

中央氣象署114年三十九屆天氣分析與預報研討會

# 利用福爾摩沙衛星七號軌道衰減 評估太空天氣影響

李奕德、黃成勇、陳怡秀

國家太空中心衛星操控組

[itlee@tasa.org.tw](mailto:itlee@tasa.org.tw)

FEBRUARY 8, 2022

## GEOMAGNETIC STORM AND RECENTLY DEPLOYED STARLINK SATELLITES

On Thursday, February 3 at 1:13 p.m. EST, Falcon 9 **launched** 49 Starlink satellites to low Earth orbit from Launch Complex 39A (LC-39A) at Kennedy Space Center in Florida. Falcon 9's second stage deployed the satellites into their intended orbit, with a perigee of approximately 210 kilometers above Earth, and each satellite achieved controlled flight.

SpaceX deploys its satellites into these lower orbits so that in the very rare case any satellite does not pass initial system checkouts it will quickly be deorbited by atmospheric drag. While the low deployment altitude requires more capable satellites at a considerable cost to us, it's the right thing to do to maintain a sustainable space environment.

Unfortunately, the satellites deployed on Thursday were significantly impacted by a geomagnetic storm on Friday. These storms cause the atmosphere to warm and atmospheric density at our low deployment altitudes to increase. In fact, onboard GPS suggests the escalation speed and severity of the storm caused atmospheric drag to increase up to 50 percent higher than during previous launches. The Starlink team commanded the satellites into a safe-mode where they would fly edge-on (like a sheet of paper) to minimize drag—to effectively "take cover from the storm"—and continued to work closely with the Space Force's 18th Space Control Squadron and LeoLabs to provide updates on the satellites based on ground radars.

Preliminary analysis show the increased drag at the low altitudes prevented the satellites from leaving safe-mode to begin orbit raising maneuvers, and up to 40 of the satellites will reenter or already have reentered the Earth's atmosphere. The deorbiting satellites pose zero collision risk with other satellites and by design demise upon atmospheric reentry—meaning no orbital debris is created and no satellite parts hit the ground. This unique situation demonstrates the great lengths the Starlink team has gone to ensure the system is on the leading edge of on-orbit debris mitigation.

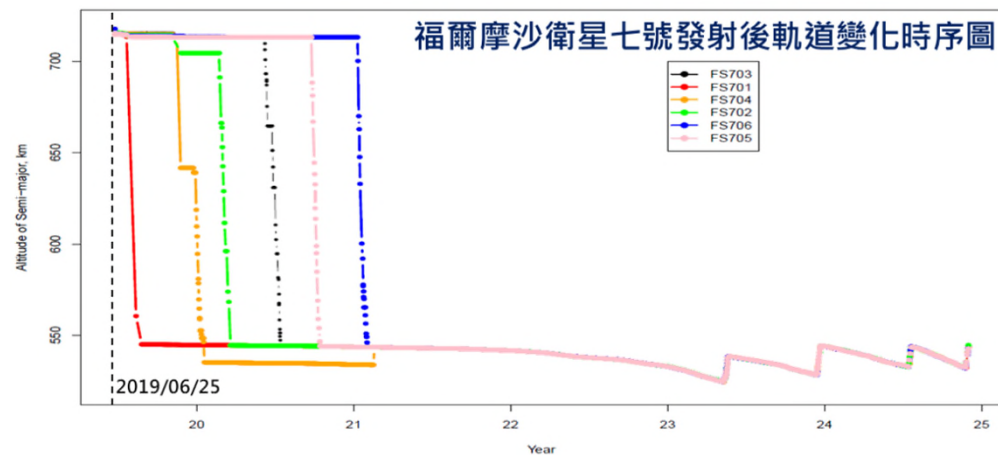
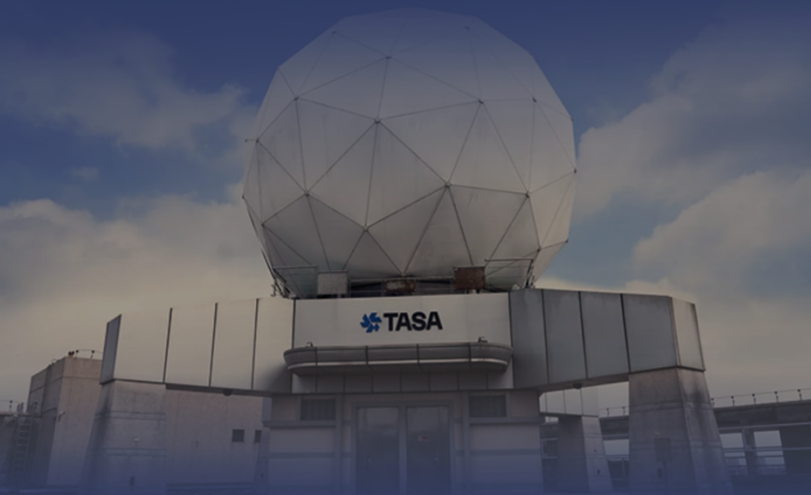
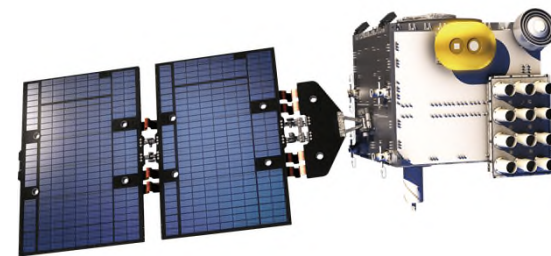
# 因為一場不起眼的微弱磁暴

# 損失星鏈計畫 40顆人造衛星

資料來源：<https://www.spacex.com/updates/>

# 報告大綱

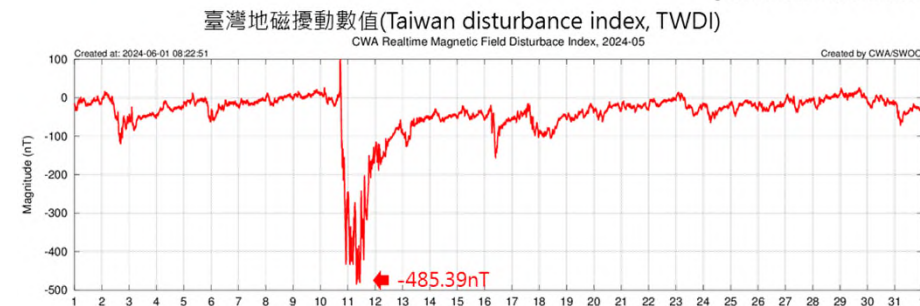
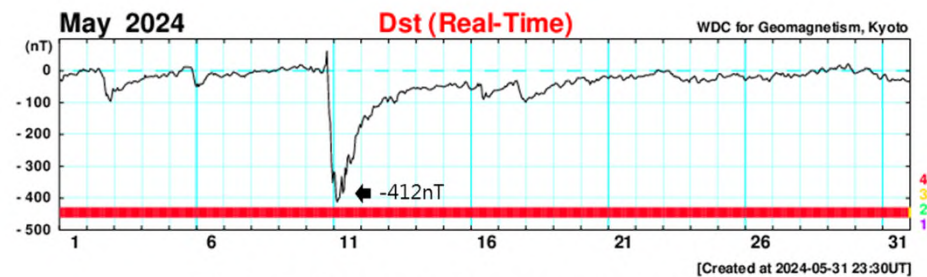
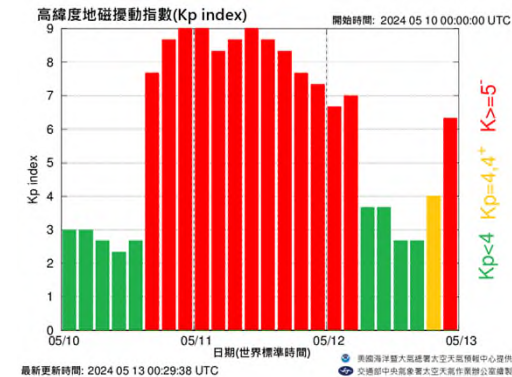
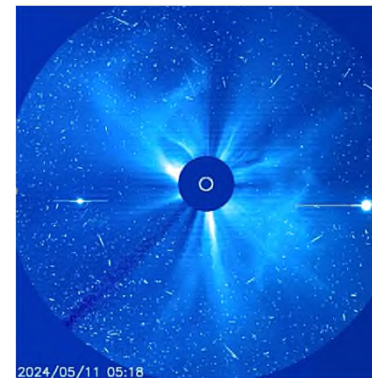
- 軌道參數分析
- 2024母親節磁暴事件
- 單月及全年軌道變化分析
- 中性大氣密度變化
- 磁暴事件前後密度差異
- 結論與討論





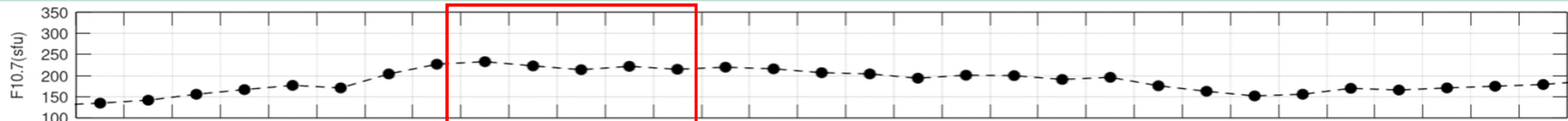
# 2024母親節磁暴(G5磁暴特報)

- 事件類型：地球磁場擾動- 劇烈磁暴
- 發生時間：2024年05月10日23時00分(台灣時間)
- 最大規模：
  - (全球)  $Kp=9$
  - (全球)  $DST=-412$  nT
  - (臺灣)  $TWDI=-485.39$  nT
- 指標等級：G5(NOAA Scale)
- 為2024年第1次達到劇烈磁暴等級，持續39小時。
- 前一次相似事件應為2003年10月28日萬聖節磁暴，持續時間60小時。

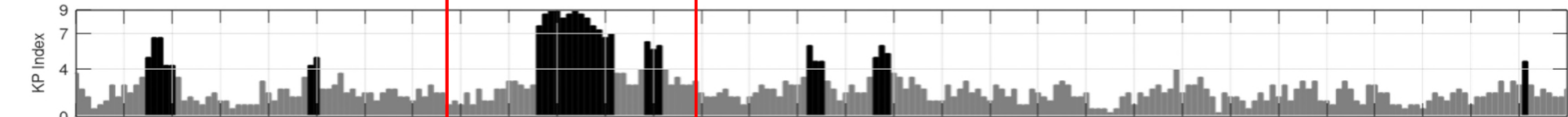


# 2024母親節磁暴期間衛星(FS701)軌道變化

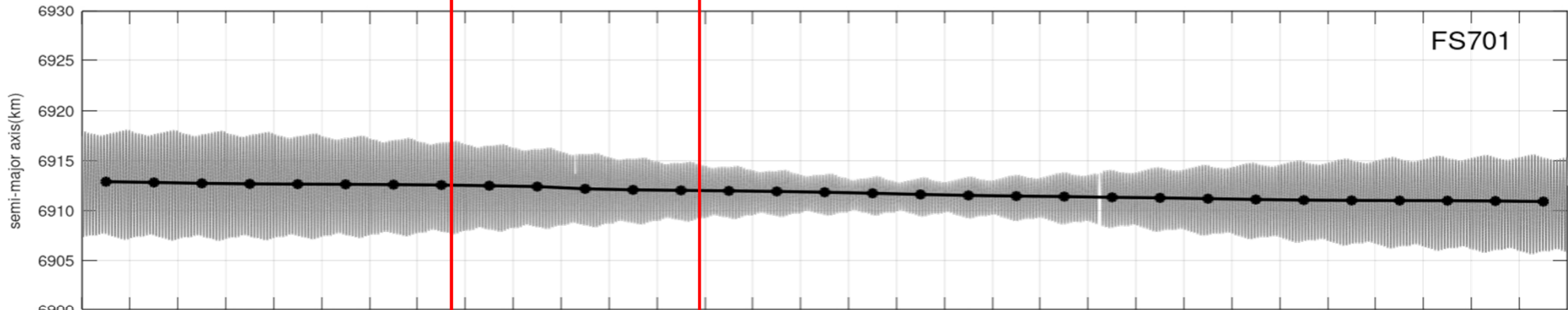
太陽無線電輻射  
2,800 MHz



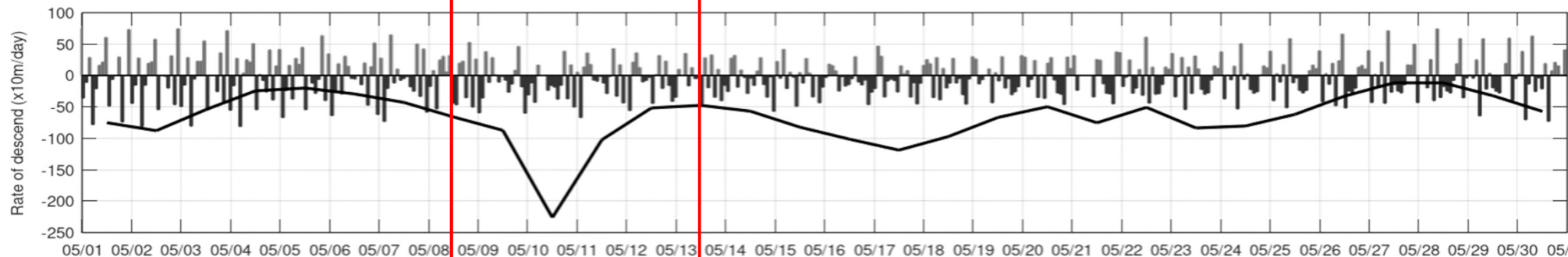
高緯地磁擾動指數  
3-Hr Kp index



半長軸(與地心距離)  
細線為每分鐘資料  
粗點線為每天平均值



半長軸變化值  
直條圖為每軌平均差值  
粗線是日平均的差值



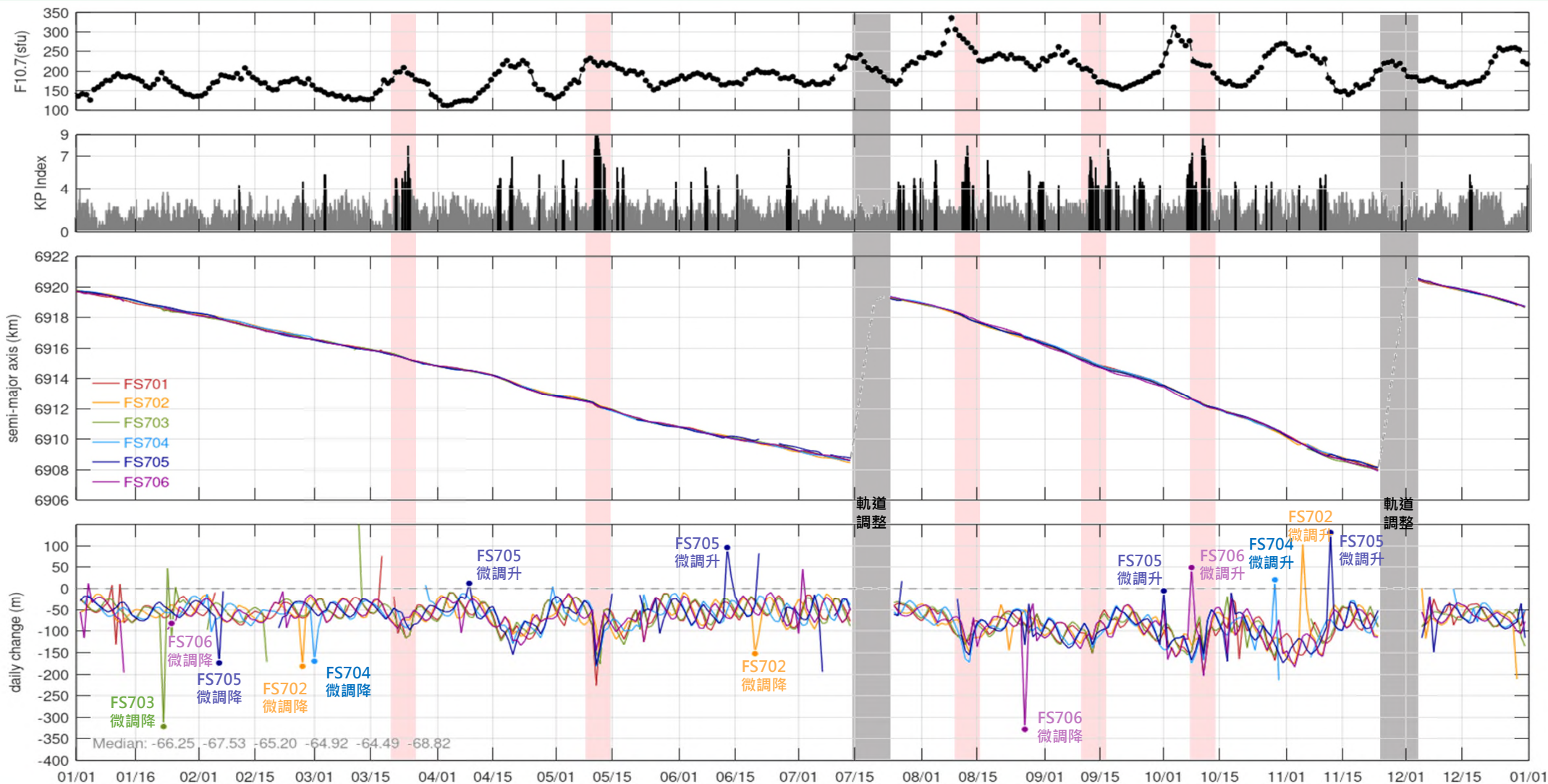
# 2024福七星系軌道變化

太陽無線電輻射  
2,800 MHz

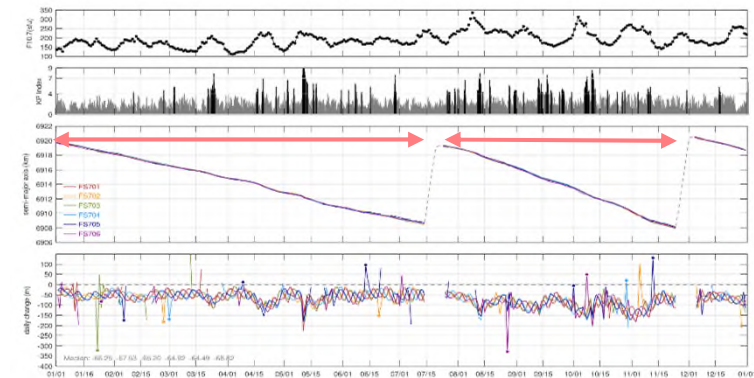
高緯地磁擾動指數  
3-Hr Kp index

半長軸每日平均值  
任務要求需介於520-540公里之間

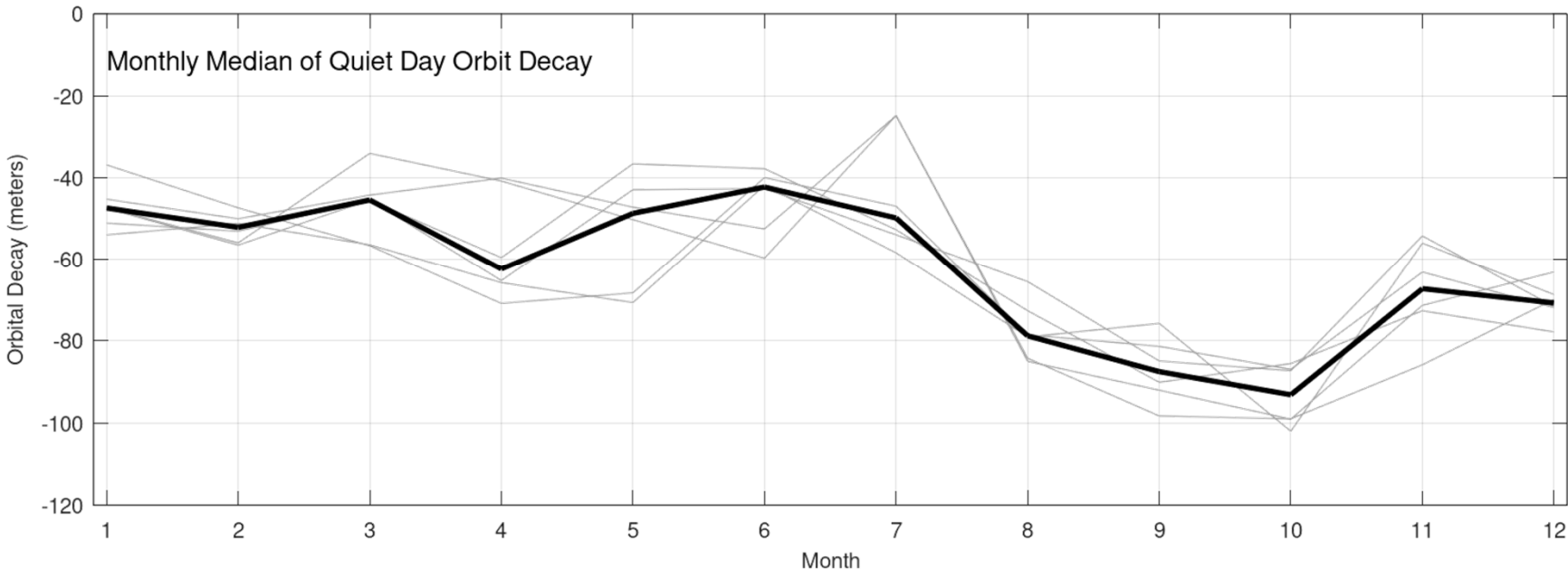
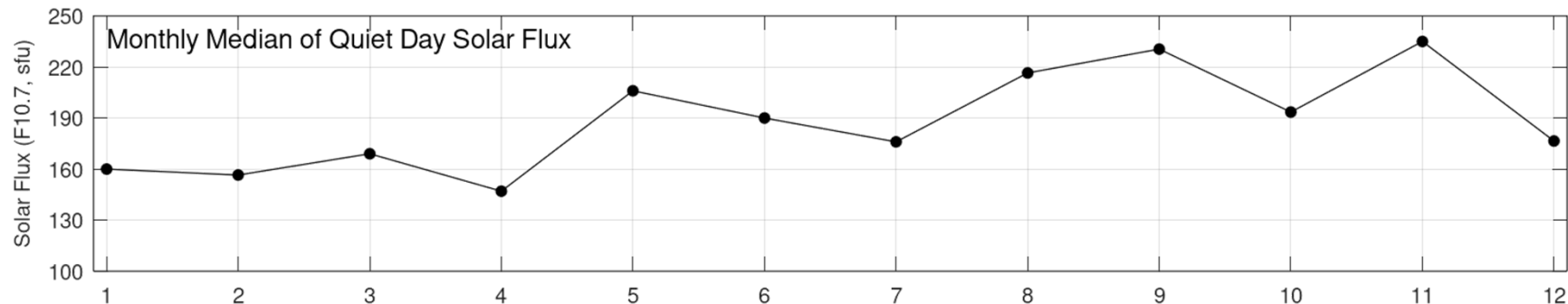
半長軸每日變化值



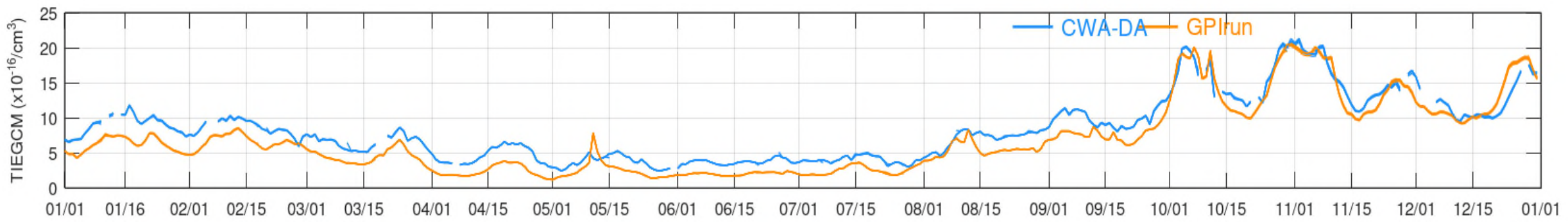
# 2024年逐月分析 vs. 太陽輻射值



- 相同的下降高度(約10公里)，2024年上半年約耗費7個月，下半年僅4個月。
- 根據GFZ統計，僅使用每月地磁擾動最寧靜的前10天(Qday)進行統計
- 自5月後的月均太陽輻射值有明顯增強，每日軌道下降月均值增加約30公尺。



# 中性大氣密度沿衛星軌道日變化

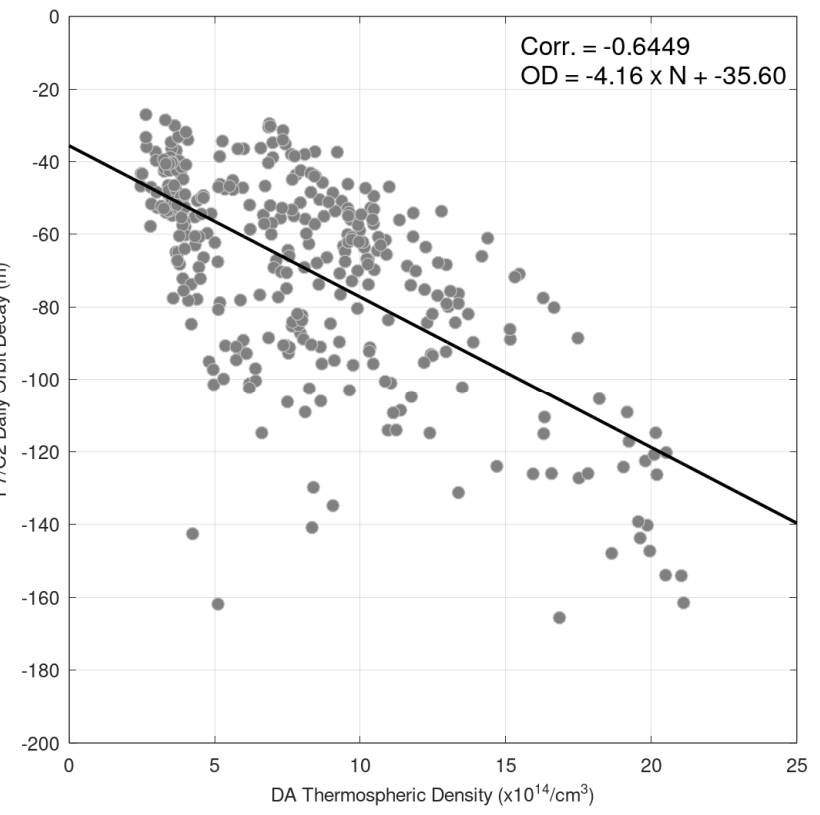
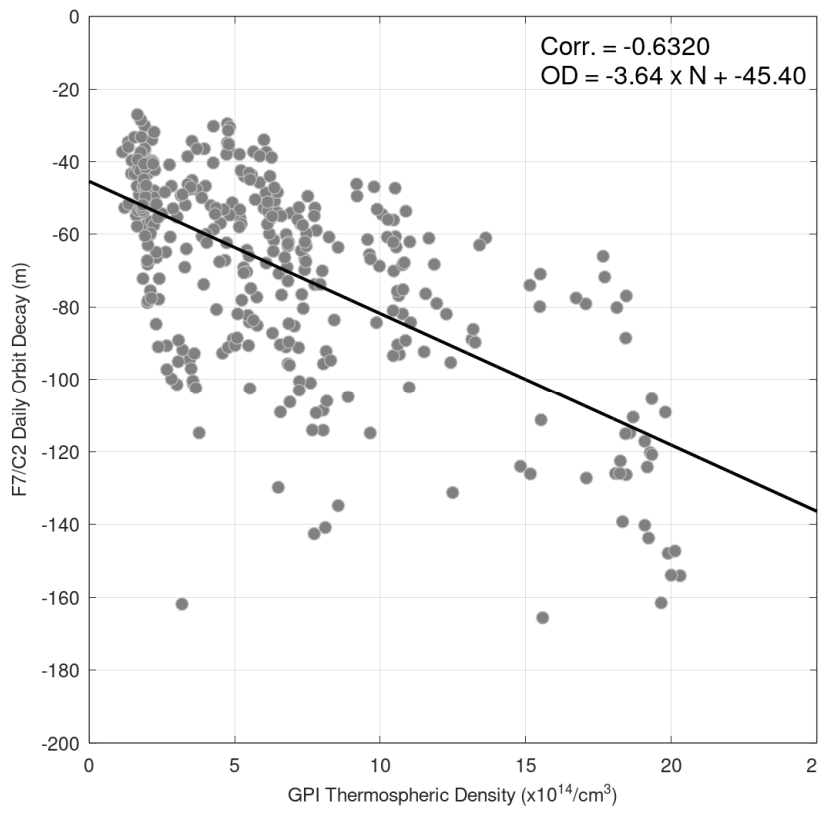
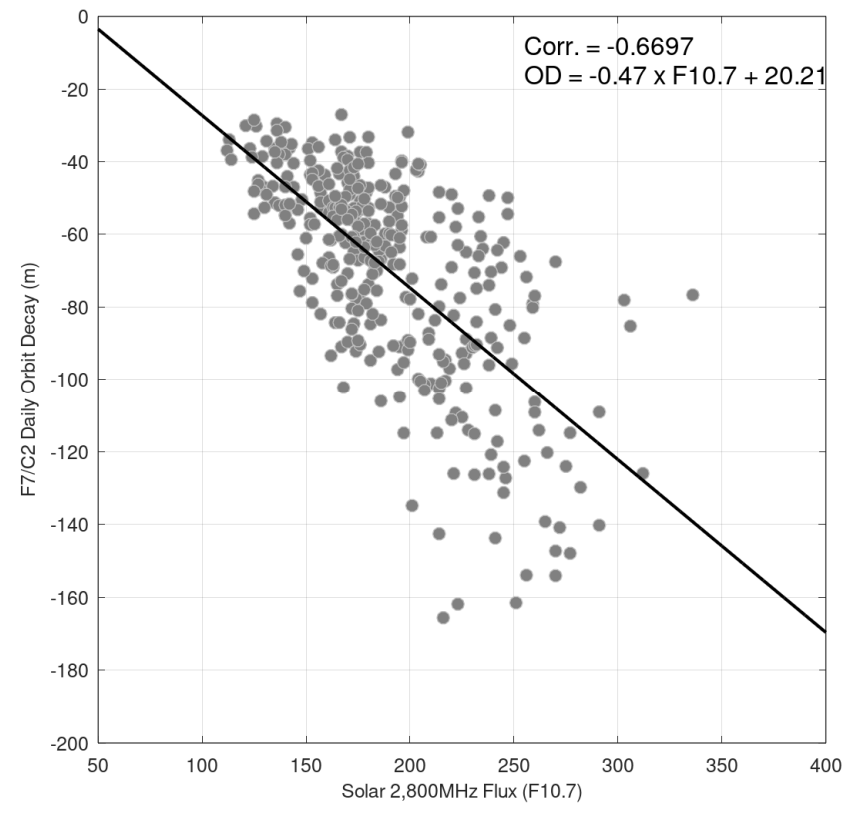


## ■ 利用TIE-GCM v1.95在兩種不同設定所產生的結果

- CWA-DA：SWOO/CWA所運行的電離層資料同化系統，採用SWPC/NOAA預報之太陽輻射(F10.7)和地磁擾動指數(Kp)控制模式，並以預報場第一小時進行分析。
- GPIrun：不同化觀測資料，採用實際觀測之太陽輻射(F10.7)和地磁擾動指數(Kp)控制模式。

- 福七軌道資訊由ECEF坐標轉為地理坐標後分別取出沿軌道密度，並進行每日平均及6顆衛星平均。
- 結果顯示兩者整體趨勢一致，但多數時間同化系統之數值偏低。
- 比較5月和10月之磁暴事件，由於預報的地理指數可能低估，而造成同化系統之中性大氣密度偏低。

# 軌道下降率與地球物理參數



# 利用軌道變化率推算中性大氣密度

■ 每軌的半長軸變化：
$$\Delta a_{rev} = \frac{-2\pi C_D A \rho a^2}{m}$$

■ 需要計算日平均變化量，才能忽略其他的影響量。

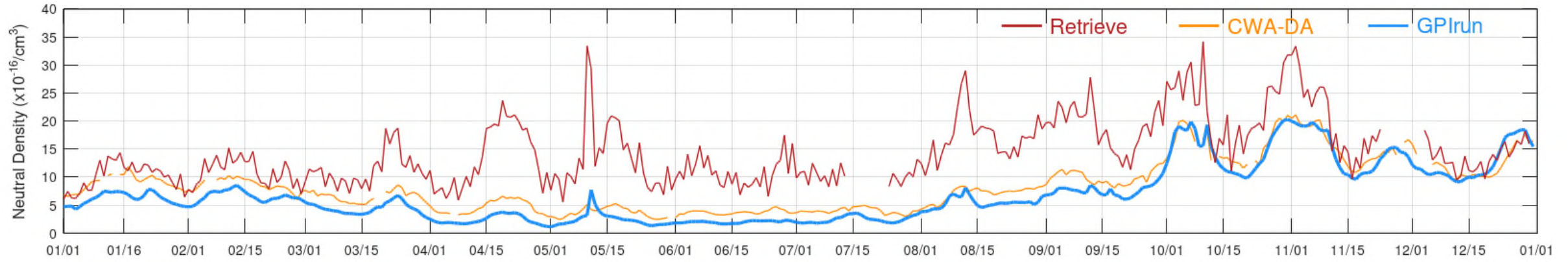
- 軌道的變化量為每日的累積，以福衛七號而言每日約有15.097軌(自TLE數值長期統計)

- 計算公式修正為：
$$\Delta a_{daily} = \frac{-2\pi C_D A \rho a^2}{m} \times Rev$$

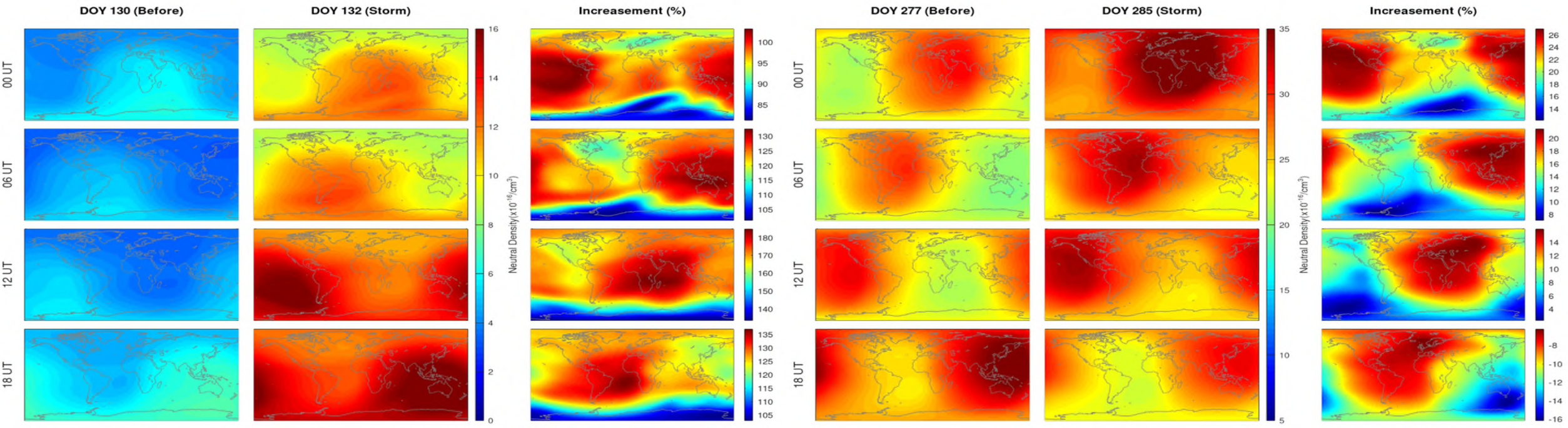
- 推估衛星平均質量：249公斤

- 推估衛星截面積：2.5平方公尺

- 推估遲滯係數：1.06 (自TLE數值長期統計)



# 數值模擬磁暴期間中性大氣密度變化



- 2024/05磁暴持續時間較久，中性密度增強可達70~200%，以中、低緯度日間較為顯著。
- 2024/10磁暴持續時間較短，中性密度增強僅為 5~ 30%，以中、低緯度日間較為顯著。
- 從分析結果推測，福衛七號為低傾角星系，因此受到中性密度增強產生的大氣遲滯力影響時間較長而能從軌道下降率中看到相對關係。

# 磁暴事件前後中性密度差異

- 分析磁暴日與三日前寧靜參考日之密度變化，模式中中性大氣密度增加率與事件強度有關。但同化系統產品的增加幅度也較地球物理參數實驗為低。
- 從衛星軌道變化率所反演的大氣密度變化來看，無法與事件的強度完全相符，增加的幅度也可能高於或低於模式結果。
- 三者的結果皆顯示2024年5月份的磁暴事件相當劇烈，中性大氣密度增加率顯著高於其他事件，透過軌道反演的增加率更高達380%。

	03/24 (084) Kp=8 <sup>+</sup>	05/11 (132) Kp=9	08/12 (225) Kp=8	10/11 (284) Kp=9 <sup>-</sup>
CWA-DA	115.62 %	156.48 %	108.96 %	132.83 %
GPIrun	123.50 %	293.55 %	115.10 %	140.99 %
Retrieved	100.42 %	379.72 %	165.25 %	111.97 %

# 結論與討論

- 相較過去幾年劇烈的太陽活動和磁暴事件，衛星軌道下降率有著顯著的變化，並進而增加衛星軌道調升的次數。
- 2024年5月所發生的劇烈磁暴事件，並未直接對於衛星本體功能有造成顯著影響，但衛星軌道下降率確有明顯增加，造成預測之軌道資訊(TLE)和實際狀態略有偏差。
- 衛星軌道會除受大氣遲滯力影響外，也會受到其他外力作用，福七任務之6顆衛星每日軌道變化率互見升降，但在幾次顯著磁暴事件發生時皆同時顯著增加下降率。
- 2024年上半年軌道日均下降率為每日54公尺，但自8月份後因太陽輻射顯著增強，日均下降率增加至每日90公尺，導致軌道調整間距由7個月縮短為4個月。
- 透過數值模式模擬結果，顯示在磁暴事件發生時中性大氣密度會有明顯的增加，增幅範圍與事件強度和發生持續時間有關，增加率自110%至300%不等。
- 利用衛星軌道下降率反演中性大氣密度，變化趨勢與數值模式一致，且於磁暴事件期間有更為顯著的密度變化情形。但受限於質量、截面積與遲滯係數不定的條件，反演數值和實際狀態可能具有較大的偏差，但仍有看出2024母親節磁暴期間之變化大於該年度其他磁暴事件。

感謝聆聽  
歡迎發問



# Backup Slides

# C<sub>D</sub> estimation according to B\*

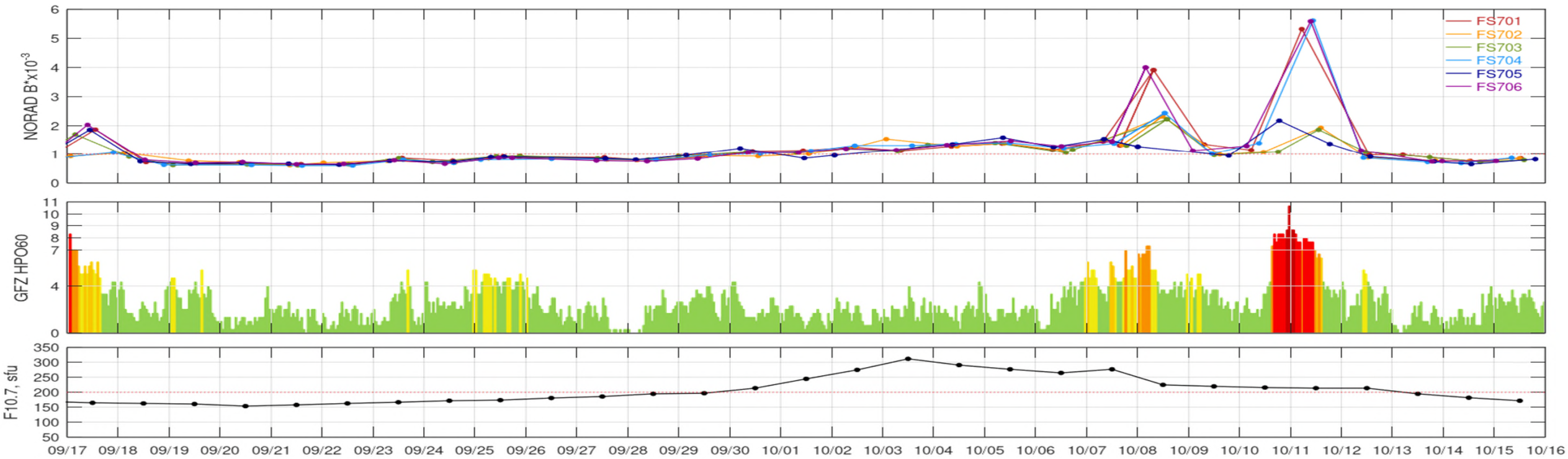
- A special "drag" term associated with the Norad SGP4/SDP4 propagators. It measured in units of 1/earth radii and is related to the Spacecraft's Cd.
- It is obtained by having FreeFlyer import the NORAD Two-Line Element (TLE) state vector.

- B\* is calculated as follows : 
$$B^* = \frac{\rho_0 \times C_D \times A \times R_E}{2m}$$

- ρ0 ≡ Norad Atmospheric Density, 2.461e-5 kg/m2/RE
- CD ≡ Coefficient of drag
- A ≡ Spacecraft drag area in m2
- RE ≡ Norad Earth Equatorial Radius, 6378.136 km
- m ≡ Spacecraft mass in kg

- TLE: AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA  
 1 NNNNU NNNNAAA NNNNN.NNNNNNNN +.NNNNNNNN +NNNNN-N +NNNNN-N N NNNNN  
 1 23455U 94089A 97320.90946019 .00000140 00000-0 10191-3 0 2621  
 2 NNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NNNNNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NN.NNNNNNNNNNNNNNN  
 2 23455 99.0090 272.6745 0008546 223.1686 136.8816 14.11711747148495

# 磁暴前後B\*的變化



- 從09/17至10/16 NORAD TLE中的BSTAR(B\*)值變化可以清楚看到會與太陽輻射(F10.7)和地磁擾動(HPO)有關，且磁暴的影響相當顯著。太陽輻射F10.7大致可以200sfu為基準，B\*的變化略有線性的關聯。因此即便F10.7有上升到300以上，但B\*的變化沒有太大，數值從0.0010稍微上升至0.0015。
- 09/17和10/07兩波磁暴，可以看到比較早更新的FS701和FS706變化較大，晚更新的FS702、FS703、FS704較小。到了10/10的磁暴事件更可看到在磁暴期間有更更新的FS701、FS704、FS706有劇烈的變化、但是比較晚更新的FS702、FS703幅度較小。從變化來看，NORAD更新的時間如果在磁暴前，則在磁暴發生後偏差會有明顯的差異，需要在磁暴期間再次更新。而且磁暴結束後也需要更新才能滿足後續回穩的狀態。
- 10/13-15太空狀態變化回穩，各衛星的日變化相近，衛星和衛星之間的數值也很接近，因此在此狀態下每日更新NORAD下才比較不會造成明顯偏差。