



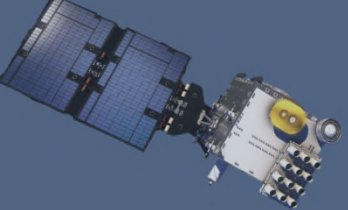
利用神經網路模型提升獵風者衛星 於高風速條件下之反演能力

國防大學理工學院 環境資訊及工程學系

報告人：黃贊翰

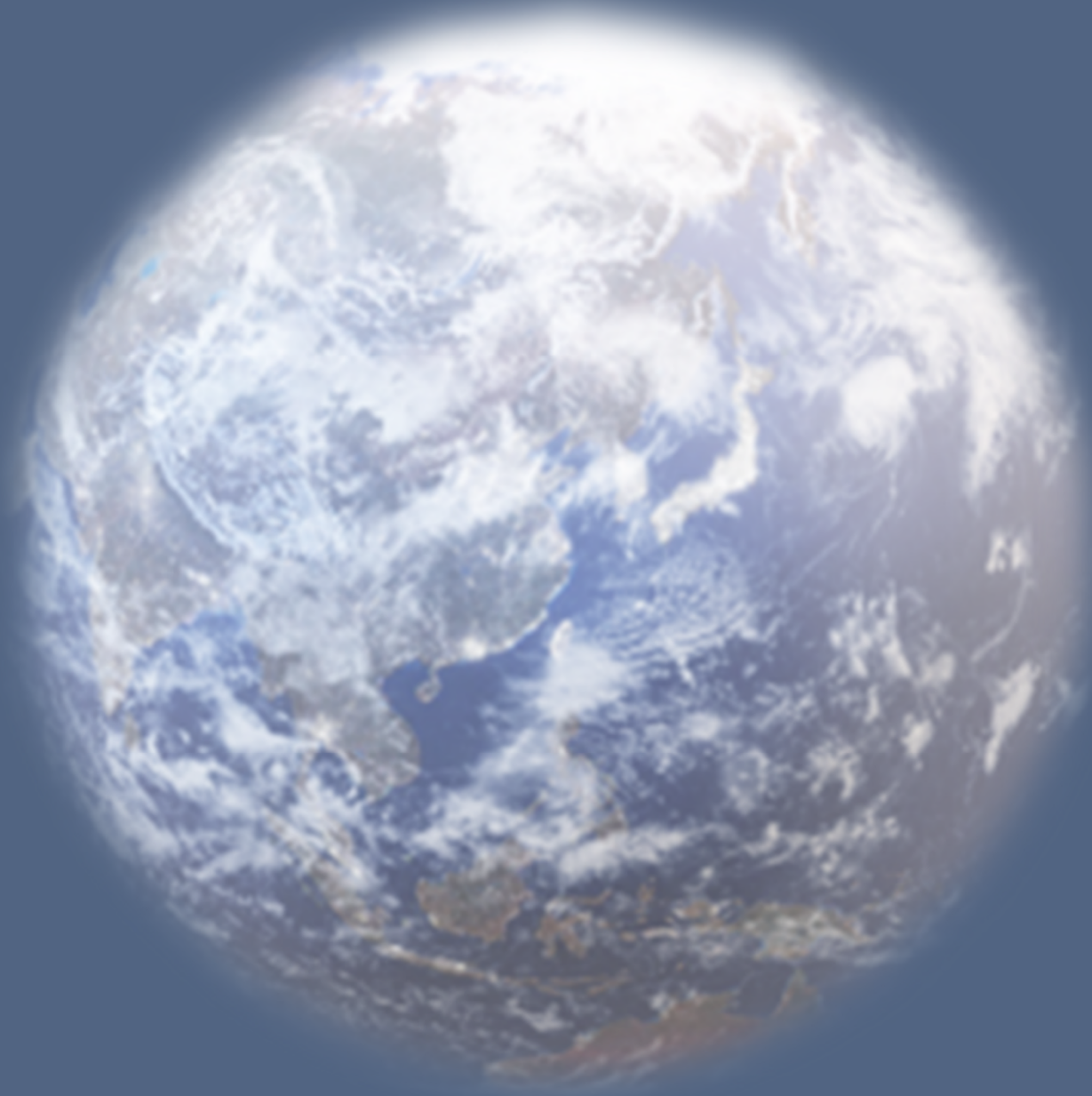
共同作者：蔡世樵 陳致穎

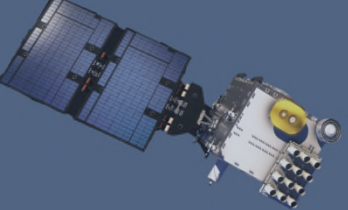




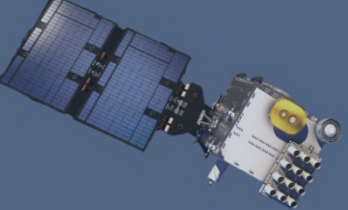
大綱

- 前言
- 資料來源簡介
- 研究架構
- 參數訓練組合
- 實驗結果與分析
- 結論
- 參考資料





前言



研究背景與動機

- 我國海軍每年執行敦睦艦隊遠洋訓練任務，航程動輒橫跨數千哩，涵蓋太平洋、南海及熱帶洋面，航行期間常面臨天氣突變、風浪劇烈等挑戰。艦隊需依賴即時、精確的氣象與海象資訊，作為航線規劃、風浪規避與應變決策的依據，以確保任務順利與人員安全，若能即時掌握目標海域的風速與波浪狀況，將大幅提升艦隊應對突發氣海象的能力。
- 臺灣於2023年10月發射第一枚自主氣象衛星獵風者(TRITON)，搭載了自主研發的全球導航衛星系統反射訊號接收儀 (Global Navigation Satellite System-Reflectometry, GNSS-R)，主要提供海面風速(ocean surface wind speed, OSWS)、海面平均坡度(Mean Square Slope, MSS)以及示性波高(Significant Wave Height, SWH)等資料。

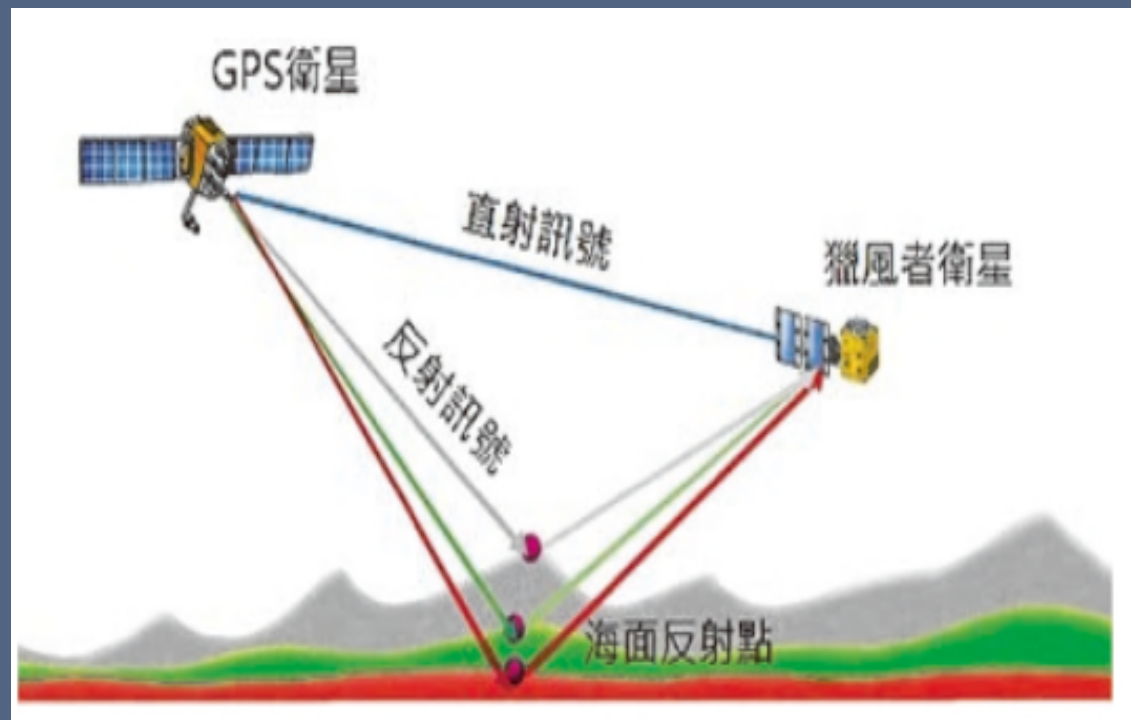
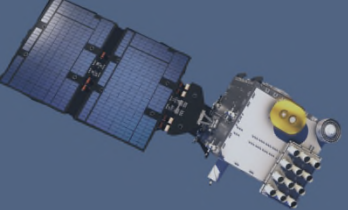


圖1 GNSS-R 技術示意圖(圖片來源：國家太空中心)



研究背景與動機

- 然而，雖然GNSS-R技術具備產品即時性高、訊號較不受劇烈天氣影響等優點，但當海面風速增加時，其反演風速之可靠性也隨之下降；主要原因為此技術乃藉由反射訊號中不同遲延以及都卜勒頻率的強度，產出遲延-都卜勒圖(Dealy-Doppler Map, DDM)，進而計算反射點附近之延遲-都卜勒圖平均值(DDMA)，再透過大量觀測數據建立DDMA與海面風速之地球物理模型函數(geophysical model function, GMF)。

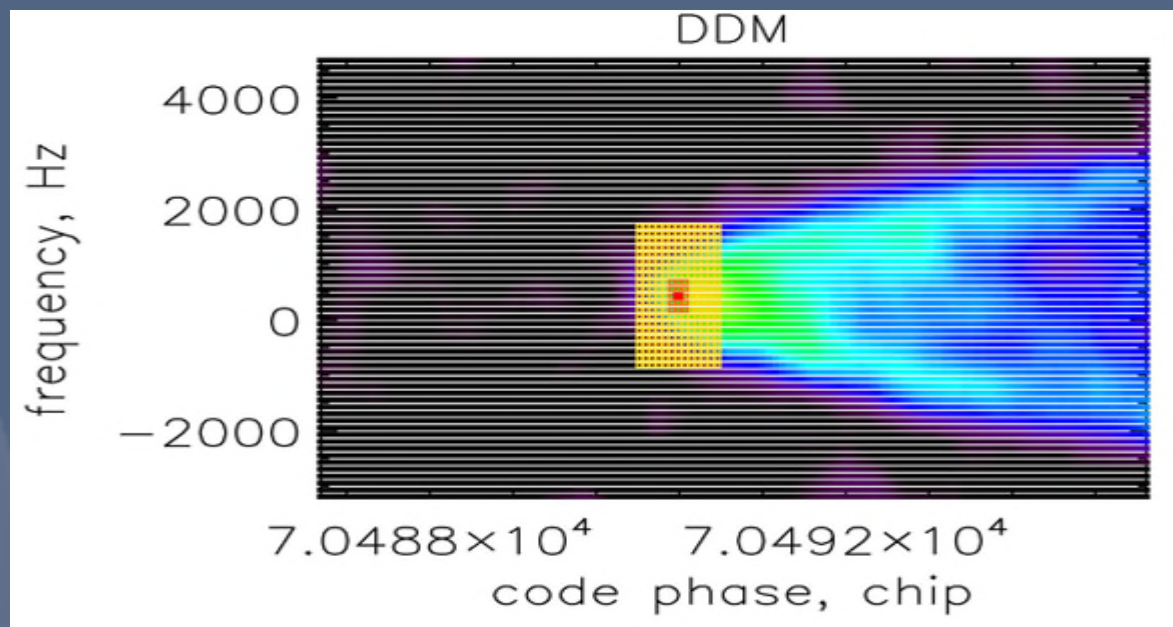
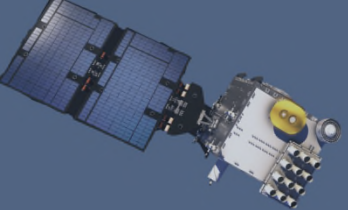


圖2 延遲-都卜勒圖1x1、3x5 與 13x21 bin 選取範圍示意圖(紅點1x1、紅長方形3x5、黃長方形13x21)

(圖片來源：國家太空中心-獵風者手冊)



研究背景與動機

- 當海面風速增大至一定程度時，對應之DDMA敏感度會隨之下降，進而導致反演風速之不確定性(圖3)。
- 目前獵風者衛星GNSS-R技術在高風速 ($>20\text{m/s}$) 條件下的反演敏感度下降問題，對於颱風等劇烈天氣監測較有挑戰。
- 本研究欲透過神經網路其良好的非線性學習能力，自動從 DDMpower、MSS、NBRCs 等複雜特徵中學習規律，進而有效改善高風速下的反演誤差，提升整體準確性。

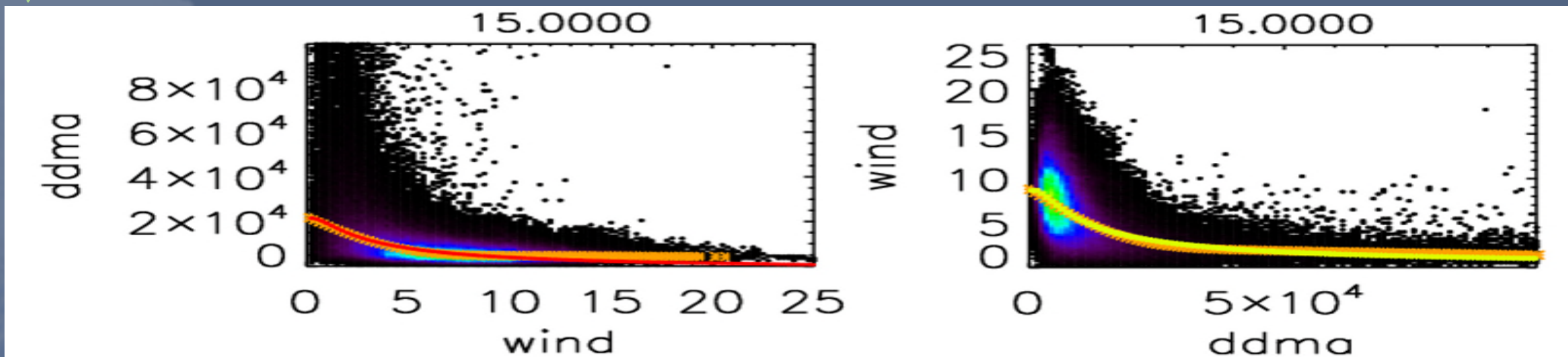
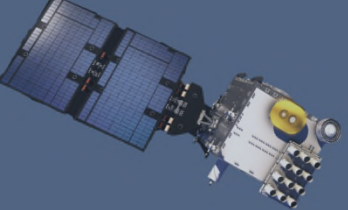
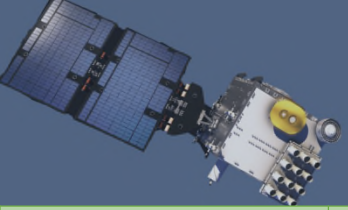


圖3 (左)ECMWF OSWS與DDMA比對散佈圖 (右) DDMA與ECMWF OSWS比對散佈圖(圖片來源：國家太空中心)

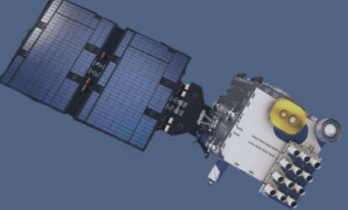


資料來源簡介



資料來源簡介

項目	Triton (GNSS-R)	ERA5	CCMP V3.1	WRF(現研究設定)
資料類型	衛星實測 (GNSS-R反射訊號)	再分析資料 (數值模式 + 資料同化)	多衛星交叉校正風場	數值天氣模擬模型
資料層級	Level 1b (DDMpower等) Level 2 (OSWS、MSS、 SWH)	U10 / V10 風速 SWH MSS	WS(10m)	U10 / V10 風速
時間解析度	非固定	每 1 小時	每 6 小時	每1小時
空間解析度	非格點式	0.25° (風) 0.5° (浪)	0.25° × 0.25°	25km
時間涵蓋範圍	2023年10月起 (持續釋出)	1950年至今 (每日更新)	1993年至今 (每日更新)	20241001 00Z- 20241006 00Z
檔案格式	NetCDF	NetCDF 或 GRIB	NetCDF-4	NetCDF-4
資料來源	國家太空中心 (TASA)	歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF)	NASA PO.DAAC	自建模擬 (初始條件可用 ERA5/NCEP)
本研究用途	輸入特徵 (ddmpower/ddma、 NBRCS、MSS等)	輸入特徵、訓練目標	誤差指標計算參考	測試階段：輸入風速轉換 後的MSS



Triton L2與ERA5資料蒐集與相關性分析

- 時間：2023年11月至2024年11月
- 經緯度：東經110至150度；北緯10至40度(如圖4)
- Triton L2 使用參數：
 - 海表面(10米)風速
(ocean surface wind speed, OSWS)(低於20m/s)
 - 海面平均坡度(mean square slope, mss)
 - 顯著波高(significant height, hs)
- ERA5內插方式：時間與空間雙線性內插
- 資料過濾：風速(0-40 m/s)、波高(0-30 m)和均方斜率(0-0.2)的有效範圍過濾資料。
- 資料筆數：篩選後為共295,712筆。

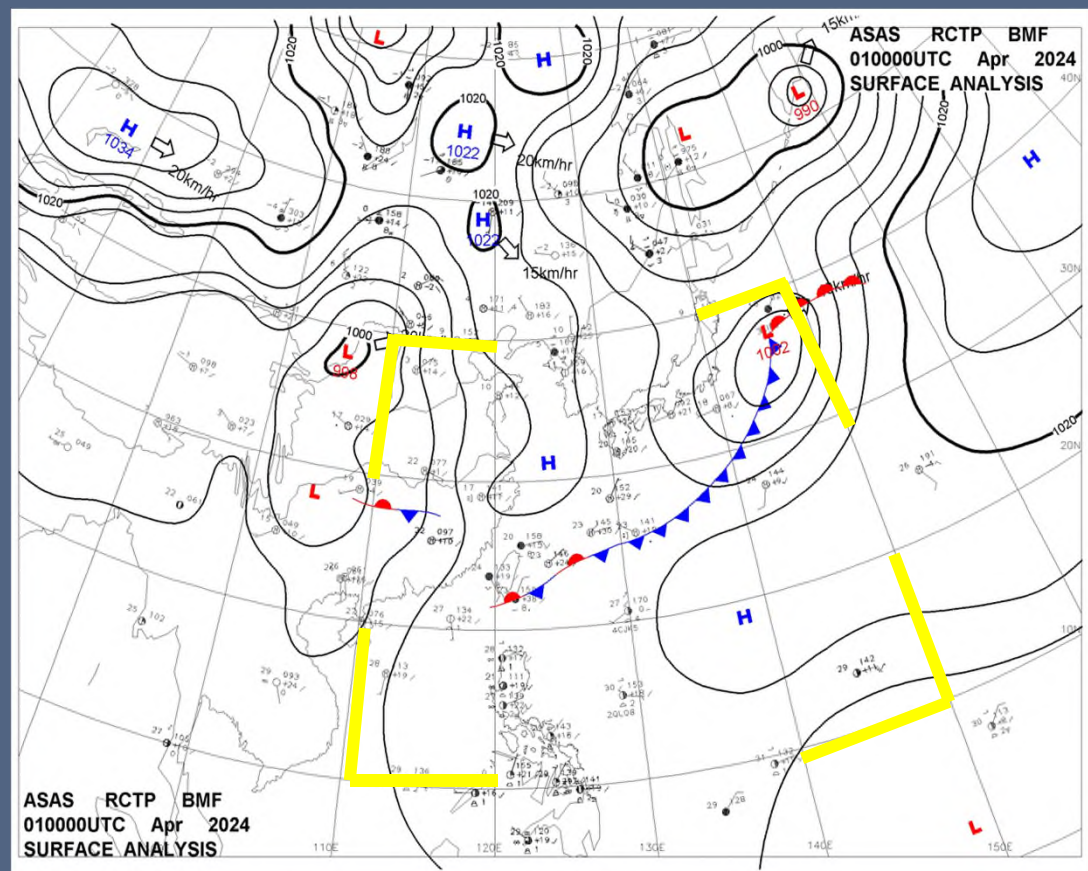
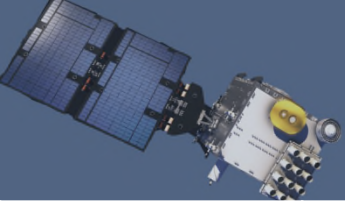


圖4 經緯圖範圍示意圖(黃色框內)
(圖片來源：中央氣象署)

Error Metric	OSWS(1*1)	OSWS(3*5)	OSWS(13*21)	MSS	SWH
Root Mean Square Slope(RMSE)	2.862	2.820	2.642	0.005	1.217
Mean Absolute Error(MAE)	2.186	2.161	2.029	0.003	0.951
Max Error	21.021	20.083	20.864	0.182	8.287
Correlation Coefficient	0.551	0.559	0.585	0.350	0.405
Mean Bias	-0.642	-0.618	-0.403	0.002	-0.632

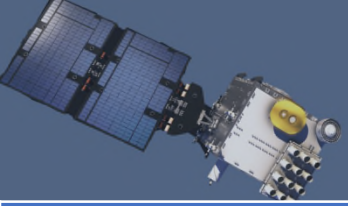
表1 2023年11月至2024年11月獵風者(OSWS1*1、OSWS3*5、OSWS13*21、MSS、SWH)與ERA5比對誤差分析



Triton L1b 參數

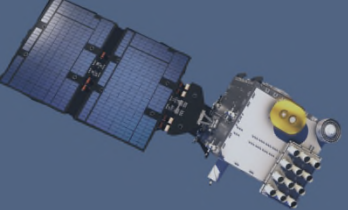
參數	說明
DDM	延遲-多普勒圖中 特定延遲和多普勒頻率的散射訊號功率 (使用 13x21 網格計算)，經校正 TRITON 接收器天線增益、接收器效應及GPS衛星天線增益
DDMA	延遲-多普勒圖 (DDM) 在 SP點周圍 13x21 bin 的平均散射功率
NBRCS	歸一化雙向雷達散射截面 ，單位面積的反射能力，代表海面粗糙度。使用 13x21 網格計算 ，中心為 SP點對應的延遲和多普勒頻率 ，已校正GPS衛星天線增益
LES	根據 DDM 的功率分布計算其前緣斜率 ，代表反射訊號從背景雜訊上升的速度，間接 反映海面起伏變化
ZenithSNR	GPS天頂方向的訊號雜訊比 ，評估信號品質
incang	入射角 ，GNSS 訊號進入海面反射點的角度，影響反射強度和散射特性
signalazi	訊號方位角 ，反映海面反射的方向性
signalpol	訊號極化 ，影響反射效率與觀測解析度

※SP 點 (Specular Point) 指 GPS 訊號從衛星反射至 TRITON 接收器時，海洋表面上反射訊號強度最大的點

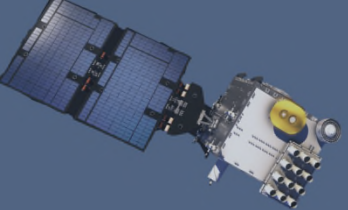


ERA5 參數

參數	說明
Significant height of combined wind waves and swell (SWH)	顯著波高 是指海浪（包括風浪和湧浪）高度的平均值，通常定義為 最高三分之一波高的平均值 （單位：公尺）。它 反映 了海洋表面波浪的總體高度，綜合了由當地風力引起的 風浪 和遠處風暴傳播來的 湧浪
Mean square slope of waves (MSS)	均方斜率描述了海浪表面傾斜度的統計特性，反映 波浪的陡峭程度 。它是通過波浪譜計算得出的無量綱參數， 與波浪的粗糙度和能量分佈相關
10m u-component of wind(U10)	此參數表示在離地 10公尺 高度處， 風速在東西方向上的分量 （單位：m/s）。正值表示向東的風(西風)，負值表示向西的風(東風)
10m v-component of wind(V10)	此參數表示在離地 10公尺 高度處， 風速在南北方向上的分量 （單位：m/s）。正值表示向北的風(南風)，負值表示向南的風(北風)



研究架構



研究架構

Input Layer

2023年11月至2024年9月
(329,570筆)

Triton

ERA5

DDMpower
DDMA
NBRCS
LES
Time
Lat/Lon
Singnalzai
Singnalpol
Incang
ZenithSNR

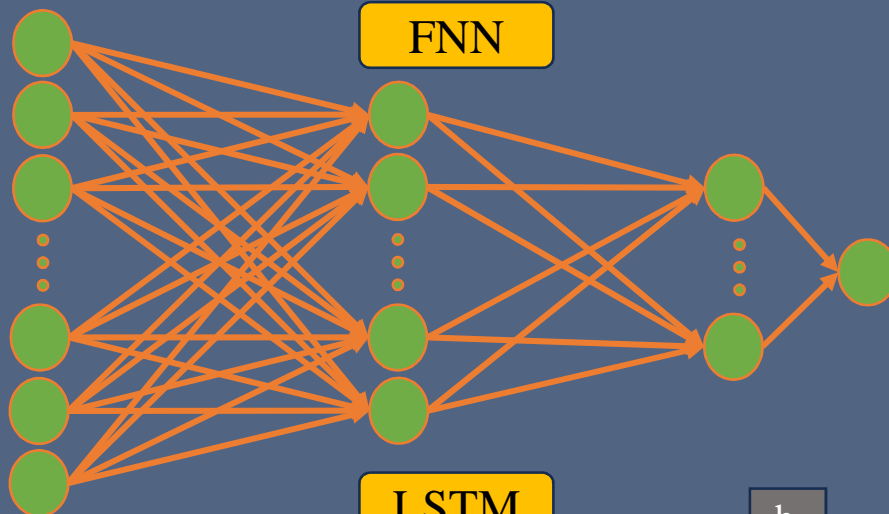
MSS
SWH
WS→MSS
(Hwang
and Wang,
2000)



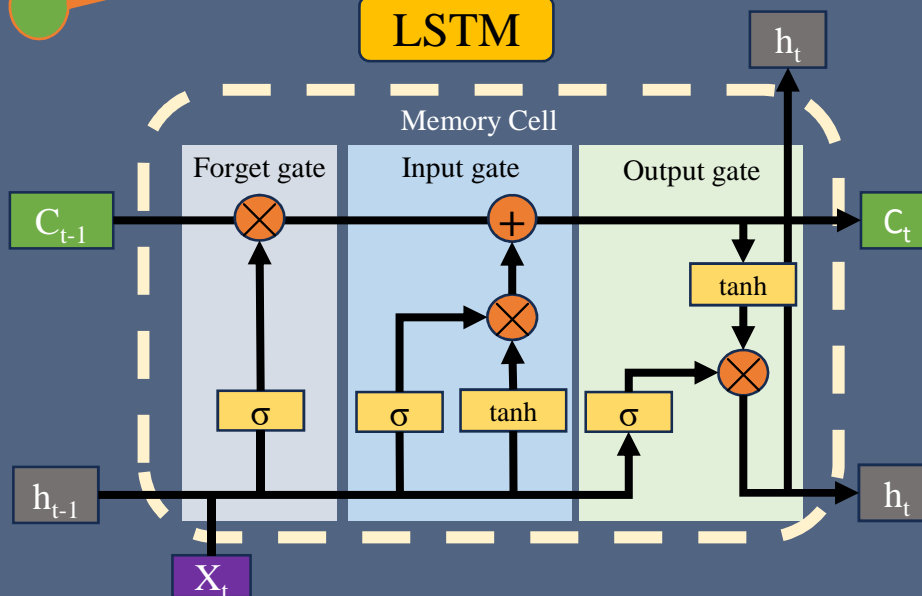
Neural Network

Train with ERA5_WS reference target

FNN



LSTM



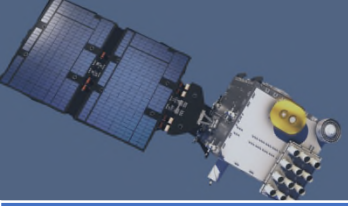
Loss = MSE、Activation = Relu
Dropout、L2正則化、Optimizer = Adam



Output Layer

2024年10月1日至5日
(4,056筆)

RMSE、Scatterplot
compared with CCMP



WRF參數及基本設定

參數	說明
日期	2024年10月1日00Z至10月6日00Z
domain	1(如圖5)
空間解析度	25km
時間解析度	1hr
雲微物理	WSM6
邊界層物理	YSU
輸出變數	U10、V10

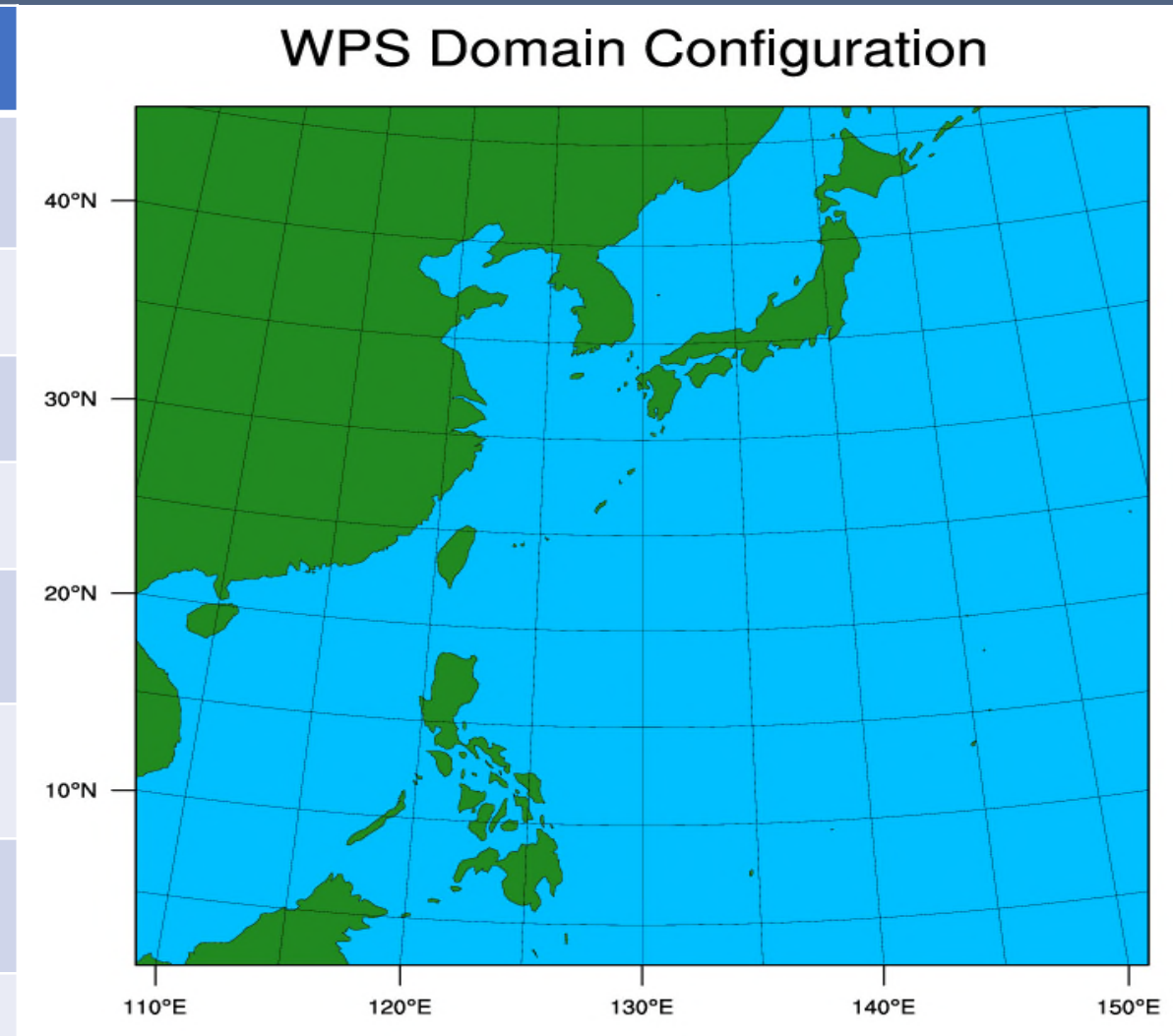
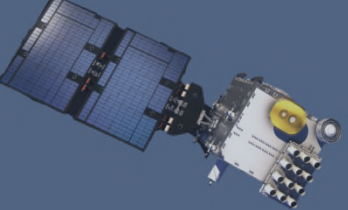


圖5 domain示意圖

說明：可用WRF模擬風速轉換為MSS代替ERA5_MSS，能有效解決ERA5資料時間延遲問題。

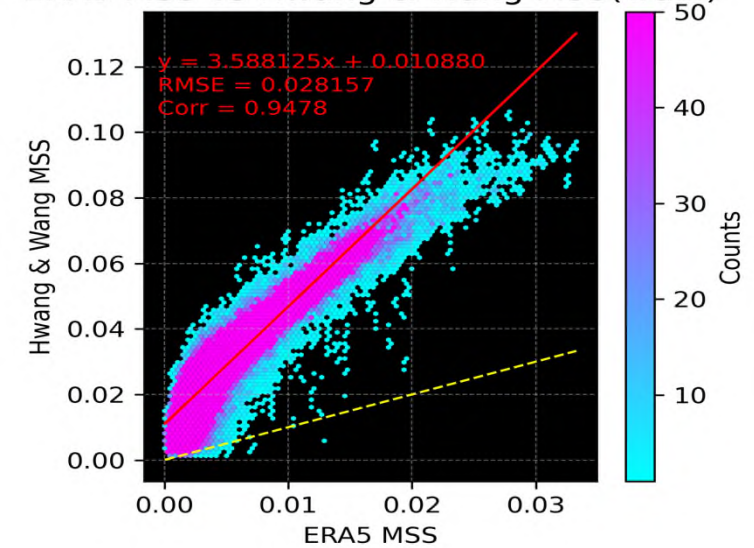


參數訓練組合

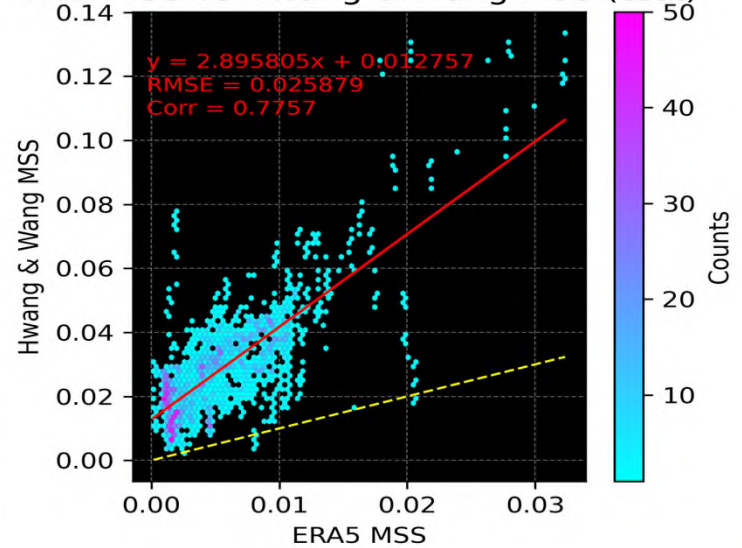
參數

Dataset	Triton 物理參數	Triton 幾何參數	Triton 時空參數	訊號/儀器參數	外部參數
1	NBRCS	incang			
2	DDMA+NBRCS				ERA5_MSS +ERA5_SWH
3	DDMA+NBRCS+L ES	signalazi+incang	Time+Latitude +Longitude	Signalpol +ZenithSNR	ERA5_MSS +ERA5_SWH
4	DDMA+NBRCS+L ES	signalazi+incang	Time+Latitude +Longitude	Signalpol +ZenithSNR	
5	DDMA+NBRCS+L ES	signalazi+incang	Time+Latitude +Longitude	Signalpol +ZenithSNR	ERA5_MSS訓練 WRF_MSS測試

ERA5 MSS vs Hwang & Wang MSS (Train)



WRF MSS vs Hwang & Wang MSS (test)



MSS經ERA/WRF風速轉換公式：

- 參考了 Hwang and Wang (2000)
- $s^2 = MSS = 5.12 \times 10^{-3} U_{10} + 1.25$
- 主要根據衛星與浮標觀測，適用於 0 到 20 m/s 的風速範圍，假設 MSS 和風速呈線性關係。

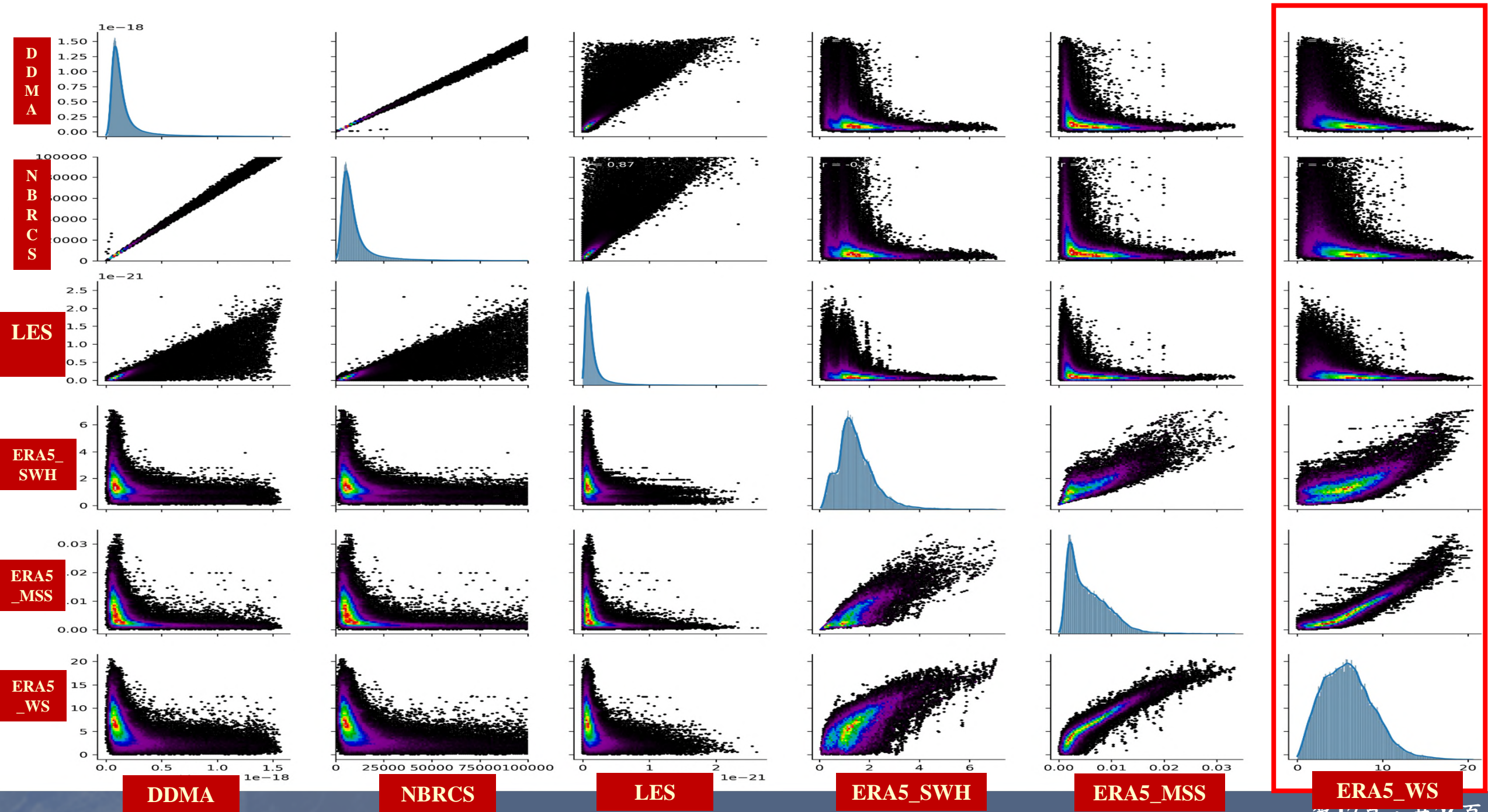
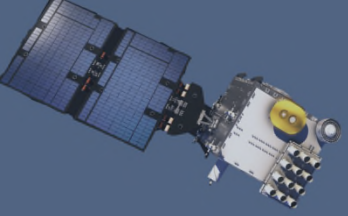
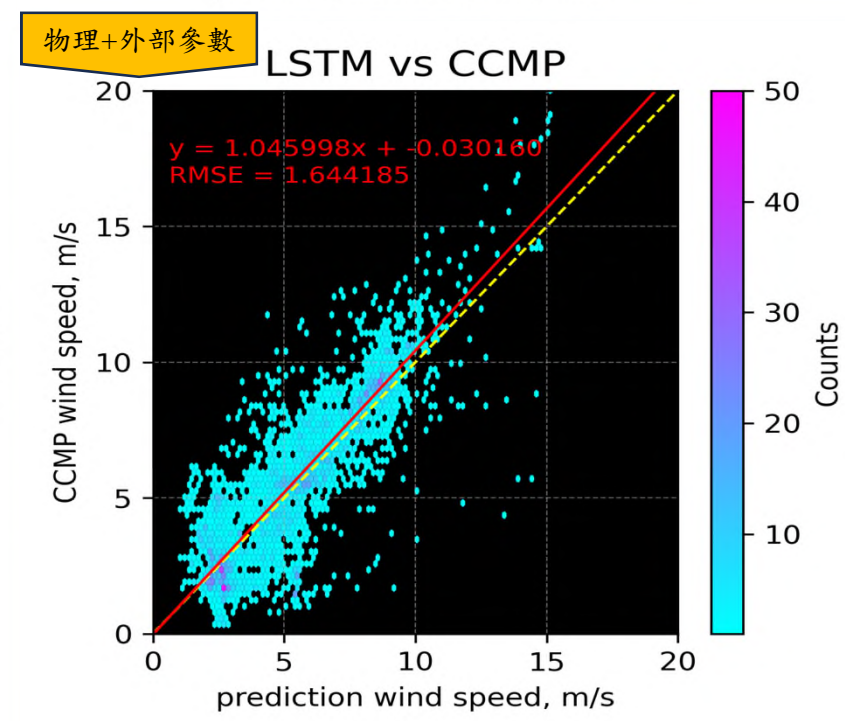
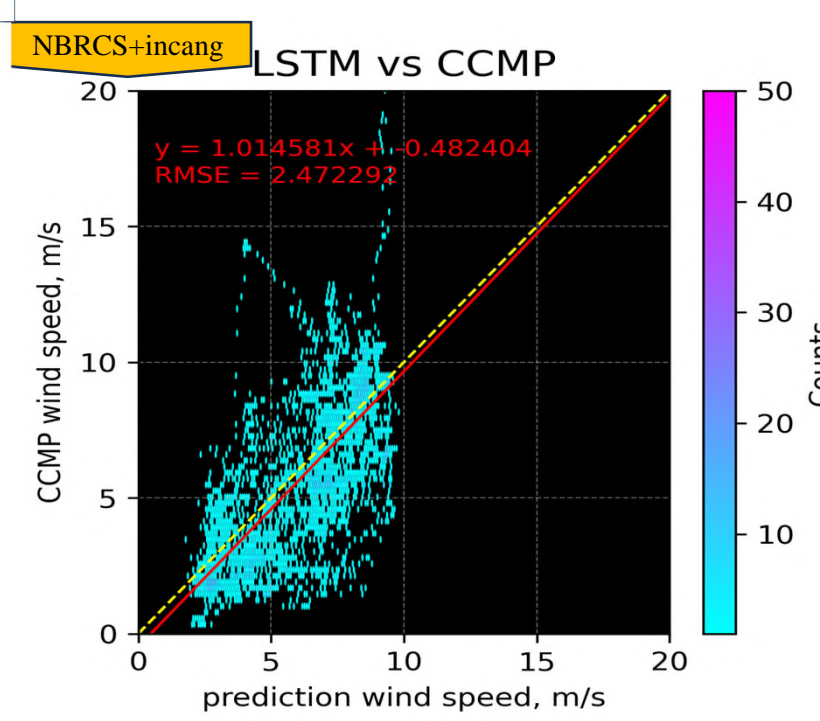
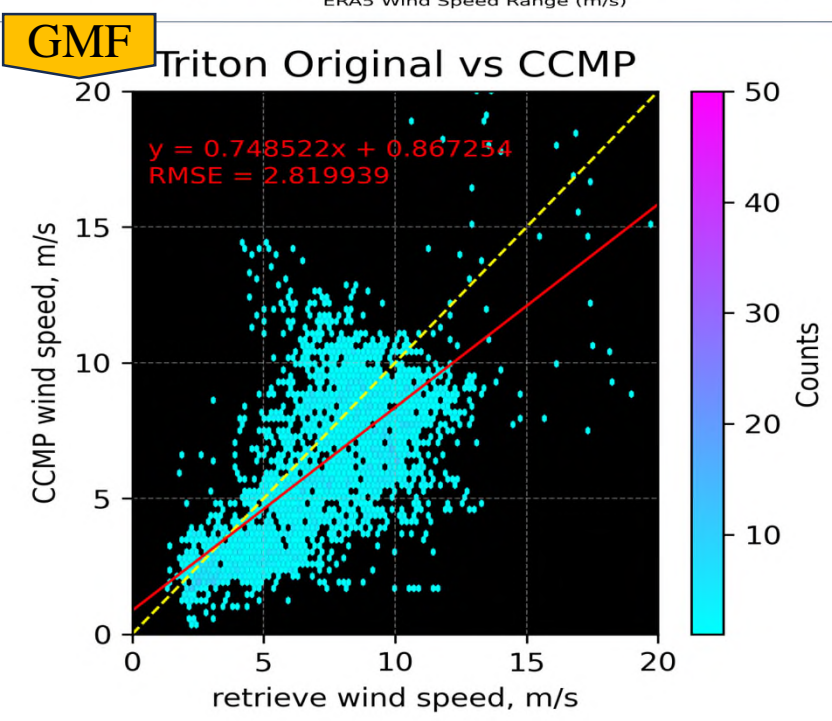
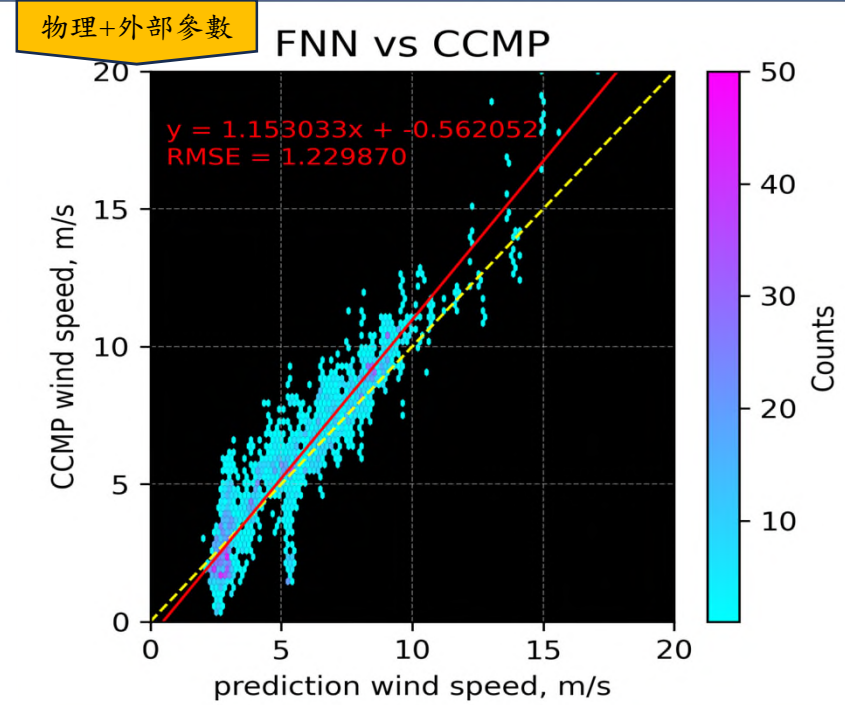
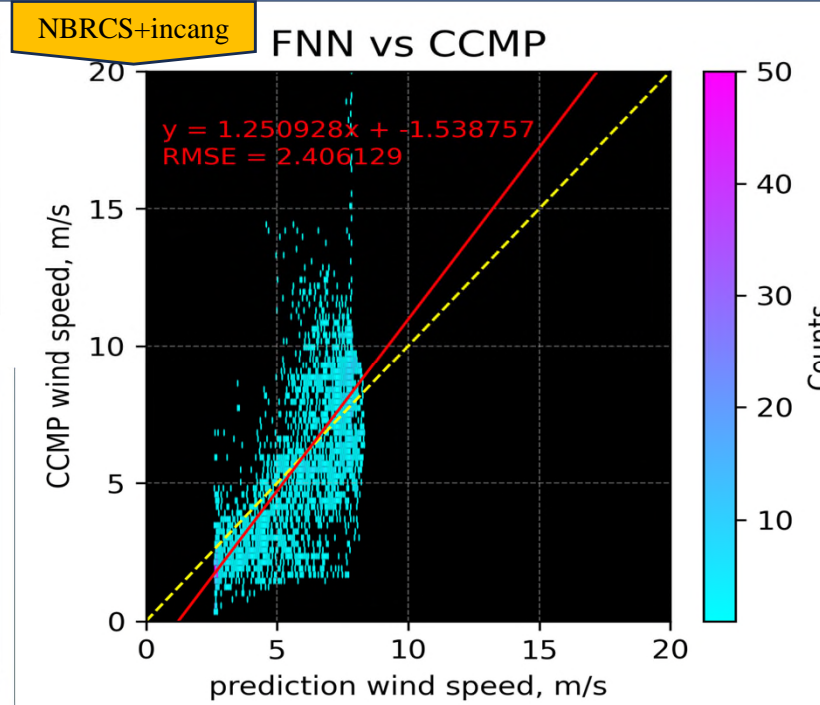
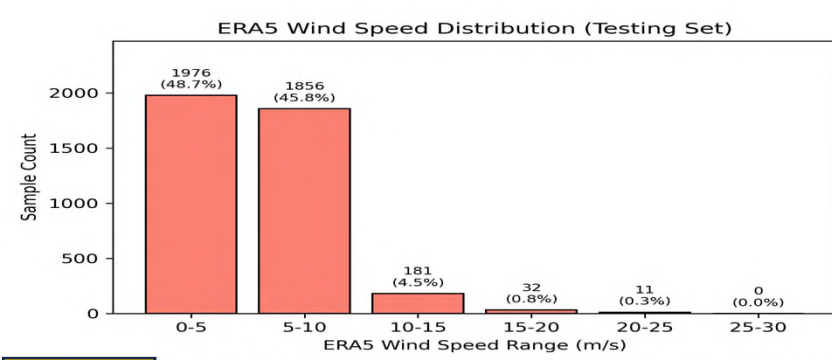
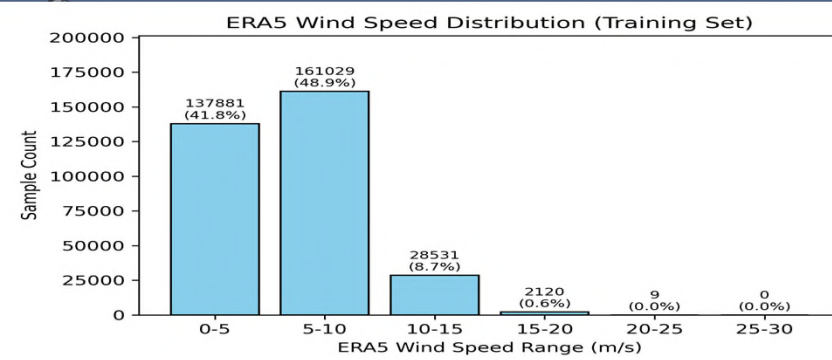


圖6 訓練特徵分佈與密度圖



實驗結果與分析



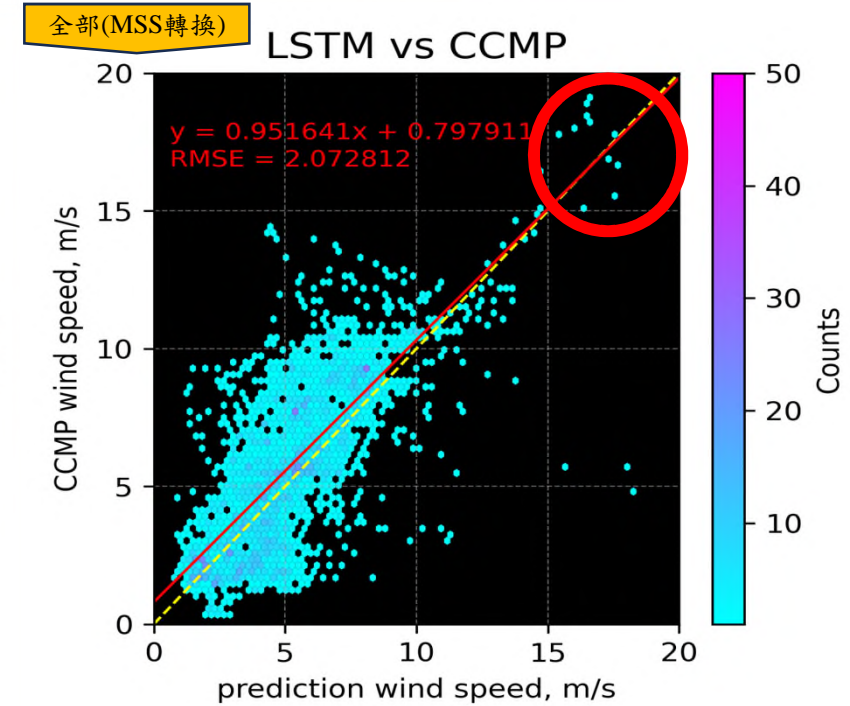
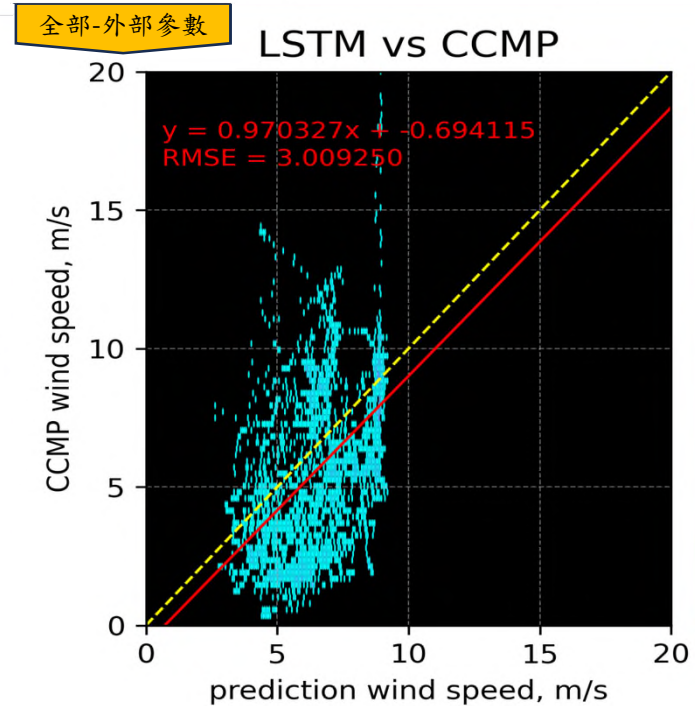
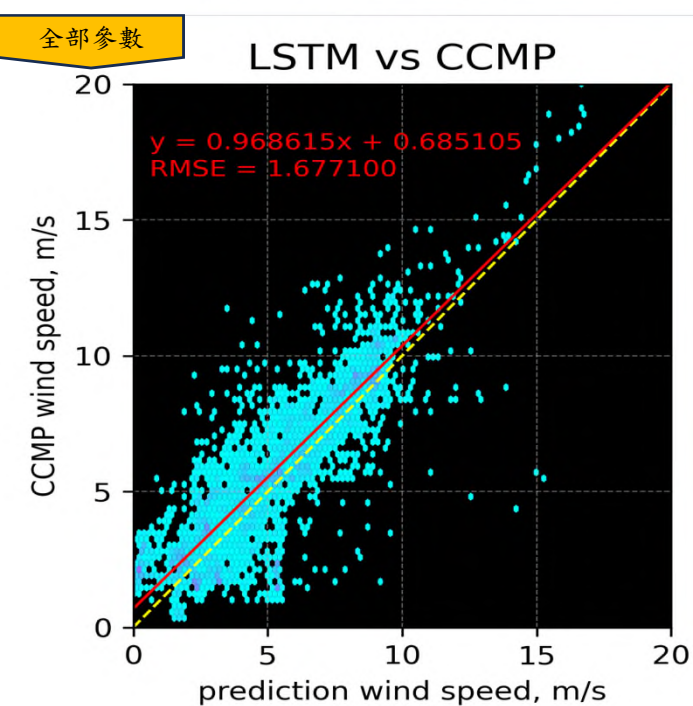
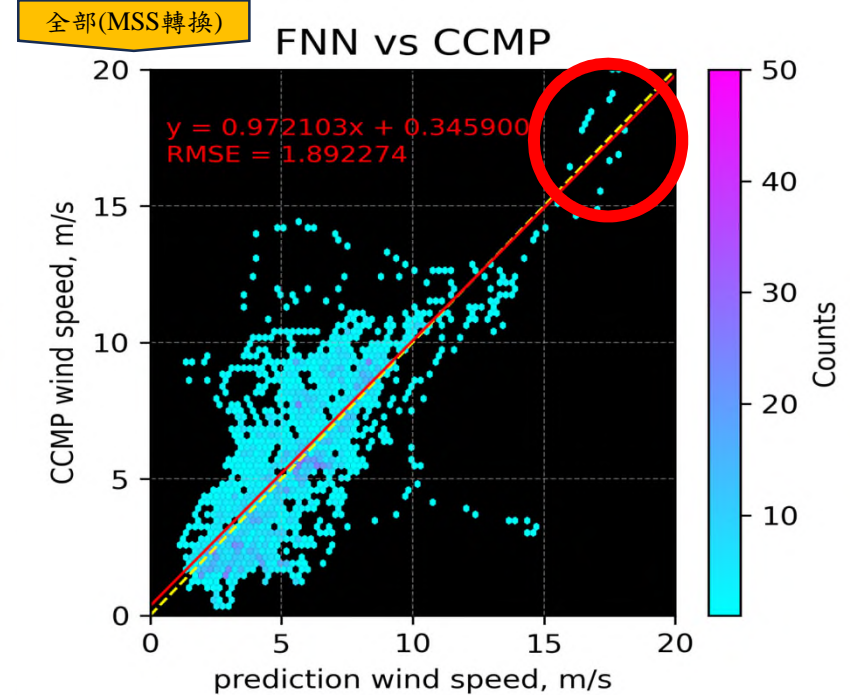
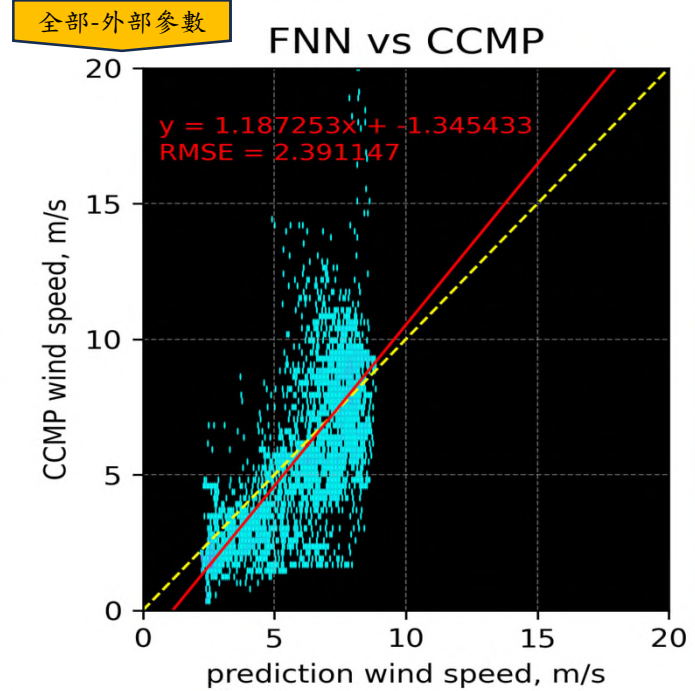
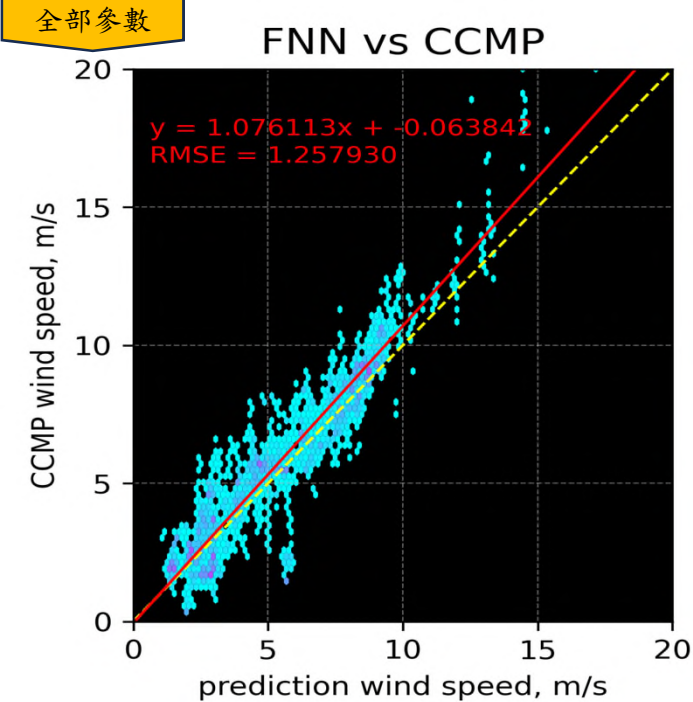
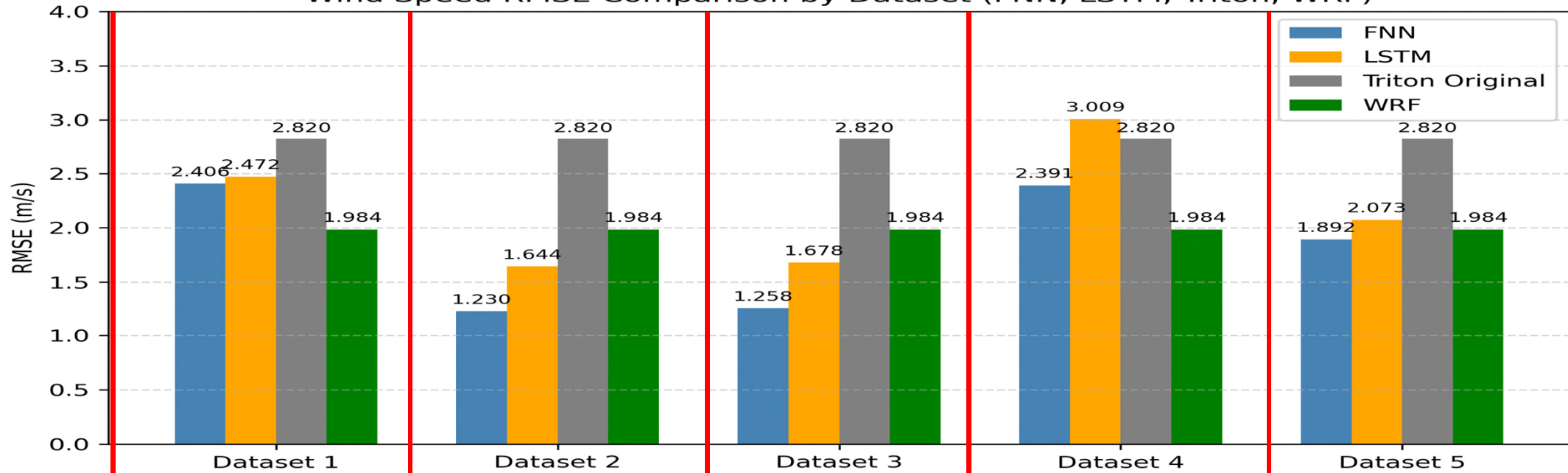
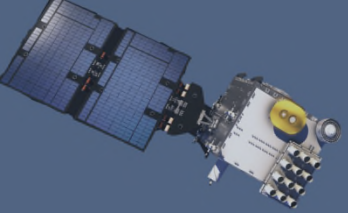


圖7 2024年10月1日至10月5日 各資料集風速反演RMSE直方圖

Wind Speed RMSE Comparison by Dataset (FNN, LSTM, Triton, WRF)

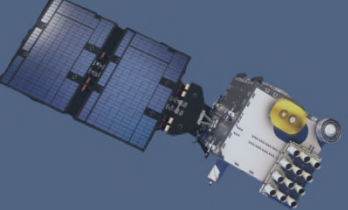


超參數	FNN	LSTM	FNN	LSTM	FNN	LSTM	FNN	LSTM	FNN	LSTM
Layer	256-128-64	32-16	16-8	32-16	16-8	32-16	256-128-64	32-16	256-128-64	32-16
Epoch_used	70	41	34	37	34	74	70	22	55	62
Batch_size	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256
Validation	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Initial learning rate	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0005	0.001
Timestep		24		24		6		24		



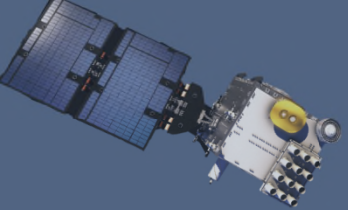
結論

- **MSS 為關鍵特徵，外部參數能顯著提升模型預測能力：**
 - 無論來自 ERA5 或透過 Hwang and Wang (2000) 公式轉換，MSS 的納入明顯降低預測誤差，尤其在高風速區間效果明顯。
 - **Dataset 2** (使用 ERA_MSS 與 SWH) 為所有組合中**表現最佳**，顯示外部物理特徵對風速反演具關鍵性。
 - 即使改用 **WRF 模擬風速轉換之 MSS** (Dataset 5) 進行測試，其表現仍優於 **Dataset 1** (僅 GMF 特徵)，代表轉換方法可作為 **ERA5 資料延遲的替代方案**。
- **資料組合與高風速樣本分佈影響模型效能：**
 - Dataset 1 與 4 **缺乏外部參數時**，預測**風速**易在 **8–10 m/s** 附近出現**上限現象**，無法有效捕捉更高風速變異。
 - Dataset 3 納入所有參數，但整體效果與 Dataset 2 相近，顯示**非物理特徵** (如 signalpol、incang) **貢獻有限**。
 - **高風速樣本數稀少**亦可能導致模型偏向中低風速學習，間接造成中高風速區段誤差放大，未來應加強極端樣本比重。



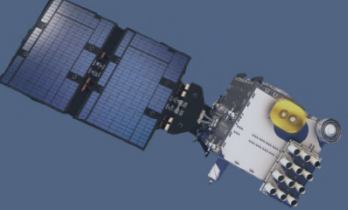
結論

- **FNN 架構更適合 GNSS-R 資料特性，LSTM 效果受限：**
 - 因 **GNSS-R 資料具時間與空間皆不固定、不連續特性**，LSTM 難以有效建構時序依賴關係。
 - **FNN 更適合靜態特徵建模**，能穩定擬合非線性函數，且在**本研究中**所有 Dataset 中均表現優於 LSTM，為最佳結構選擇。



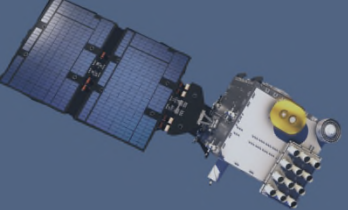
參考資料

- 國家太空中心 . TRITON Algorithm Theoretical Basis Document. https://tacc.cwa.gov.tw/documents/TRITON_ATBD.pdf
- Zhong , Y., Chien, H., Chang, H., & Cheng, H. (2022). Ocean Wind Observation Based on the Mean Square Slope Using a Self-Developed Miniature Wave Buoy. *Sensors*, 22(19). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22197210>
- Asgarimehr, M., Zhelavskaya, I., Foti, G., Reich, S., & Wickert, J. (2020). A GNSS-R Geophysical Model Function: Machine Learning for Wind Speed Retrievals. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(8), 1333–1337. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2948566>
- NASA CYGNSS Science Team. (2023). CYGNSS Algorithm Theoretical Basis Document: Level 2 Wind Speed Retrieval. NASA Earth Science Division.
- Liu, X., Bai, W., Xia, J., Huang, F., Yin, C., Sun, Y., Du, Q., Meng, X., Liu, C., Hu, P., and Tan, G. (2021), “FA-RDN: A Hybrid Neural Network on GNSS-R Sea Surface Wind Speed Retrieval,” *Remote Sensing*, 13(23), 4820. <https://doi.org/10.3390/rs13234820>
- NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC), (2022), *MEaSURES Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) Ocean Surface Wind Vector Analyses*, Retrieved May 18, 2025, from <https://podaac.jpl.nasa.gov/MEaSURES-CCMP?tab=background§ions=about%2Bdata>



參考資料

- 中央氣象署大氣科學資料服務系統 (TACC), (2023), 獵風者衛星資料檔案說明與下載頁面, 取用日期: 2025年5月18日, 取自 https://tacc.cwa.gov.tw/v2/triton_fileformat.html#
- Copernicus Climate Change Service (C3S), (2017), *ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present*, Retrieved May 18, 2025, from <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels>



簡報完畢