

遙測酬載光學設計分析

Optical Design and Analysis of Remote Sensing Instrument

張勝聰

Shenq-Tsong Chang

本文敘述福衛五號衛星遙測酬載 (RSI) 光學設計及性能評估分析，包括設計需求、設計結果、容差分析、光學調變傳遞函數 (MTF) 及訊雜比 (SNR)。傳承福衛二號經驗，採用 Cassegrain 反射式望遠鏡設計，望遠鏡包含主鏡 (M1)、次鏡 (M2) 與四透鏡組成之修正鏡組 (corrector)。主鏡與次鏡材質為零膨脹係數玻璃 Zerodur，修正鏡組透鏡與波段濾波片 (filter) 使用熔融石英 (fused silica) 以符合抗輻射需求。望遠鏡焦長 3,600 mm，通光口徑為 450 mm。MTF 設計值趨近於繞射極限，SNR 符合 CMOS 感測器與 RSI 規格需求。

This article describes the telescope optical design and performance analysis of the Remote Sensing Instrument (RSI) of Formosat-5. The design requirements, design results, tolerance analysis, evaluations of Modulation Transfer Function (MTF) and Signal to Noise Ratio (SNR) are included. Cassegrain telescope design is selected due to the existed experience. The telescope consists of a primary mirror, a secondary mirror and a four-lens corrector. Mirrors are made of Zerodur for very low CTE requirement. Fused silica is selected for corrector lens and band-pass filters to meet radiation resistance requirement in space. The telescope has the focal length of 3,600 mm, and the clear aperture of 450 mm. The analysis results show that the design MTF is diffraction limited, and SNR complies with the requirements of CMOS sensor and RSI.

一、簡介

福衛五號為第二期太空計畫最主要衛星之一。福衛五號計畫主要目的在於建立國內衛星本體與光學遙測酬載自主研發能力，及延續福衛二號提供使用者高解析光學遙測影像。福衛五號最主要任務為獲取及監測台灣陸地與周邊海洋資源與環境。RSI 計畫最終目標為研發符合系統需求，特別是光學調變傳遞函數 (Modulation Transfer Function, MTF) 與訊雜比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 之飛

行體 (FM)。RSI 光學系統主要由國家實驗研究院 (NARLabs) 所轄儀器科技研究中心 (ITRC) 與國家太空中心 (NSPO) 合作完成。

二、光學設計

表 1 為光學設計需求，RSI 焦長 f 由衛星軌道高度 (orbit altitude, H) 與地面解析度 (ground sampling distance, GSD) 及感測器畫素大小 (pixel pitch, p) 決定，其關係如圖 1 所示。計算公式如下

表 1. 光學設計需求。

| Item | Parameters |
|----------------------------------|--|
| Orbit Altitude | 720 km |
| Swath | 24 km |
| GSD | 2 m (PAN); 4 m (MS) |
| Spectral Band | PAN + 4 MS |
| Entrance Pupil Dia. | 450 mm |
| Image Distortion. | < ± 0.3% |
| Overall Length | ≤ 1000 mm |
| Telecentricity | ≤ 10 degrees |
| Sensor | CMOS TDI PAN: 10 μm × 10 μm pixel pitch, max 16 stages, 0.297 ms integration time MS: 20 μm × 20 μm pixel pitch, max 8 stages, 0.594 ms integration time |
| Focal Length | 3600 mm ± 0.1% |
| FOV (Image Area) | 1.94° × 0.287°, diagonal 1.962° (122 × 18 mm, diagonal 123.3 mm) |
| Linear Central Obscuration Ratio | ≤ 0.52 |
| Design MTF | (Diffraction limited MTF)*0.95 |

面公式 (1)。

$$f = \frac{H}{\text{GSD}} p \quad (1)$$

居於福衛二號傳承，RSI 望遠鏡設計採用 Cassegrain 型態，望遠鏡焦長為 3,600 mm，通光口

徑為 450 mm。望遠鏡主要組成包含主鏡、次鏡與修正鏡組，主鏡與次鏡為圓錐曲面，修正鏡組的四個透鏡均為球面設計以方便加工檢測。主鏡與次鏡材質為零膨脹係數玻璃 Zerodur，修正鏡組透鏡與波段濾波片使用熔融石英以符合抗輻射需求。光學設計結果如圖 2 光路所示。

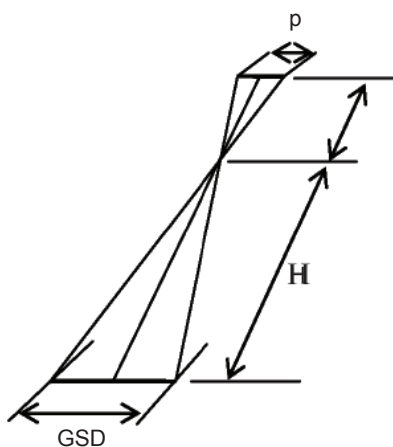


圖 1. RSI 焦長、軌道高度、GSD 與 pixel pitch 關係。

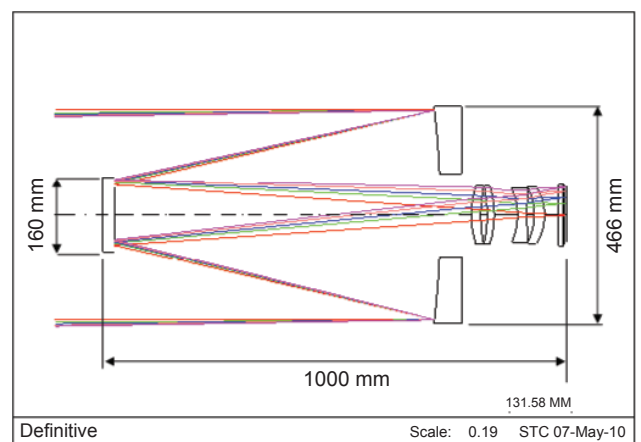


圖 2. RSI 望遠鏡光路。

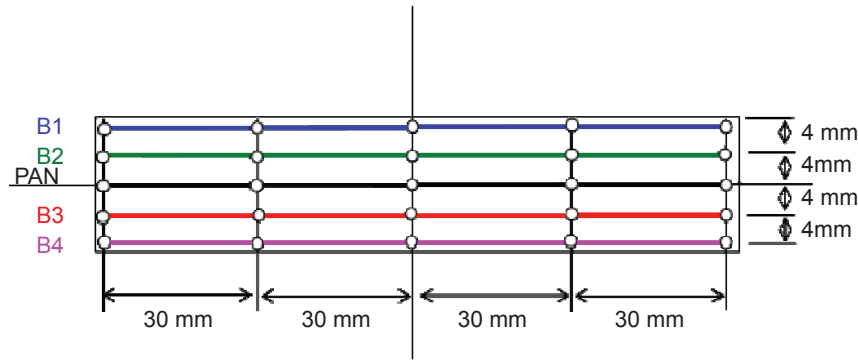


圖3. 容差分析場點。

三、容差分析

光學系統由於元件製造及組裝誤差，均會使其 MTF 較設計值為低，故需分析其製造及組裝容差，以開立元件及組裝規格。容差分析時，為了解其性能變化，分析圖 3 中所示代表性場點之

MTF，分析結果如表 2、表 3 與表 4。表 2 為軸對稱容差(centered tolerances)，包括曲率半徑、球面不規則度、平面度、鏡片厚度及間隔等容差。表 3 為非軸對稱容差或偏心容差 (decentered tolerances)，包括製作時透鏡偏斜 (wedge angle)、組裝時元件傾斜 (tilt) 及偏位 (decenter) 容差。表 4

表 2. RSI Centered Tolerances。

| SUR | RADIUS | | FRINGES POW/IRR | THICKNESS | | INDEX GLASS | V-NO TOL (%) | INHOMO- GENEITY |
|-----|--------|--------|--------------------|------------|---------|----------------|-----------------|--------------------|
| | RADIUS | TOL | | THICKNESS | TOL | | | |
| 1 | | | | 30.00000 | | | | |
| 2 | | | | 699.86000 | | | | |
| 3 | | 2.0000 | | -699.86000 | | REFL | | |
| 4 | | 0.8000 | | 699.86000 | | REFL | | |
| 5 | | | | 65.0000 | | | | |
| 6 | | 0.1900 | / 0.50 | 20.21000 | 0.02500 | SILICA | | |
| 7 | | 0.2900 | / 0.50 | 13.73000 | 0.02500 | | | |
| 8 | | 0.2700 | / 0.50 | 15.00000 | 0.02500 | SILICA | | |
| 9 | | 0.2000 | / 0.50 | 51.86000 | 0.02500 | | | |
| 10 | | 0.1400 | / 0.50 | 20.00000 | 0.02500 | SILICA | | |
| 11 | | 0.7600 | / 0.50 | 15.23000 | 0.02500 | | | |
| 12 | | 0.1800 | / 0.50 | 22.00000 | 0.02500 | SILICA | | |
| 13 | | 0.1200 | / 0.50 | 30.00000 | | | | |
| 14 | INF | | 4.0/ 1.00 | 10.00000 | 0.05000 | SILICA | | |
| 15 | INF | | 4.0/ 1.00 | 2.00000 | | | | |
| 16 | INF | | 4.0/ 1.00 | 1.02000 | 0.05000 | D263T | | |
| 17 | INF | | 4.0/ 1.00 | 4.09000 | | | | |
| 18 | | | | 0.00000 | | | | |

1. Radius, radius tolerance, thickness and thickness tolerance are given in mm.

2. Fringes of power and irregularity are at 633.0 nm over the clear aperture

3. Irregularity is defined as fringes of cylinder power in test plate fit

表 3. RSI Decentered Tolerances。

| ELEMENT NO. | FRONT RADIUS | BACK RADIUS | ELEMENT WEDGE | | ELEMENT TILT | | EL. DEC/ROLL (R) | |
|-------------|--------------|-------------|---------------|---------|--------------|---------|------------------|--------|
| | | | TIR | ARC MIN | TIR | ARC MIN | TIR | mm. |
| 1 | | (MIRROR) | | | | | | |
| 2 | | (MIRROR) | | | | | | |
| 3 | | | 0.0708 | 2.1 | 0.0708 | 2.1 | 0.0086 | 0.0350 |
| 4 | | | 0.0708 | 2.1 | 0.0708 | 2.1 | 0.0048 | 0.0350 |
| 5 | | | 0.0654 | 2.1 | 0.0654 | 2.1 | 0.0324 | 0.0350 |
| 6 | | | 0.0666 | 2.1 | 0.0666 | 2.1 | 0.0057 | 0.0350 |
| 7 | INF | INF | 0.0756 | 2.1 | 0.0756 | 2.1 | | |
| 8 | INF | INF | 0.0723 | 2.1 | 0.0723 | 2.1 | | |

1. Radii are given in units of mm.
2. For wedge and tilt, TIR is a single indicator measurement taken at the smaller of the two clear apertures. For decenter and roll, TIR is a measurement of the induced wedge and is the maximum difference in readings between two indicators, one for each surface, with both surfaces measured at their respective clear apertures. The direction of measurement is parallel to the original optical axis of the element before the perturbation is applied. TIR is measured in mm.
3. Decenter or roll is measured perpendicular to the optical axis in mm.

為其他容差，第一及二欄分別為主鏡 (M1) 及次鏡 (M2) 面精度容差，表中以 Zernike 多項式模擬鏡面有效口徑內之面形誤差，容差量 RMS 值 35 nm，為所有 36 個項次 Zernike 表徵面形之總和，係數值以牛頓圈 (Fringe) 波長為單位表示。第三欄為透鏡玻璃材質之折射率與 Abbe 色散容差。容差量長度單位為 mm，角度單位為 (弧) 分，牛頓圈波長為 633 nm。

考慮實際組裝可能情況，上述容差分析尚包含數項補償參數 (compensator) 以減緩容差敏感度，除系統焦平面調焦外，還包括次鏡與修正透鏡整組之 x 、 y 、 z 方向位移與 x 、 y 方向傾斜，各項目的可能最大調整範圍如表 5 所示。

考慮元件製造及系統組裝容差後分析所得之 MTF 值如表 6 所示，全波段 (Panchromatic band, PAN) 及多波段 (Multispectral band, MS) 的各波段之 MTF 計算分析結果顯示焦平面各位置之 MTF 值頗為平均，此點對於焦平面之各波段安排有好處。表中 Ratio 一欄為組裝後 MTF 與設計 MTF 之比值，可以顯示 MTF 受容差影響程度，以 PAN 最大視野影響最嚴重，但仍維持 85% 以上。

四、光學成像品質 MTF 評估

光學系統計算 MTF 時，考量各個波長之相對輻射度、系統穿透率及相對響應，計算不同波長 MTF 的權重，分析所得 MTF 曲線如圖 4，可知所有視角之 MTF 均接近繞射極限。光學設計之主鏡有效直徑為 450 mm，實際外徑為 466 mm，次鏡有效口徑為 149 mm，實際外徑為 156 mm，次鏡對入瞳之遮蔽率 (linear central obscuration ratio) 0.347，預估遮光罩 (baffle) 及次鏡支撐結構 (spider) 之遮蔽，在此以 0.52 之比例估算 MTF。

分析此光學系統之 MTF 過焦曲線 (through focus MTF) (如圖 5)，可知有效視野範圍內，在 $\pm 30 \mu\text{m}$ 離焦範圍內，光學 MTF 均可保持於 0.377 以上。圖 6 為光學畸變 (distortion)，顯示最大光學畸變約 0.015%。

此外，由於 RSI 實際操作於軌道中為真空環境，而整測時則為 1 大氣壓 (atm) 狀況下，二者環境差異對修正透鏡折射率設定產生影響，因此有必要分析大氣與真空下，RSI 的性能差異。分析過程及結果如表 7 所示。顯示 RSI 因所處環境不同，系統焦長變化量為 0.0002%，而光學 MTF 差異為 0.001，其影響可以忽略。

表 4. M1 與 M2 面形容差與玻璃 n_d 、 V_d 容差。

| TYPE | VALUE | TYPE | VALUE | TYPE | VALUE |
|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| ZRN S3 C4 | 0.0366540 | ZRN S4 C4 | 0.0366540 | DLN S6 C | 0.0001000 |
| ZRN S3 C5 | 0.0366540 | ZRN S4 C5 | 0.0366540 | DLN S8 C | 0.0001000 |
| ZRN S3 C6 | 0.0366540 | ZRN S4 C6 | 0.0366540 | DLN S10 C | 0.0001000 |
| ZRN S3 C7 | 0.0188110 | ZRN S4 C7 | 0.0188110 | DLN S12 C | 0.0001000 |
| ZRN S3 C8 | 0.0188110 | ZRN S4 C8 | 0.0188110 | DLN S14 | 0.0001000 |
| ZRN S3 C9 | 0.0188110 | ZRN S4 C9 | 0.0188110 | DLV S6 C | 0.0100000 |
| ZRN S3 C10 | 0.0188110 | ZRN S4 C10 | 0.0188110 | DLV S8 C | 0.0100000 |
| ZRN S3 C11 | 0.0118300 | ZRN S4 C11 | 0.0118300 | DLV S10 C | 0.0100000 |
| ZRN S3 C12 | 0.0118300 | ZRN S4 C12 | 0.0118300 | DLV S12 C | 0.0100000 |
| ZRN S3 C13 | 0.0118300 | ZRN S4 C13 | 0.0118300 | DLV S14 | 0.0100000 |
| ZRN S3 C14 | 0.0118300 | ZRN S4 C14 | 0.0118300 | | |
| ZRN S3 C15 | 0.0118300 | ZRN S4 C15 | 0.0118300 | | |
| ZRN S3 C16 | 0.0082938 | ZRN S4 C16 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C17 | 0.0082938 | ZRN S4 C17 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C18 | 0.0082938 | ZRN S4 C18 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C19 | 0.0082938 | ZRN S4 C19 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C20 | 0.0082938 | ZRN S4 C20 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C21 | 0.0082938 | ZRN S4 C21 | 0.0082938 | | |
| ZRN S3 C22 | 0.0062211 | ZRN S4 C22 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C23 | 0.0062211 | ZRN S4 C23 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C24 | 0.0062211 | ZRN S4 C24 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C25 | 0.0062211 | ZRN S4 C25 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C26 | 0.0062211 | ZRN S4 C26 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C27 | 0.0062211 | ZRN S4 C27 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C28 | 0.0062211 | ZRN S4 C28 | 0.0062211 | | |
| ZRN S3 C29 | 0.0048861 | ZRN S4 C29 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C30 | 0.0048861 | ZRN S4 C30 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C31 | 0.0048861 | ZRN S4 C31 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C32 | 0.0048861 | ZRN S4 C32 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C33 | 0.0048861 | ZRN S4 C33 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C34 | 0.0048861 | ZRN S4 C34 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C35 | 0.0048861 | ZRN S4 C35 | 0.0048861 | | |
| ZRN S3 C36 | 0.0048861 | ZRN S4 C36 | 0.0048861 | | |

Note: The physical interpretation of each term follows the definition of CODE V users' manual

表 5. Range of compensators °

| Type | Range (+/-) |
|--|--------------|
| Tilt about x axis of M2 | 0.57 arc min |
| Tilt about y axis of M2 | 0.75 arc min |
| Displacement in x of M2 | 0.057 mm |
| Displacement in y of M2 | 0.049 mm |
| Displacement in z of M2 | 1.243 mm |
| Displacement in z of the focal plane | 4.966 mm |
| Group displacement of corrector lens in x | 0.250 mm |
| Group displacement of corrector lens in y | 0.203 mm |
| Group displacement of corrector lens in z | 2.511 mm |
| Group barrel tilt of corrector lens in x-z plane | 6.77 arc min |
| Group barrel tilt of corrector lens in y-z plane | 4.47 arc min |

表 6. MTF values regarding to the manufacturing and alignment tolerance °

| | | Image Height = 0 mm | | | Image Height = 30 mm | | | Image Height = 60 mm | | |
|-----|-----|---------------------|--------------|-------|----------------------|--------------|-------|----------------------|--------------|-------|
| | | Design | Design + Tol | Ratio | Design | Design + Tol | Ratio | Design | Design + Tol | Ratio |
| PAN | ACT | 0.3989 | 0.3522 | 0.883 | 0.3985 | 0.3524 | 0.884 | 0.3978 | 0.3383 | 0.850 |
| | ALT | 0.3989 | 0.3576 | 0.896 | 0.3978 | 0.3546 | 0.891 | 0.3925 | 0.3452 | 0.880 |
| B1 | ACT | 0.7395 | 0.7083 | 0.958 | 0.7414 | 0.7124 | 0.961 | 0.7367 | 0.7019 | 0.953 |
| | ALT | 0.7403 | 0.7166 | 0.968 | 0.7393 | 0.7123 | 0.963 | 0.7354 | 0.7023 | 0.955 |
| B2 | ACT | 0.7040 | 0.6767 | 0.961 | 0.7031 | 0.6782 | 0.965 | 0.6987 | 0.6687 | 0.957 |
| | ALT | 0.7029 | 0.6818 | 0.970 | 0.7034 | 0.6797 | 0.966 | 0.6985 | 0.6709 | 0.960 |
| B3 | ACT | 0.6479 | 0.6241 | 0.963 | 0.6501 | 0.6287 | 0.967 | 0.6463 | 0.6200 | 0.959 |
| | ALT | 0.6490 | 0.6297 | 0.970 | 0.6472 | 0.6260 | 0.967 | 0.6443 | 0.6203 | 0.963 |
| B4 | ACT | 0.5584 | 0.5396 | 0.966 | 0.5601 | 0.5429 | 0.969 | 0.5595 | 0.5389 | 0.963 |
| | ALT | 0.5593 | 0.5431 | 0.971 | 0.5600 | 0.5426 | 0.969 | 0.5580 | 0.5377 | 0.964 |

Note: 1. ACT: across track, ALT: along track

表 7. 大氣與真空下 RSI 性能差異分析。

| 項目 | In air | Change (from air to vacuum) |
|--|----------|-----------------------------|
| Index of fused silica @ 550nm | 1.459915 | 0.0004 |
| Index of D263T @ 550nm | 1.525273 | 0.0004 |
| System EFL (mm) @ 550nm | 3600.003 | 0.008 |
| PAN MTF@ 50 lp/mm, center field, w/o refocus | 0.398 | -0.001 |

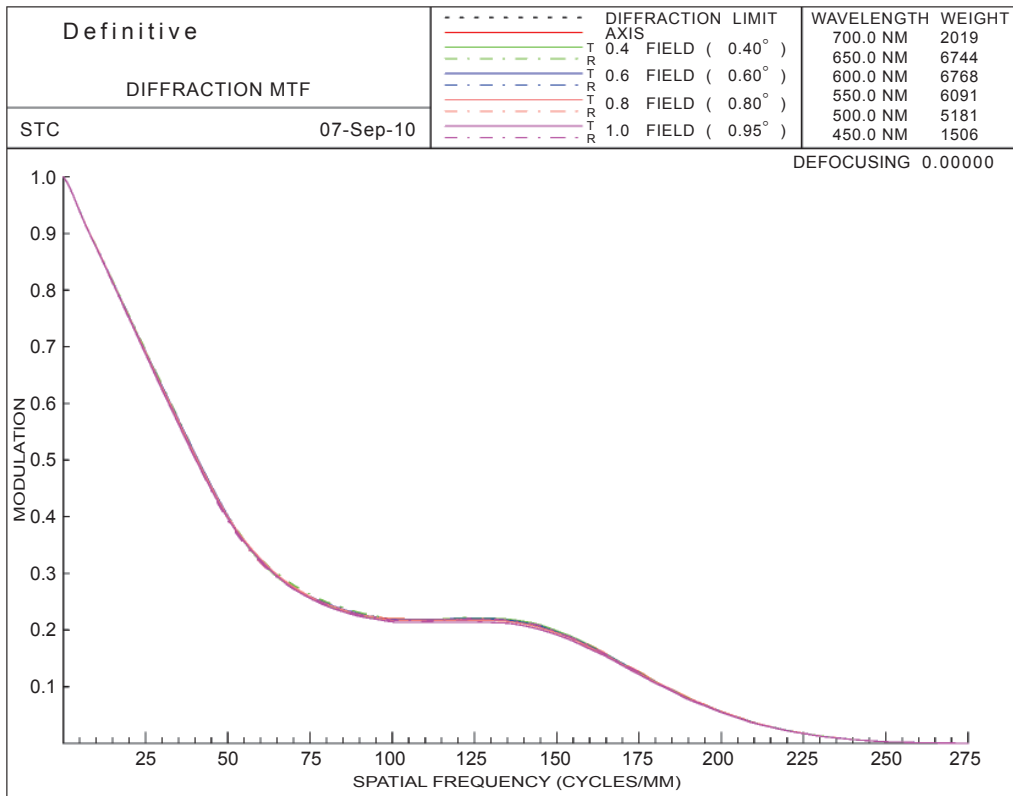


圖 4. PAN MTF 曲線。

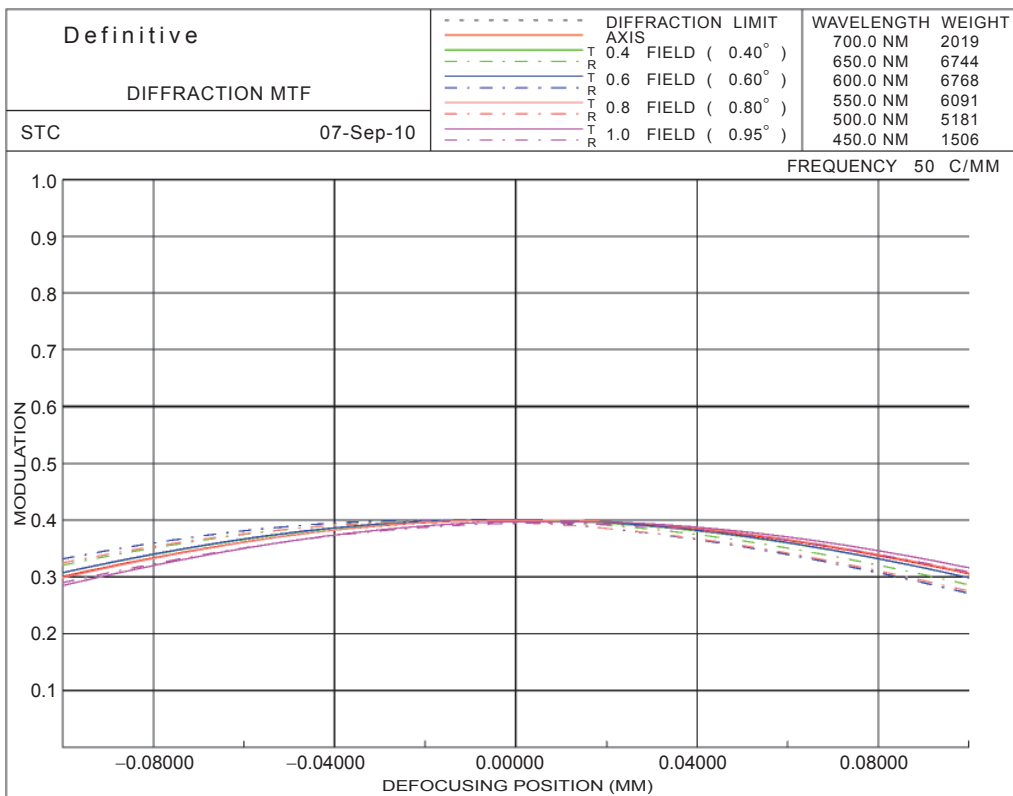


圖 5. PAN Through focus MTF。

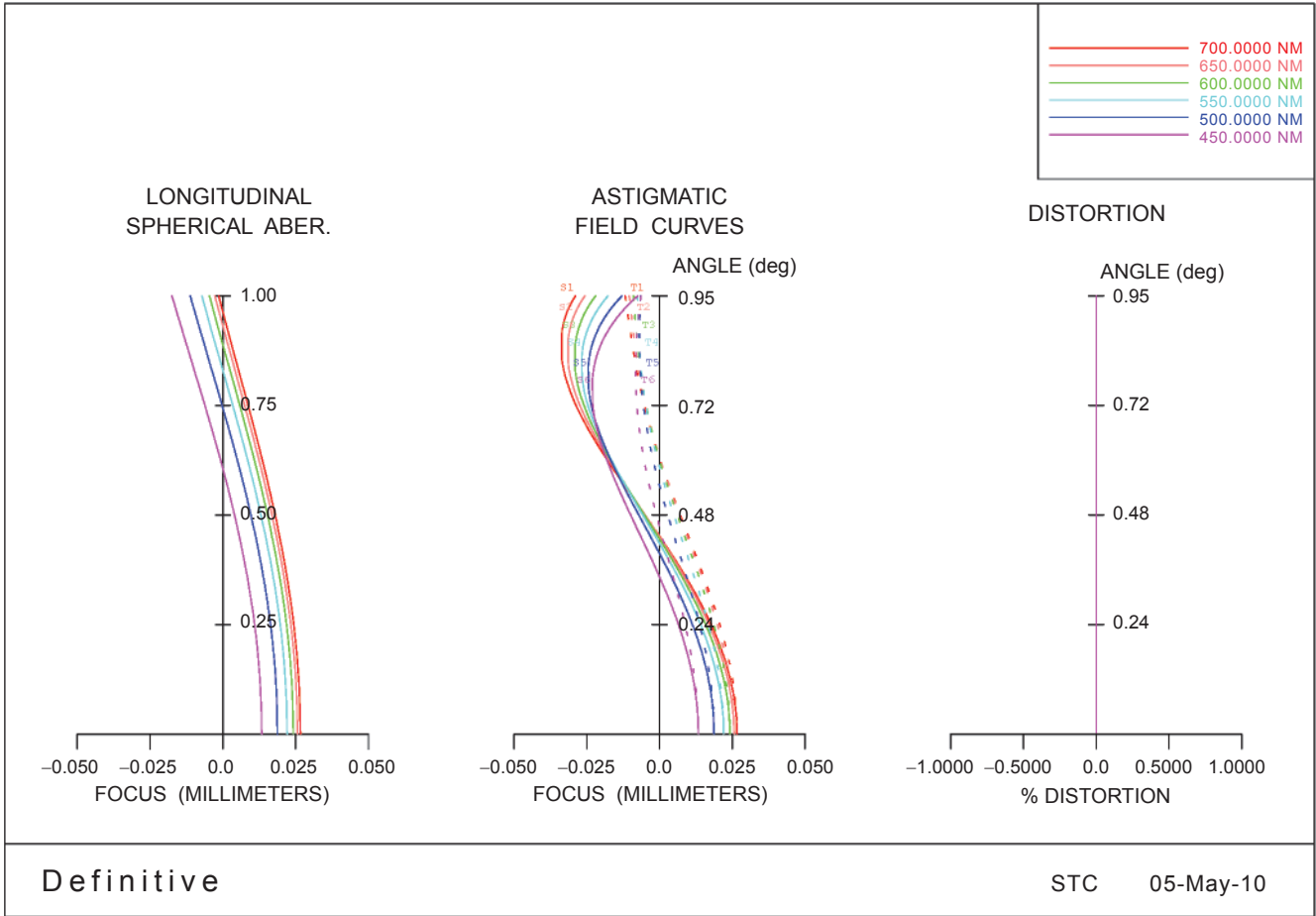


圖 6. 光學畸變。

五、訊雜比 SNR 評估

RSI 焦平面之照度可以下式計算

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

其中 L_e 為光輻射度，為系統規格， F 為口徑比 (F-number)， T 為光學系統穿透率， $\Delta\lambda$ 為波段範圍， M 為放大倍率，對於 RSI 望遠鏡而言， $M = 0$ 。入射光線經感測器轉換為訊號電子數為

$$n_s = QE \cdot \frac{I \cdot A_{detector} \cdot fill\ factor \cdot \Delta t_{int}}{hc/\lambda} \quad (3)$$

QE 為光電轉換效率，依感測器而異。而其雜訊可以下式估算

$$n_{noise} = \sqrt{n_s + n_{AD}^2 + n_{rms}^2 + n_{channel}^2} \quad (4)$$

其中根號內第一項稱為 shot noise，大小等於訊號電子數開平方，第二項為 quantization noise 由於 A/D 轉換造成，第三項為畫素之暗訊號造成，第四項為放大電路所產生之雜訊，後三項之和方根又可統稱為 noise floor。依 CMOS Sensor 廠商提供數據推估，PAN 波段 noise floor 約為 100、MS 波段約為 200。

圖 7 為 RSI 系統分光穿透率曲線，包含透鏡及濾光片之穿透率及主鏡與次鏡之反射率，圖 8 為感測器之量子效率 (quantum efficiency, QE) 曲線。根據圖 7 曲線及規格訂定之地表分光輝度 (radiance)，由公式 2 可算出 RSI 焦平面之照度 I ；根據圖 8 之 QE 曲線，由公式 3 可計算出訊號電子數；而利用公式 4 可計算系統雜訊；最後計算訊號與雜訊比值即得系統之訊雜比 SNR，結果如表 8。

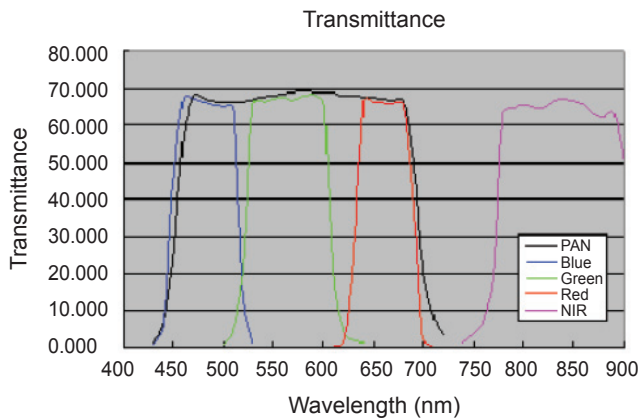


圖 7. 系統分光穿透率。

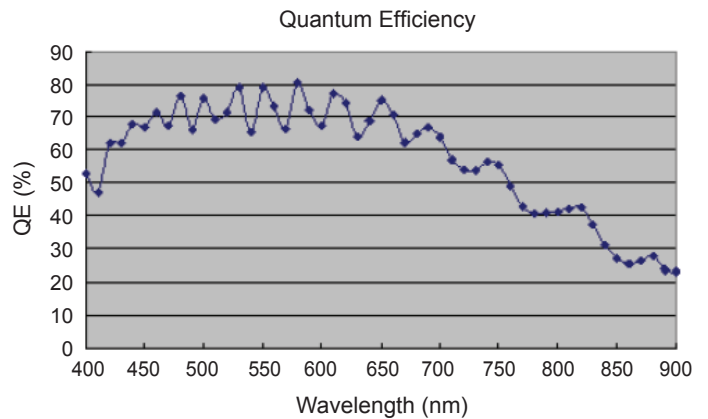


圖 8. CMOS 感測器 QE 曲線。

表 8. 系統 SNR 估算。

| | B1 | B2 | B3 | B4 | Pan |
|-----------|------|------|-------|-------|------|
| Require | ≥ 95 | ≥ 95 | ≥ 100 | ≥ 100 | ≥ 83 |
| Estimated | 98 | 142 | 114 | 122 | 90 |

六、結論

傳承福衛二號設計，福衛五號 RSI 望遠鏡採用 Cassegrain 型態，光學設計結果符合 RSI 規格需求，分析顯示 MTF 趨近於繞射極限，而 SNR 也符合 CMOS 感測器與 RSI 規格需求。

參考文獻

1. Robert E. Fischer, Biljana Tadic-Galeb, "Optical System Design", New York: McGraw-Hill, (2000).
2. R. Kingslake, "Lens Design Fundamentals", New York: Academic Press, (1978).
3. Robert R. Shannon, "The Art and Science of Optical Design", Cambridge University Press, (1997).
4. ROC2.TN.0143.MMS-T, "SI Allocations / Performances and Verification Document", (2000).
5. ITRC-RS-FS5.RSI-SPC-01-990212, "Formosat-5 RSI Telescope Specification Document", (2010).



張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Shenq-Tsong Chang received his M.S. in physics from The Catholic University of America. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, NARLabs.