

福衛八號植被紅邊波段時間延遲積分設計 對葉綠素反演品質之影響評估

張立雨^{1*} 劉小菁² 廖敦佑³

摘要

福衛八號衛星感測器預計除可見光與近紅外光波段外，在植被紅邊波段規劃兩米空間解析度之兩窄波長波段，預期除可提供豐富光譜資訊外並可進行植被葉綠素含量之推估。然而紅邊波段波長有限，該設計可能造生影像雜訊過大之結果，因此在福衛八號感測器上採用時間延遲積分技術以提升影像之訊噪比。為分析適當之時間延遲積分階數以達到合理之訊噪比，並能在後續葉綠素反演時得到合理之精度，本研究透過植被光譜反應模型模擬不同葉綠素含量之植被光譜，然後在不同時間延遲積分階數下推估受雜訊影響之葉綠素含量精度以作為後續感測器設計之參考。

關鍵詞：福衛八號、植被紅邊波段、葉綠素含量、訊噪比、時間延遲積分

1. 緒論

葉綠素為存在於植物細胞中進行光合作用所需之光合色素，其含量多寡可作為植物生長指標 (圖 1) 或不同植物之分類 (圖 2)，因此精確掌握植物之葉綠素含量，對精準農業發展有極大助益 (李汪盛, 2013)。傳統葉綠素含量檢測法係由採集植物葉片，並以化學分析方式取得，雖可精確量測葉綠素含量，但無法滿足短時間內大量檢測需求。

自衛星遙測發展以來，其快速且大面積覆蓋之觀測能力，已廣泛應用於農林相關領域中，其原理為透過不同物種於電磁光譜特性之差異進行分析。植物於電磁光譜中植被紅邊 (Vegetation Red Edge, VRE) 波段，即 680 nm 至 730 nm 間反射率變化急遽，為葉綠素於可見光波段吸收較強；而近紅外波段則受其細胞結構而有較高之反射率所造成，因此可藉由該波段之反射率發展出植被分類、生長狀態監控等應用。近期較新之光學衛星如 Sentinel-2、RapidEye 與 WorldView 等，

皆將植被紅邊列入其觀測波段。

福爾摩沙衛星八號 (福衛八號) 為我國國家第三期長程太空計畫中第一組星系，將延續福衛二號及五號之光學遙測任務，除空間解析度較先前提升一倍外，亦規劃新增植被紅邊波段，以增進相關植被應用之可能。目前福衛八號將參考 Sentinel-2 之設計 (圖 3) 新增之兩植被紅邊波段，分別為 VER1 波段 (波長範圍 0.693 μm ~0.715 μm) 以及 VER2 波段 (波長範圍 0.729 μm ~0.751 μm)。配合延續過去福衛系列衛星之紅光波段 (波長範圍 0.630 μm ~0.690 μm) 以及近紅外光波段 (波長範圍 0.770 μm ~0.890 μm) 之設計，將可藉反向高斯反射模型 (Inverted-Gaussian Reflectance Model, IGRM)，以反向高斯曲線擬合出該植被之連續反射率，並由該曲線之反曲點反演對應植被之葉綠素含量 (Segl *et al.*, 2012)。如此再配合福衛八號之兩米空間解析度設計，預期將可擴展後續在農業與林業上之相關分析應用。然而該極窄紅邊波段頻寬之設計亦可能產生感測器感測能

¹ 國家太空中心衛星影像組 副研究員

² 國家太空中心衛星影像組 組長

³ 國家太空中心衛星影像組 專任助理

* 通訊作者, 電話: 03-5784208 轉 7516, E-mail: 1902003@narlabs.org.tw

收到日期: 民國 109 年 07 月 09 日

修改日期: 民國 109 年 07 月 30 日

接受日期: 民國 109 年 08 月 28 日

量不足，進而造成影像訊噪比過低 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 之情況。光學感測器於規格設計時，訊噪比為關鍵指標之一，唯有足夠訊噪比，方能提供滿足觀測需求品質之影像。因此福衛八號感測器部分引進時間延遲積分 (Time Delay Integration, TDI) 技術，利用對同一地物進行多次取像觀測並將結果疊加以提升訊噪比。然而較高的 TDI 取樣次數或疊加階數雖可在資訊疊加後藉由雜訊的抵銷以得到較佳之訊噪比，但隨著 TDI 階數的增加，相對於衛星本體運動穩定度之要求以及感測器取樣時間精度之規格亦隨之增高，因此合理之 TDI 階數建議對於後續相關系統之設計非常重要。

因此本研究首先配合植被光譜模型 PROSAIL (Jacquemoud *et al.*, 2009) 進行不同葉綠素含量之植被連續反射率模擬，並搭配福衛八號感測器之紅光、近紅外光以及植被紅邊波段特性進行不同 TDI 階數下之訊噪比估算，以模擬觀測到含雜訊之各波段植被顯反射率 (Apparent Reflectance)。之後再透過植被葉綠素含量反演模型 IGRM 得出受雜訊影響之葉綠素含量，藉以評估福衛八號感測器在不同 TDI 階數下其訊噪比對於葉綠素含量反演之影響，並同時評估於不同條件植被於葉綠素含量反演時之所得品質，最後再根據評估之結果作為福衛八號衛星感測器植被紅邊波段 TDI 配置時之參考建議。

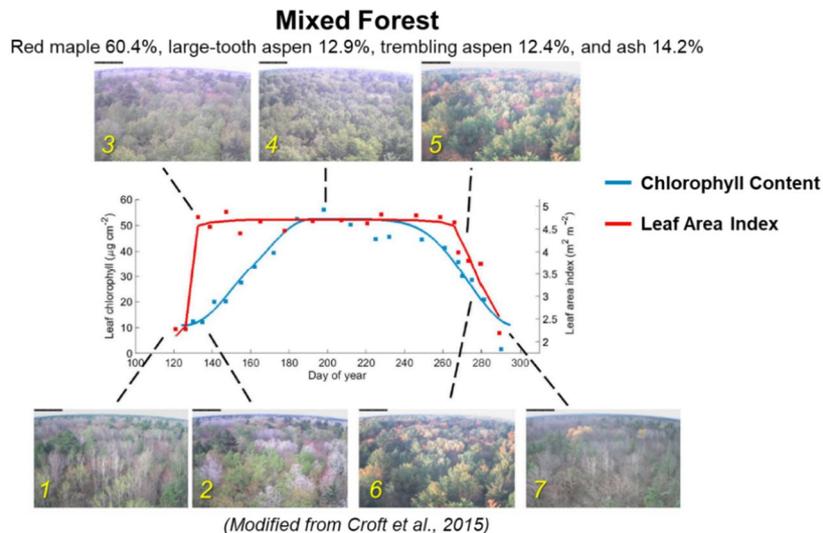


圖 1 不同葉綠素含量與葉面積指數下對應之混和林相

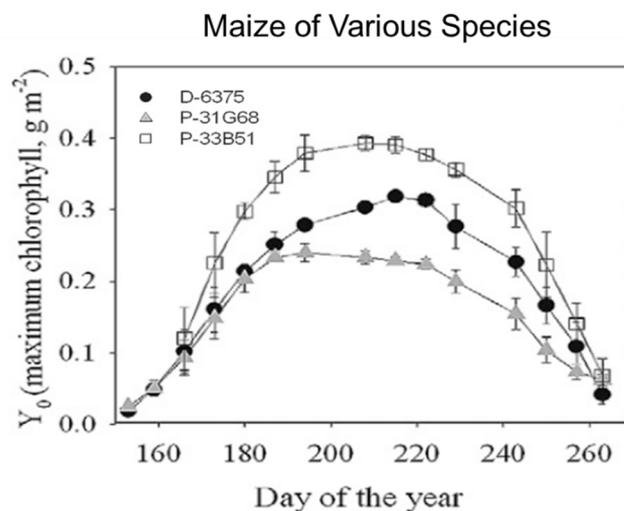
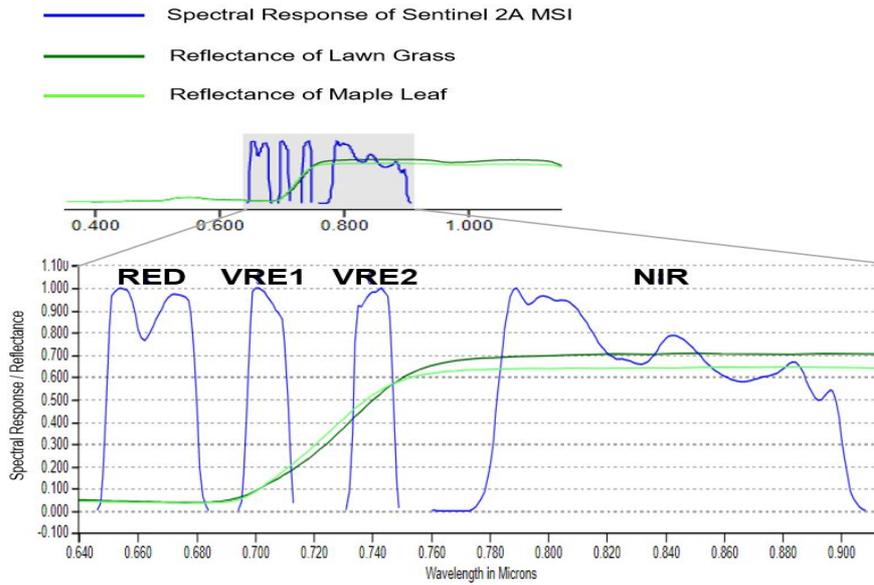


圖 2 不同品種之玉米於一年中葉綠素含量變化



(Modified from USGS, 2020)

圖 3 Sentinel-2A 衛星之紅光、近紅外光與紅邊波段感測器之光譜反應曲線 (藍色曲線)，其中並顯示草皮 (深綠曲線) 及楓葉 (淺綠曲線) 之反射率隨不同波長之變化

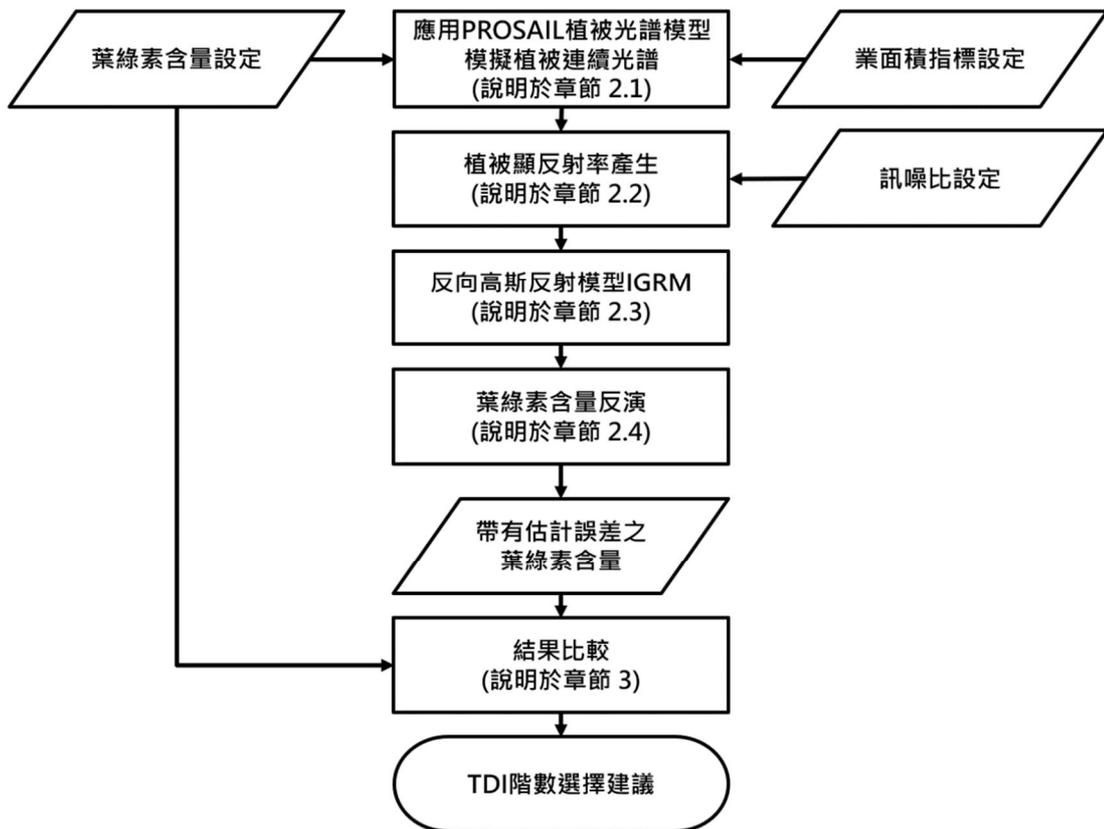


圖 4 研究流程

2. 研究方法

本研究方法為利用以植被光譜模型 PROSAIL 模擬得植被連續光譜，並配合福衛八號之感測器參數加入模擬雜訊以模擬感測器所觀

測到之含雜訊之反射率，然後將該反射率應用於 IGRM 模式，取得反曲點後，再求取對應之葉綠素含量並比較與真值之差異程度進行評估，其研究流程如圖 4 所示。

2.1 應用 PROSAIL 植被光譜模型模擬植被連續光譜

植被光譜模型 PROSAIL 由 PROSPECT 樹葉光學特性模式及 SAIL 樹冠雙向反射模式結合而成 (Jacquemoud *et al.*, 2009)，藉由給定植被之生物化學參數如葉綠素含量 (Chlorophyll Content) 與葉面積指數 (Leaf Area Index, LAI) 等，即可模擬產生該類型植被連續光譜。透過 PROSAIL 模式，可發現不同類型之植被於可見光與近紅外波段之反射率有顯著之差異 (圖 5)。

2.2 植被顯反射率產生

由 PROSAIL 模擬特定植被光譜後，搭配感測器觀測頻寬，則可得到各波段下之反射率。理論上衛星在軌所觀測之顯反射率受大氣組成影響，但於乾淨大氣下，顯反射率與實際反射率相近，故本研究假設於乾淨大氣條件下進行。理論上顯反射率可由原輸入反射率加上雜訊來求得，而雜訊之大小則可由估計所得之訊噪比乘上原輸入反射率而來，因此以下說明訊噪比之計算方式以及含雜訊之植被顯反射率產生之過程。

2.2.1 訊噪比估計

透過太陽輻照度與日地幾何關係，則可求得該顯反射率下對應平均光譜輻射率 (Mean Spectral Radiance) (Teillet *et al.*, 2001)，如式 (1)。

$$L_e = \rho * \frac{ESUN * \cos\theta_s}{\pi * d^2} \dots\dots\dots (1)$$

其中 ρ 為已知地物之反射率；ESUN 為大氣外太陽光譜輻照度 (Solar Exoatmospheric Spectral Irradiances)； θ_s 為太陽天頂角； d 為太陽與地球距離，以天文單位表示。求得平均光譜輻射率後，則可計算經光機系統後，焦平面組合 (Focal Plane Assembly, FPA) 所暴露之平均光譜輻照度 (Mean Spectral Irradiance)，如式 (2) (Tsai, 2009)。

$$I = \frac{\pi}{4} * \frac{L_e}{F^2(1+M_{OPTICS})^2} * T_{OPTICS} * \Delta\lambda \dots\dots\dots (2)$$

其中 F 為光學系統之光圈數 (F-number)； M_{OPTICS} 為光學系統之橫向放大率； T_{OPTICS} 為光學系統穿透率； $\Delta\lambda$ 波段頻寬。

透過焦平面組合所暴露之平均光譜輻照度，可進一步估算感測器受光後所產生之光電流密度如式 (3)。

$$J_{Photo} = I * S \dots\dots\dots (3)$$

其中 S 為感測器之光譜響應。當光電流密度已知，將可進一步推估由感測器受光後產生之訊號及對應之雜訊，推算對應訊噪比如式 (4) (Pierre& Arias, 2016)。

$$SNR(\rho) = \frac{Signal}{Noise} = \frac{J_{Photo} * A * T_{int} * N_{TDI}}{\sqrt{N_{RO}^2 + (J_{Photo} + J_{Dark}) * A * T_{int} * N_{TDI}}} \dots\dots (4)$$

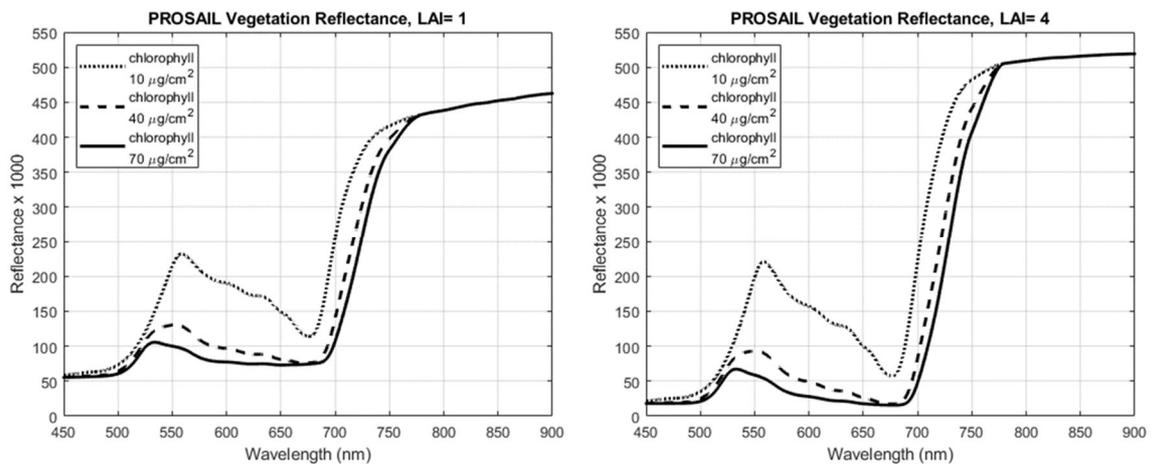


圖 5 由 PROSAIL 模式所模擬出不同葉綠素含量與葉面積指數之植物反射率隨不同波長之變化

其中 A 為感測器感光面積； T_{int} 為感測器曝光積分時間； N_{TDI} 為感測器時間延遲積分階數； N_{RO} 為感測器之固定讀出雜訊； J_{Dark} 為無入射光時之電流密度。

2.2.2 含雜訊之植被顯反射率產生

以任何電子設備進行量測無可避免地將混入一定程度之雜訊，而將雜訊模型化可精確評估雜訊對於訊號影響程度。此外，由感測器進行量測所得為數位訊號，須經輻射校正與轉換後方能取得對應顯反射率，而本文感測器仍於規劃階段，因此訊號與雜訊以顯反射率代替。本研究中假定感測器雜訊為一均值为 0，標準差為輸入訊號除以訊噪比之常態分布，如圖 6 及式 (5)：

$$Noise \sim N(0, \rho_g / SNR(\rho_g)) \dots\dots\dots (5)$$

其中 ρ_g 為地表物之反射率， N 為常態分佈函數。

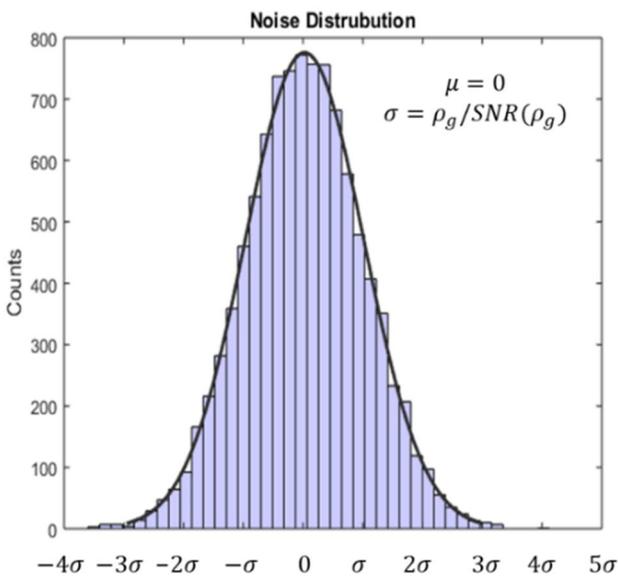


圖 6 本研究中所假定之雜訊分布

因此感測器所觀測之植被顯反射率 ρ_a 為輸入原反射率加上雜訊，如式 (6) 所示。

$$\rho_a = \rho_g + Noise \approx N(\rho_g, \rho_g / SNR(\rho_g)) \dots\dots\dots (6)$$

2.3 反向高斯反射模型 IGRM

反向高斯反射模型主要以反向高斯曲線擬合出該植被之反射率連續光譜，並由該曲線之反曲點反演對應植被之葉綠素含量 (Segl *et al.*, 2012)，如式 (7) 所示。

$$\rho(\lambda) = \rho_{max} - (\rho_{max} - \rho_{min}) * e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{min})^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots (7)$$

其中 $\rho(\lambda)$ 為擬合出之植被連續反射率曲線； ρ_{max} 為曲線最大值； ρ_{min} 為曲線最小值階數； λ_{min} 為反射率曲線適用波長範圍最小值，通常為紅光波段波長； σ 為標準差。因此計算過程中至少需要四個不同波長位置之反射率以得出 $\rho(\lambda)$ 並計算該曲線所對應之反曲點波長。圖 7 為利用 PROSAIL 植被光譜模型產生植被反射率連續光譜 (綠色曲線)，配合福衛八號衛星感測器設計所對應波長範圍取出紅光、兩植被紅邊波段以及近紅外波段之反射率 (紅圈位置) 後，套入 IGRM 後所產生之模型曲線 (黑色虛線)，此時即可求出對應之反曲點位置 (紅色星點位置)。此外在 IGRM 計算過程中為避免擬合過程產生不合理之結果，必須加入 $\rho_{max} - \rho_{min}$ 之值須等於近紅外光波段反射率對紅光波段反射率之差值為擬合過程中之限制條件。

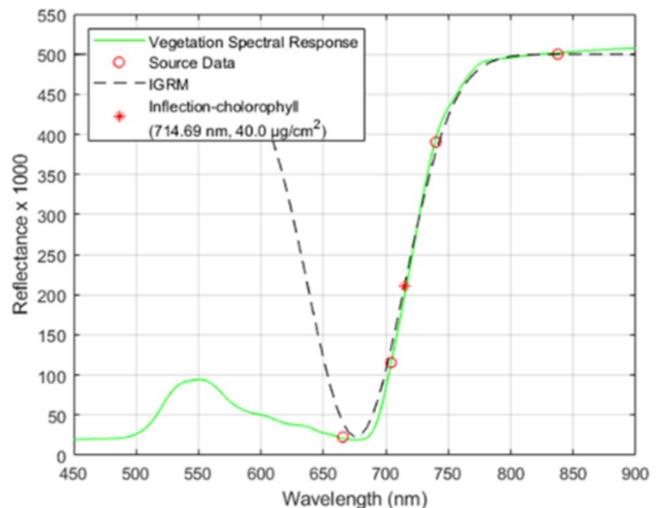


圖 7 以紅光、兩植被紅邊及近紅外波段資訊套入 IGRM 所產生之連續光譜 (綠色曲線)

2.4 葉綠素含量反演

針對 PROSAIL 植被光譜模型配合不同之葉綠素含量與葉面積指數直接產生之植被反射率連續光譜，可使用 IGRM 計算出所對應之反曲點位置波長，之後即可將葉綠素含量對 IGRM 反曲點波長變化之關係以多項式進行擬合。在本研究經測試發現使用 4 次多項式可有最為合理之結果，並得出如圖 8 之多項式關係曲線。後續即可以利用此多項式關係曲線，針對含雜訊之植被顯反射率以 IGRM 所得之反曲點波長反演出對應帶有相對估計誤差之葉綠素含量。

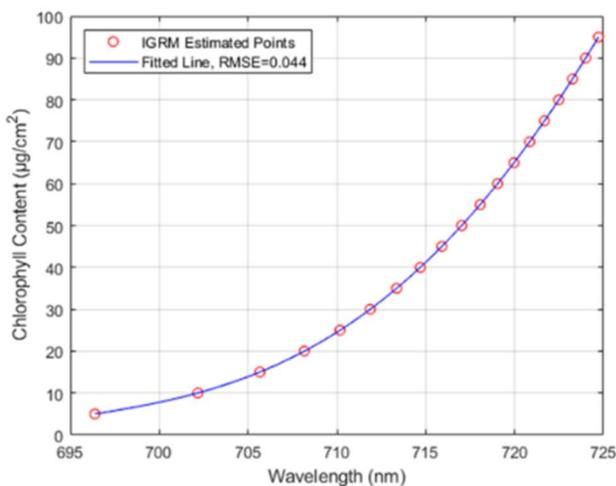


圖 8 以葉綠素含量對 IGRM 反曲點波長變化之關係進多項式行擬合所得之關係曲線

3. 研究結果

3.1 感測器最佳配置

根據國家太空中心福衛八號可見光與近紅外光波段之規格設計 (國家太空中心, 2020)，於在軌的平均光強度下 (劉小菁等, 2014)，可見光與近紅外光波段之訊噪比均為 90 或以上，而當植被紅邊波段於時間延遲積分階數為 16 時，其訊噪比仍僅約為可見光與近紅外光波段之一半；待植被紅邊波段之時間延遲積分階數提升為 32 或更大後，其訊噪比才與可見光或近紅外光波段相當 (圖 9)。

本研究考量兩種情況，一為所有觀測波段採用相同 TDI 階數 (圖 10(a))；另一則由於紅與近

紅外波段其波長設定較寬，在 8 階 TDI 時其訊噪比已可達所需之設計標準，因此將紅與近紅外波段均固定於 8 階 TDI 之情形 (圖 10(b))。此時在圖 10(a) 與圖 10(b) 中均可看出葉綠素含量均方根誤差皆隨 TDI 階數增加而降低。但以兩米空間解析度之設定來觀察時 (藍色曲線部分)，其中當 TDI 階數大於 16 階後，其葉綠素含量均方根誤差下降速度開始趨緩，而於 32 階後再提升 TDI 階數其改善則相當有限，故建議植被紅邊波段以 32 階 TDI 為建議之感測器配置。

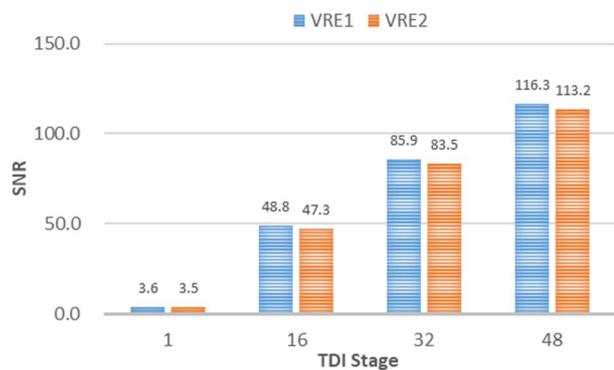
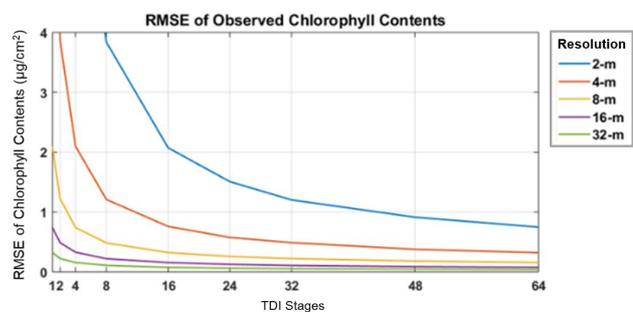
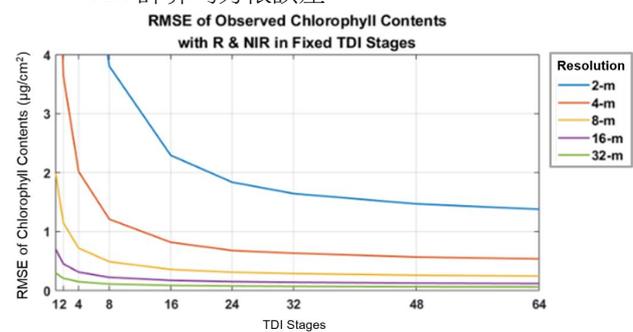


圖 9 福衛八號兩植被紅邊波段 VRE1 與 VRE2 於不同 TDI 階數下所對應之訊噪比



(a) 所有觀測波段採用相同 TDI 階數並一同變動 TDI 計算均方根誤差



(b) 紅與近紅外波段固定於 8 階 TDI 僅紅邊波段 TDI 變動計算均方根誤差

圖 10 不同感測器 TDI 設置下對於反演葉綠素含量之均方根誤差

3.2 雜訊對於葉綠素含量反演模型之影響

在過去文獻中曾於 Sentinel-2 任務規劃時討論在高葉面積指數下 (LAI=3~4)，使用其模擬顯反射率所得之 IGRM 反曲點波長對原真實葉綠素含量設定 2 次多項式進行擬合 (Segl *et al.*, 2012)。文獻中指出此時之均方根誤差為 $3.8\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 及 R-square 值為 0.98。對應本研究之計算推估，在福衛八號衛星設計中若植被紅邊波段僅使用 16 階 TDI，紅與近紅外波段使用 8 階 TDI 之情形下，不論葉面積指數設定為 3 或 4 時，使用反曲點波長對原真實葉綠素含量設定 2 次多項式進行擬合，所得之葉綠素含量均方根誤差均約為 $3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 左右，而擬合之 R-square 值幾近 1，與文獻所提之結果有相近品質 (圖 11)。

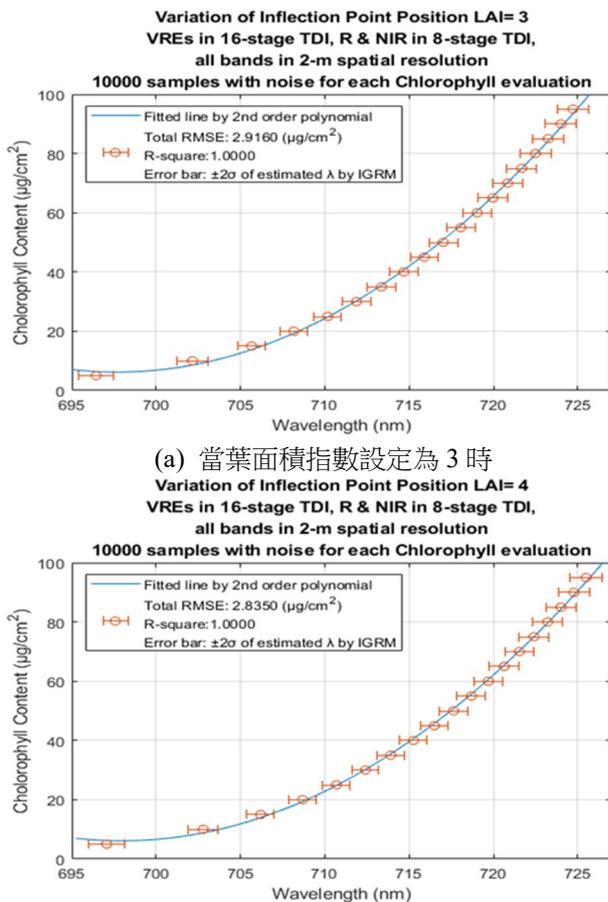


圖 11 於 16 階 TDI 下模擬顯反射率所得之 IGRM 反曲點波長對所得葉綠素含量使用二階多項式擬合之結果

3.3 以建議感測器 TDI 配置搭配不同植被推估葉綠素反演誤差

在植被紅邊波段以建議感測器 TDI 配置為 32 階的情形下，不論紅與近紅外波段是使用 32 階 TDI (圖 12(a)) 或是使用 8 階 TDI (圖 12(b))，均可看出葉綠素含量反演之均方根誤差隨葉面積指數之增加而降低，並同時隨實際葉綠素含量之增加而增加。同時於常見植被條件下，即葉綠素含量 $5\sim 50\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 與葉面積指數為 1~5 間時，其葉綠素含量之均方根誤差不大於 $3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

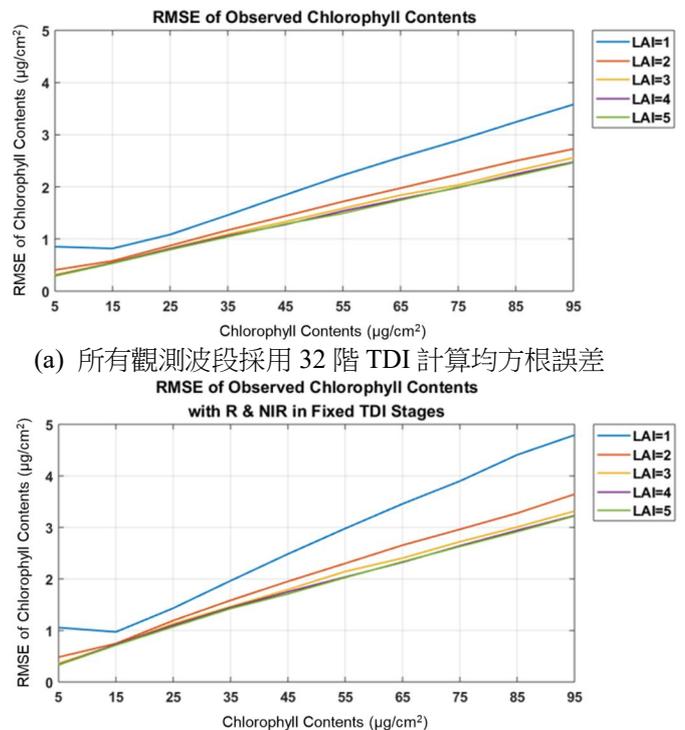


圖 12 建議感測器 TDI 配置下，反演葉綠素含量均方根誤差於不同葉面積指數下隨實際葉綠素含量之變化

4. 結論與展望

根據本研究結果，當植被紅邊波段之 TDI 階數大於 32 階後，不論紅與近紅外波段之 TDI 是否固定為 8 階時，反演所得之葉綠素含量均方根誤差降低有限。透過模擬之訊號與反演出之葉綠

素含量分析，葉綠素含量反演之均方根誤差隨葉面積指數之增加而降低，並同時隨實際葉綠素含量之增加而增加。此外在植被紅邊波段之 TDI 階數設定為 32 階，紅光與近紅外波段 TDI 階數固定為 8 階，葉綠素含量變動範圍較大時，如 $5\sim 95\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，對應均方根誤差將小於 $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，而在葉綠素含量變動範圍較小時，如 $5\sim 50\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，對應均方根誤差將可小於 $3\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。後續將基於本研究成果模擬測試影像並進行影像分類測試，藉此評估實際影像應用情形，並分析福衛八號感測器之效能。

參考文獻

- 李汪盛，2013。薤葉葉綠素含量多光譜影像遙測系統之研發，桃園區農業改良場研究彙報，73：37-52。[Li, W.S., 2013. Development of a multi-spectral remote imaging system to measure chlorophyll content in *Ipomoea Aquatica*, Bulletin of Taoyuan District Agricultural Research and Extension Station, 73: 37-52. (in Chinese)]
- 國家太空中心，2020。福爾摩沙衛星八號任務酬載，
https://www.nspo.narl.org.tw/inprogress.php?c=20022401&ln=zh_TW，引用 2020/07/13。
[National Space Organization, 2020. FORMOSAT-8 Payloads, Available at: https://www.nspo.narl.org.tw/inprogress.php?c=20022401&ln=zh_TW, Accessed July 13, 2020. (in Chinese)]
- 劉小菁、曾世平、林喆、張和本，2014。福衛五號遙測酬載系統工程經驗，航測及遙測學刊，18(1)：29-38。[Liu, C., Tseng, M., Ling, J., and Chang, H.P., 2014. The system engineering experience of FORMOSAT-5 remote sensing instrument, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 18(1): 29-38. (in Chinese)]
- Ciganda, V., Gitelson, A., and Schepers, J., 2008. Vertical profile and temporal variation of chlorophyll in maize canopy: Quantitative “Crop Vigor” indicator by means of reflectance-based techniques, *Agronomy Journal*, 100(5): 1409-1417.
- Croft, H., Chen, J.M., Froelich, N.J., Chen, B., and Staebler, R.M., 2015. Seasonal controls of canopy chlorophyll content on forest carbon uptake: Implications for GPP modeling, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(8): 1576-1586.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., and Ustin, S.L., 2009. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization, *Remote Sensing of Environment*, 113: S56-S66.
- Pierre, A., and Arias, A.C., 2016. Solution-processed image sensors on flexible substrates, *Flexible and Printed Electronics*, 1(4): 043001.
- Segl, K., Richter, R., Küster, T., and Kaufmann, H., 2012. End-to-end sensor simulation for spectral band selection and optimization with application to the Sentinel-2 mission, *Applied Optics*, 51(4): 439-449.
- Teillet, P.M., Barker, J.L., Markham, B.L., Irish, R.R., Fedosejevs, G., and Storey, J.C., 2001. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets, *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2): 39-54.
- Tsai, H.L., 2009. RSI Irradiance Calculation Memo, ITRC-RS-FS5.RSI-MEMO -00-980505.
- USGS, 2020. Spectral Characteristics Viewer, Available at: <https://landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer>, Accessed June 22, 2020.

Assessment of FORMOSAT-8 Time Delay Integration on the Retrieval of Chlorophyll Content Quality by Using Red Edge Bands

Li-Yu Chang ^{1*} Cynthia Liu ² Tun-Yu Liao ³

Abstract

The FORMOSAT-8 (FS-8) program integrates two vegetation red edge (VRE) bands into its two-meter push-broom multi-spectral sensors. Time-Delay-Integration (TDI) technique is utilized to improve Signal-to-Noise Ratio (SNR). Along with other applications, these two VRE bands are fruitful for the retrieval of chlorophyll contents of vegetation canopies. Without TDI, high spatial resolution and narrow bandwidth result in poor SNR which weakens the applicability of VRE bands. In order to obtain reasonable number of TDI stages setting for VRE bands, firstly the spectral responses of chlorophyll contents are simulated to obtain the noise affected reflectances observed by different number of TDI stages setting. Then, acceptable accuracy of retrieved chlorophyll contents and the corresponding number of TDI stages setting are suggested as a reference in the design of FS-8.

Keywords: FORMOSAT-8, Vegetation Red Edge, Chlorophyll Contents, Signal-to-Noise Ratio, Time Delay Integration

¹ Associate Researcher, Satellite Image Division, National Space Organization

² Director of Satellite Image Division, National Space Organization

³ Research Assistant, Satellite Image Division, National Space Organization

* Corresponding Author, Tel: 886-3-5784208 ext.7516, E-mail: 1902003@narlabs.org.tw

Received Date: Jul. 09, 2020

Revised Date: Jul. 30, 2020

Accepted Date: Aug. 28, 2020