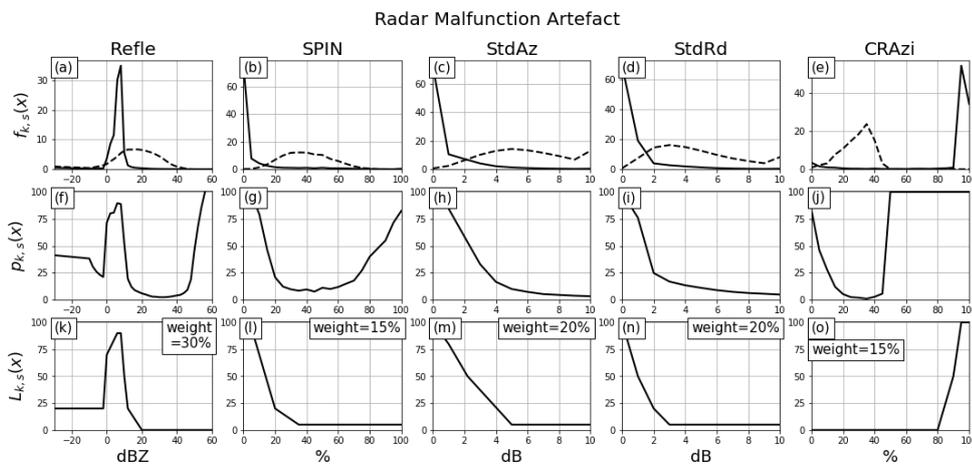


圖 5 雷達故障雜波模糊邏輯演算法之頻率分布函數、條件機率函數、隸屬函數。實線對應雷達故障雜波資料，虛線對應非雷達故障雜波資料。圖示同圖 1 所示。特徵參數 CRAzi 單位為 %。

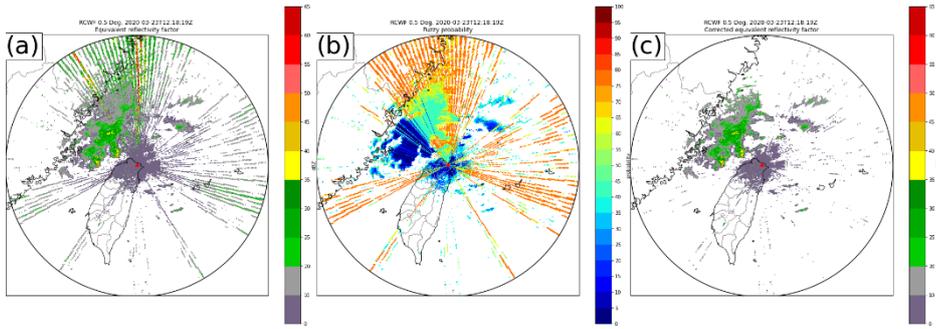


圖 6 干擾回波模糊邏輯演算法之驗證個案。使用 RCWF 雷達個案 2020 年 3 月 23 日 1218 UTC 0.5°觀測資料。(a)個案 QC 前雷達資料；(b)經干擾回波模糊邏輯演算法計算所得干擾回波發生機率；(c)以門檻值 50%濾除之個案 QC 後雷達資料。

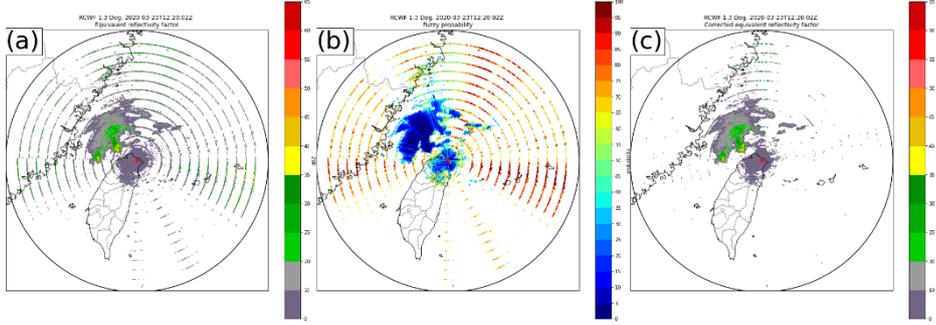


圖 7 弧狀回波模糊邏輯演算法之驗證個案。使用圖 6 個案之 1.3°觀測資料。圖示同圖 6。

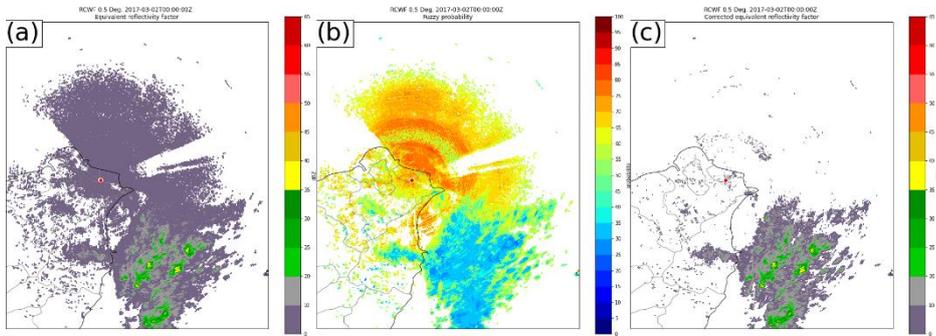


圖 8 海面雜波模糊邏輯演算法之驗證個案。使用 RCWF 雷達個案 2017 年 3 月 2 日 0000 UTC 0.5°觀測資料。圖示同圖 6。

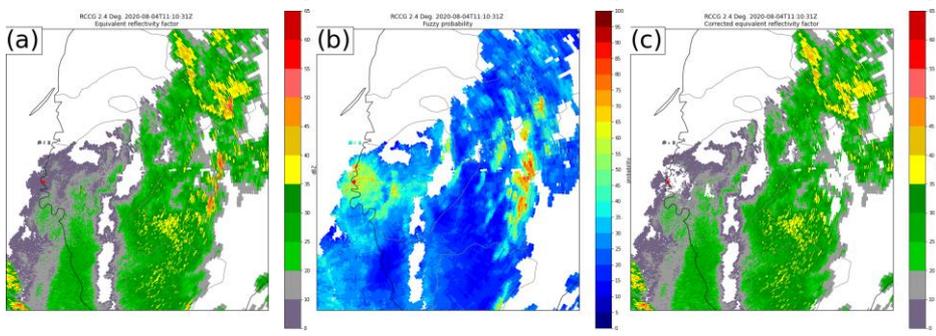


圖 9 地面雜波模糊邏輯演算法之驗證個案。使用 RCCG 雷達個案 2020 年 8 月 4 日 1108 UTC 2.4°觀測資料。圖示同圖 6。

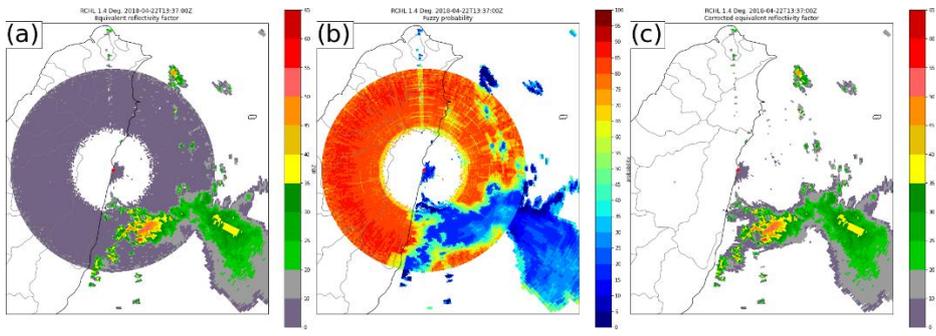


圖 10 雷達故障雜波模糊邏輯演算法之驗證個案。使用 RCHL 雷達個案 2018 年 4 月 22 日 1337 UTC 1.4°觀測資料。圖示同圖 6。