

次世代遙測衛星酬載光機結構設計與分析

Design and Analysis of A TMA Telescope for Next Generation Earth Observation Satellite

林育全、張勝聰、連俊傑、黃鼎名

Yu-Chuan Lin, Shenq-Tsong Chang, Roger Lien, Ting-Ming Huang,

為自主研發高解析度遙測取像儀器，並執行次世代衛星遙測酬載系統技術研發，國研院儀科中心於 105 年度，開始進行離軸式三反射鏡光學系統設計及光機結構分析，截至目前為止，已獲得相當重要技術能量與經驗。本研究整合光學設計與光機分析技術，進行次世代遙測衛星酬載光機結構之靜態強度及動態剛性分析，預估光機結構所承受之自重變形與應力分布，並求取自然頻率與模態振形，以評估整體光機結構性能，研究過程並探討自重變形導致光學鏡片對成像品質之影響，為後續系統組裝工程綜合分析，使光學系統影像達成最佳設計值。

Three mirror anastigmatic (TMA) telescope provides a better solution to meet the requirements of high resolution and wide swath, it has become one of candidate to be next generation observation payload for satellite. This article reports on design, analysis, assembly and implementation of a TMA telescope for next earth observation satellite. A straightforward approach is presented that integrated finite element method and Zernike polynomials fitting techniques is found to successfully predict optical performance. Furthermore, an optomechanical structure of TMA optical system was configured which is implemented to verify the present.

一、前言

隨著世界各先進國家對極端氣候之災害防治、國土監控及海洋資源探索意識高漲，衛星遙測技術所需影像品質與地面解析度要求愈來愈高，遙測儀器光學系統所需有效焦長及鏡片口徑亦逐漸增大，以國內福衛二號及福衛五號衛星所搭載的遙測酬載為例，光學系統皆採用折反射式卡塞格林 (Cassegrain) 光學設計，主要由兩片光學反射鏡

所組成，主鏡片收光後折反射至次鏡片及修正透鏡組，其反射鏡片口徑大小是影響光機系統體積與重量的主要因素，直接決定光機結構形式、衛星酬載發射成本及軌道運行姿態調控，因此必須確保在靜態強度、動態剛性及熱結構耦合等性能要求前提下，進行最佳化光機設計與輕量化，以達到符合太空規格需求光學品質。三反射鏡光學系統 (three-mirror anastigmat, TMA) 相較於傳統卡塞格林光學系統，具有較多項光學設計參數，在設計端可大幅

修正光學系統像差，且可有效提高系統焦長及刈幅，被逐漸廣泛應用在次世代衛星遙測酬載系統的發展。本文主要提出離軸式 Korsch 三反射鏡光學系統設計、光機結構分析及組裝測式方法，整合光學設計與光機分析技術，使用有限元素法分析光機結構之靜態強度及動態特性，預估光機結構所承受之自重變形與應力分佈情形，並求取光機結構自然頻率與模態振形，以評估整體光機結構性能，研究過程中並深入探討自重變形導致光學系統調制轉換函數 (modulation transfer function, MTF) 的變化情形，分別將光學鏡片表面變形擬合所產生的 Zernike 多項式係數，即光學鏡片表面之各階像差代入光學軟體中計算，分析光學系統調制轉換函數 MTF 原始設計與變形後之差異，最後依據光機分析結果，回饋至重要結構零件之尺寸設計與檢討，為後續光學系統組裝與調校作綜合分析，在各項機構地面輔助治具配合下，使影像達成最佳之設計值。

二、遙測酬載系統設計與分析

1. 光學系統設計與分析

大視場、長焦距、體積重量小是次世代遙測衛星酬載系統設計與發展趨勢，增大光學系統的視場角可以擴大對地面的遙測範圍，增長焦距可提高對地面遙測解析度，而縮小光機結構外型體積尺寸和

重量，則可降低酬載發射成本及軌道運行姿態調控，故在光學系統設計之初就應作整體綜合考量。由於 TMA 三反射鏡消像散光學系統，具有較多可優化光學設計參數，包括三個反射鏡半徑值、三個非球面係數及兩鏡片間隔等設計參數，且可利用反射鏡折疊光路縮小體積、並增長有效焦距，可達到同時滿足大視場角、高地面遙測解析度及體積小輕量化之需求，被逐漸廣泛應用在次世代衛星遙測酬載光學系統的設計。此外，相較於折射式或折反射式光學系統，TMA 全反射式光學系統不存在色差問題，且鏡片有效通光口徑可設計較大來提高光學系統性能。故本研究離軸式 Korsch 三反射鏡光學系統設計如圖 1 所示，主鏡有效通光口徑為 550 mm、外徑為 566 mm、中央開孔 130 mm，次鏡有效通光口徑為 150 mm，叁鏡有效通光口徑為 186 mm × 86 mm，光學系統焦長為 7714.29 mm ± 2%，地面刈幅 12.56 km (FOV : 1.0 degree)，衛星軌道高度設定在 720 km，地面解析度為 0.7 m，光學系統於空間頻率 50 lp/mm 之 MTF 必須大於 0.3，初始設計值如圖 2 所示。

光學系統受到外在負載作用時，由於支撐結構的變形將對鏡片產生整體相對位移，同時鏡片表面也將發生表面變形；前者在系統整測調校時，可透過調整光學元件間的相對位置，即可消除相對的剛體位移，但卻不能消除表面變形。光學系統整測調校時，可透過調整光學元件 6 個自由度

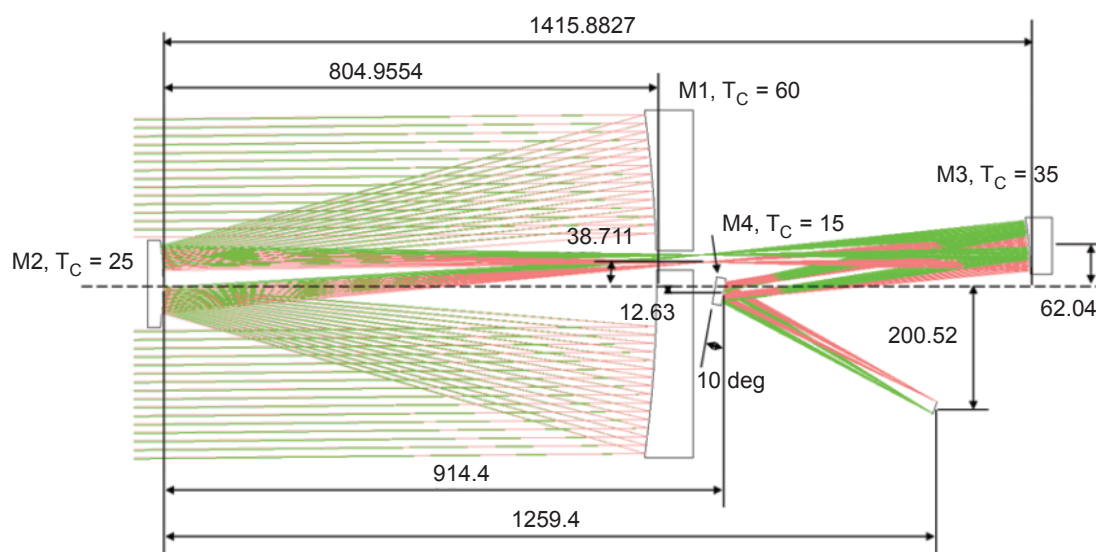


圖 1. 離軸式 Korsch 三反射鏡光學系統。

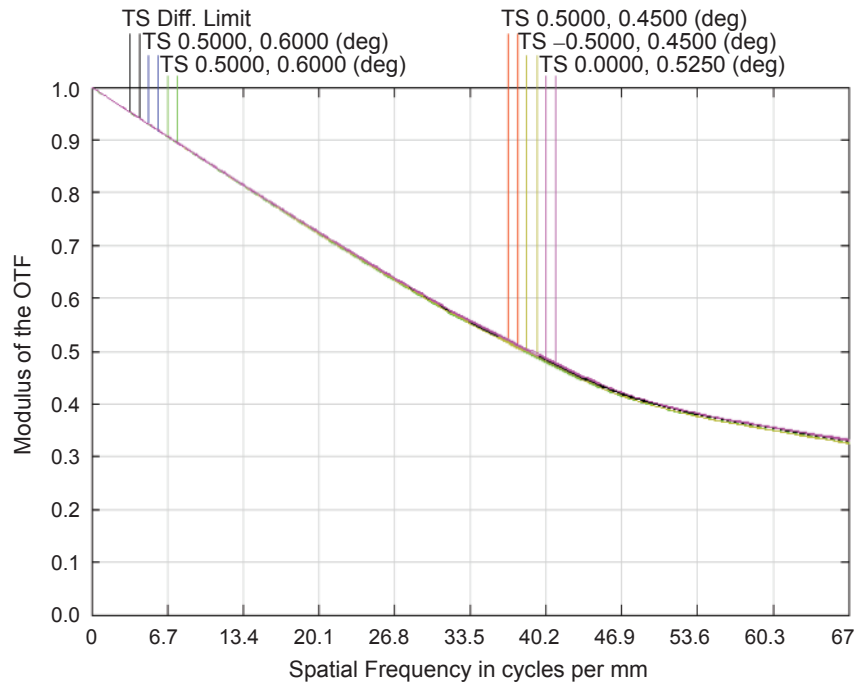


圖 2. 光學系統調制轉換函數初始設計值。

之相對姿態來消除剛體位移，即調整 UX, UY, UZ 三方向偏心 (decenter) 及 ROTX, ROTY, ROTZ 三個方向傾斜 (tilt)。至於光學元件表面變形部分，只有在 Seidel 多項式所描述之低階像差，即與視角無關 (field coordinate $x = 0$) 或一次方線性之像差 (如 coma, $x\rho^3\cos\theta$)，才可透過調整光學元件相對姿態來修正補償 (compensation)，若光機支撐結構對光學元件產生 Seidel 二次方以上非線性之像差 (如 astigmatism, $x^2\rho^2\cos^2\theta$)，將難以透過調整元件來進行修正。此外，在光學系統中常使用各種多項式展開的形式來描述光學系統的像差，而 Zernike 多項式的各項與光學檢測中所觀測到的像差有相對應之關係，故本文將利用 Zernike 多項式進行表面變形之曲面擬合，得到 Zernike 多項式係數，進而求得鏡片表面形貌分佈及像差大小，其多項式表示如下 (1-2)：

$$\Delta Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(r) \quad (1)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n R_n^m [A_{nm} \cos(m\theta) + B_{nm} \sin(m\theta)]$$

A_{nm}, B_{nm} 為 Zernike 多項式係數， n 及 m 分別為徑向及圓周方向的波數，當波數愈多則變化愈快。

2. 光機結構設計與分析

離軸式 Korsch 三反射鏡光學系統光機結構，主要包括主鏡、次鏡、叁鏡、折鏡、主結構、鏡筒及後端 CCD 電路模組 (或稱 FPA) 等，光機結構設計以主板 (mainplate) 為中心區分為前後兩部份，前端主、次鏡片以筒狀構型作連結，後端叁鏡及折鏡片則以桁架作支撐，整體光機結構並以光路水平組裝作為設計基礎 (如圖 3(a) 所示)。光機結構設計與分析主要目的，在於確保光機結構必須具備符合規格要求之靜態強度及動態剛性，以維持光學元件系統之相對位置及保持原始光學設計之成像品質。由於衛載遙測儀器必須經歷地面組裝階段、裝載發射階段及太空軌道運行階段，故從設計、分析、製造到組裝與調校等過程，都必須考量每個階段所受到的各種外在環境負載影響，包括機械負載與振動、熱平衡與溫控、微重力場、真空環境及宇宙輻射等因素。因此，評估遙測酬載光機結構之優劣，則取決於光學鏡片表面之形貌，以及元件間相對位置之精度與穩定性，故光機系統設計有別於一

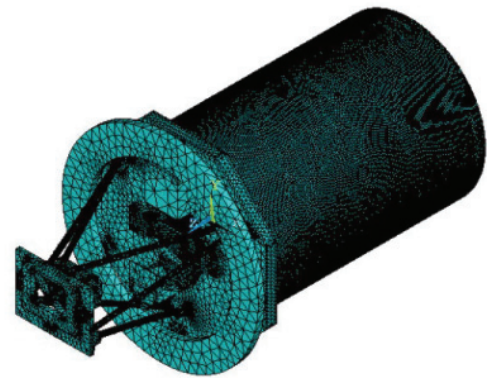
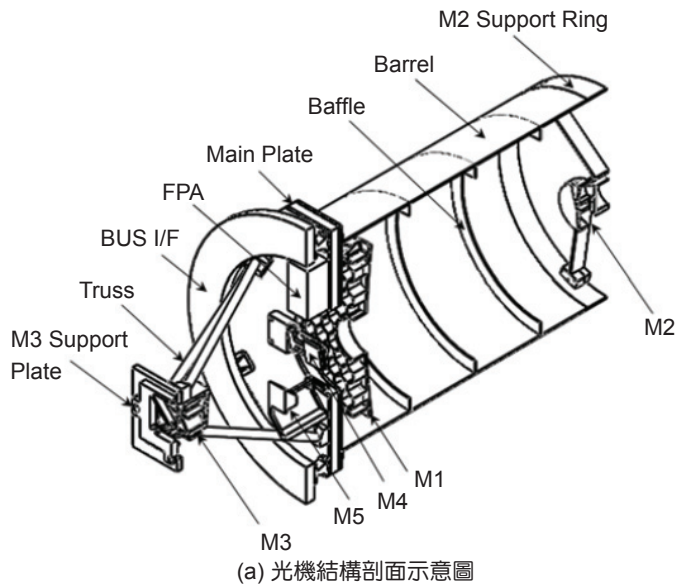


圖 3. 離軸式 Korsch 三反射鏡光機結構。

般機械結構設計，其設計重點除確保結構具備足夠之強度外，更重要是在於保證具有足夠的形狀、位置精度及穩定性。光機結構材質部份，鏡筒、桁架及遮光環，採用高強度輕量化的碳纖維複合材質 (carbon fiber reinforced plastics, CFRP)，主鏡筒碳纖維疊層角度為 Quasi-isotropic [0/+45/-45/90]，主鏡片彈性支撐結構 (bipod flexure) 則採用高強度低熱膨脹的不鏽鋼 SUS316 材質，由於光學鏡片採用金屬鋁鏡，故相關光機結構工程體則採用鋁合金 Al7075-T6 材質，此於整測時環境溫控就顯得相當重要。

在光機結構分析部份，依據離軸式 Korsch 三反射鏡光機結構幾何尺寸，建構三維實體模型，並將建立好之實體模型分割網格化，離散成許多小元素以形成有限元素模型 (如圖 3(b) 所示)，有限元素網格離散化使用 20 個節點、6 個面的三維立體元素作結構分析，每一個節點有三個自由度，分別為 UX、UY、UZ，此六面體元素當某些節點重疊時可退化成四面體或三角體。由於數值分析過程，網格密度或元素大小會影響分析結果精確度，故在網格密度施加部份，於應力梯度較高處增加網格密度，而梯度較緩處則減小網格密度，以增加電腦計算效率及降低硬體記憶需求。為使有限元素模型之元素尺寸得到合理收斂性及正確性，採用典型 H-method 進行收斂性分析，來驗證模擬結果

之正確性，整個光機結構有限元素模型收斂網格約為 311,467 個節點。整個有限元素模型之質量為 139.17 kg，質量中心為 (0, 0.012, 0.134 m)。

3. 光學系統成像是品質評估

影響離軸式 Korsch 三反射鏡光學系統成像是品質及反射鏡片表面變形的因素相當多，主要有外在環境溫度變化、材料內部殘留應力、光學元件支撐及調校等，不當的支撐方式會對鏡片本身的應力分布及鏡片面變形造成很大影響，進而降低成像是品質，包括離焦及各式表面形狀誤差，如球面像差、彗差、像散及環狀三次波等變形非常複雜。這些形狀誤差的分析預測可藉由 Zernike 多項式進行擬合，並透過 MTF 調制轉換函數來預估鏡片成像是的基本性能，此為測試光學系統反差對比度及解析度的評估方法，可反映出光學系統中心到邊緣不同視角的成像是品質。由於光機支撐結構的變形，會對光學鏡片造成相對位移，同時鏡片也將產生表面形變 (surface deformation)；前者在系統整測調校時，可透過調整光學元件間的相對位置來消除剛體位移 (rigid body motion)，但卻很難消除表面形變，尤其是自重變形所造成的像散⁽³⁻⁴⁾。因此，在實際進行光學系統組裝及調校時，應依據光機分析結果，在各項機構地面輔助治具配合下，使影像達成最佳之設計值⁽⁵⁾。

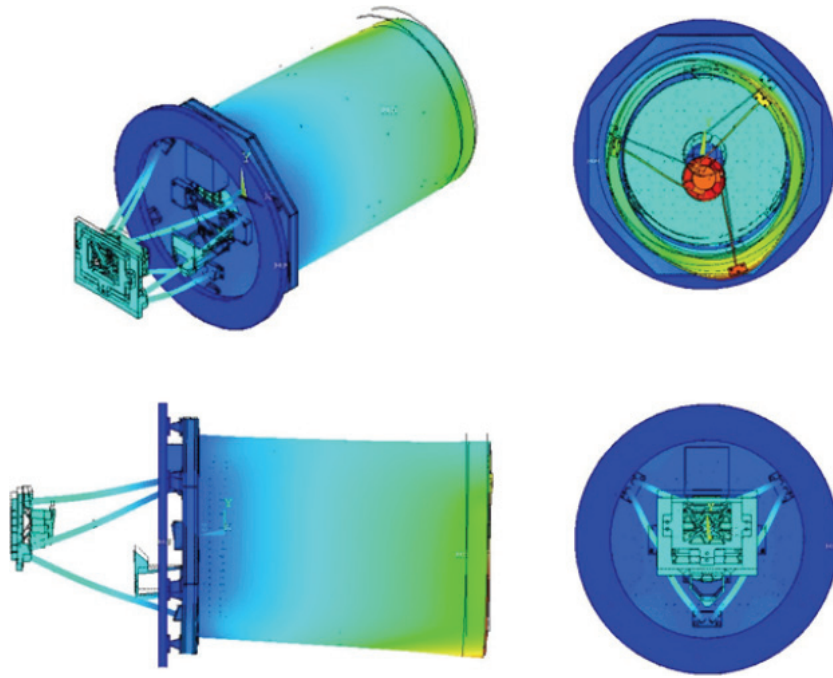


圖 4. 光機結構地表自重變形分布圖。

三、結果與討論

1. 靜態自重變形分析

地表重力對遙測酬載光機結構自重變形的影響不僅是一個工程力學問題，也涉及光機組裝與調校等因素，故本文依據光學設計要求，使用有限元素分析法，計算 Korsch 光機結構固定 BUS I/F 結構背面所有自由度，並在光機結構 Y 軸方向施加重力場，以求取光機結構的自重變形及應力分佈。在光學設計容差要求限制內，整個遙測酬載光機結構的最大自重變形量，不能超過光學組裝調校之容差，且藉由等效應力值判斷結構材料是否有塑性變形或破壞產生。圖 4 所示為 Korsch 光機結構光軸垂直 1 g 重力場時之位移變化情形，由數值計算結果得知，光機結構最大位移發生在次鏡及支撐環處，如光機結構位移分佈圖紅色區域所示，其最大變形值為 $19.70 \mu\text{m}$ 。圖 5 所示為 Korsch 光機結構應力分佈情形，由應力分佈圖中可明顯得知，最大等效應力皆發生在結構桿件頸縮處，其最大等效應力值為 7.54 MPa，遠小於桿件材質之降伏強度 505 MPa。

2. 模態分析

在動態結構分析部份，主要為固定邊界或施加非零位移的負載，計算光機結構的特徵值與特徵向量，即求解遙測酬載光機結構的自然振動頻率與模態振型；得知光機結構之自然頻率，可避免遙測酬載於衛星發射時產生共振現象，進而造成遙測酬載光機結構的破壞；而獲得模態振型，可瞭解共振發生時光機結構之變形狀態。對於高階特徵值系統的

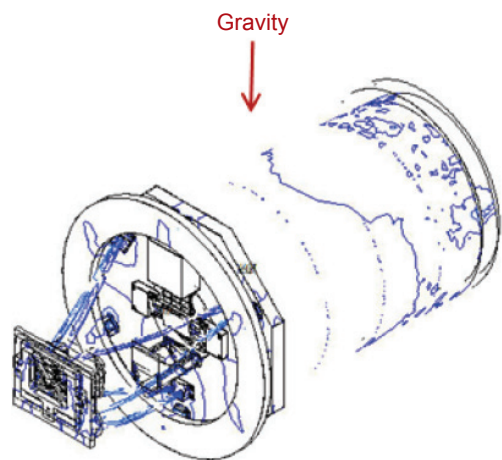


圖 5. 光機結構地表自重應力分布圖。

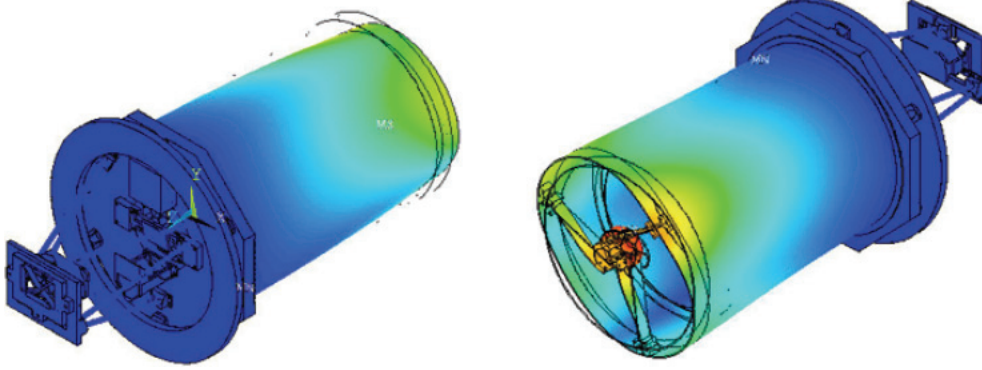


圖 6. 光機結構第一階模態振型。

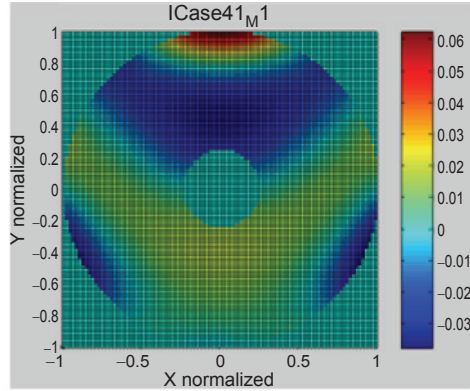
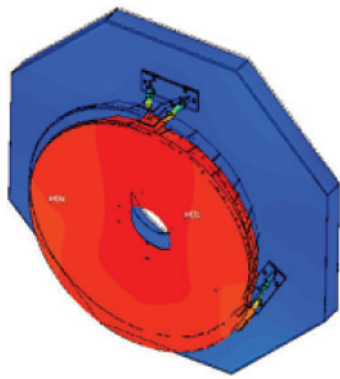
求解，一般只求前幾階較低的振動頻率與振型，因為低階振動對結構的影響最大。故遙測酬載光機結構動態分析採用 Block Lanczos 法，計算剛體模態外的前幾個模態振型，依據剛體運動理論，一般剛體皆有六個自由度，分析時若設定之邊界條件為自由模式 (free model)，則分析結果將會有六個自然頻率接近於零的模態，故分析時為使模擬結果更接近真實狀態，採固定部份 (fixed model) 邊界的分析模式。經分析結果顯示，Korsch 光機結構第一階自然頻率發生在 121 Hz，在整體遙測酬載的光機結構設計上，應避免第一階共振頻率與主結構系統的共振頻率過於接近；而相對應之模態振形則發生在次鏡片及其支撐結構處，呈現局部壓縮模態 (如圖 6 所示)。

3. 波前像差分析

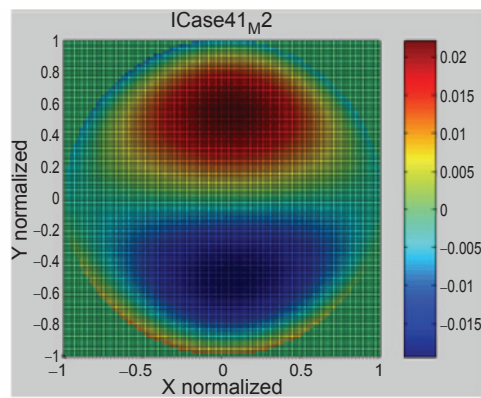
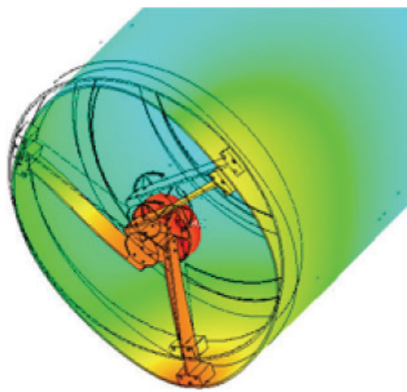
圖 7 所示為 Korsch 光機結構光軸垂直 1 g 重力場時，各反射鏡片自重變形光學表面形貌，而表 1 所示為主要 Zernike 多項式擬合係數及像差大小。從光機分析結果得知，主鏡片光學像差主要為 Coma、Tetrafoil、Pentafoil 等高階像差，Peak to Valley (P-V) 值約為 0.165λ ($\lambda = 0.6328\text{mm}$)、Root Mean Square (R.M.S) 值約為 0.019λ ；次鏡片光學像差主要為 Coma，P-V 值約為 0.041λ ($\lambda = 0.6328\text{mm}$)、R.M.S 值約為 0.007λ ；叁鏡片光學像差主要為 Focus、Astigmatism、Trefoil，P-V 值約為 0.063λ ($\lambda = 0.6328\text{mm}$)、R.M.S 值約為 0.017λ 。各反射鏡片自重變形剛體位移如表 2 所示。

表 1. 各反射鏡片自重變形主要 Zernike 多項式擬合係數。

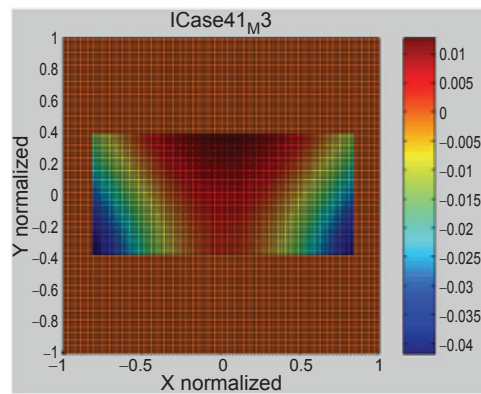
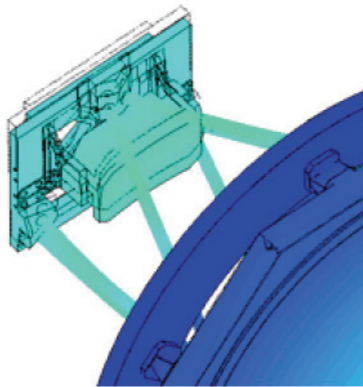
Order Terms	Zernike polynomials	Wave number Radial (n) and Circumferential (m)	Coefficient	Abrration type	P-V (λ)	R.M.S (λ)
Primary mirror (M1)						
8	$(3r^3 - 2r) \sin\theta$	n = 3, m = 1	-0.032	Coma-Y	0.165	0.019
17	$r^4 \cos 4\theta$	n = 4, m = 4	-0.021	Tetrafoil-X		
27	$r^5 \cos 5\theta$	n = 5, m = 5	-0.020	Pentafoil-Y		
Secondary mirror (M2)						
8	$(3r^3 - 2r) \sin\theta$	n = 3, m = 1	0.022	Coma-Y	0.041	0.007
Tertiary mirror (M3)						
4	$2r^2 - 1$	n = 2, m = 0	0.018	Focus	0.063	0.017
12	$(4r^4 - 3r^2) \cos 2\theta$	n = 4, m = -2	0.014	Astigmatism-X		
11	$r^3 \sin 3\theta$	n = 3, m = 3	-0.014	Trefoil-Y		



(a) 主反射鏡片自重變形光學表面形貌



(b) 次反射鏡片自重變形光學表面形貌



(c) 叁反射鏡片自重變形光學表面形貌

圖 7. 各反射鏡片自重變形光學表面形貌。

4. 成像品質分析

圖 8 所示為 Korsch 光機結構光軸垂直重力場之 MTF 變化情形，將主次叁鏡面變形擬合所產生的 Zernike 多項式係數，代入 Code-V 光學軟體中計算，分析光學系統 MTF 原始設計與變形後之差

異。從圖中可觀察出光學系統在軸上時全色態波段視角之 MTF 值變化不大，但隨著視角愈大 MTF 值稍有降低趨勢，各視場角 MTF 值降低百分比約介於 7.4%—11.0% 之間。

表 2. 各反射鏡片自重變形剛體位移。

Rigid body motion	Primary mirror (M1)	Secondary mirror (M2)	Tertiary mirror (M3)
Tx (mm)	6.694e-008	-8.521e-006	-1.954e-007
Ty (mm)	2.855e-005	7.303e-005	1.068e-004
Tz (mm)	-3.542e-005	-4.946e-005	-1.843e-004
Rx (rad.) (-1.472e-004 deg)	-2.569e-006	-1.863e-005	-2.090e-005
Ry (rad.) (3.445e-007 deg)	6.012e-009	-2.174e-006	-7.682e-008
Rz (rad) (4.930e-009 deg)	8.604e-011	-1.756e-009	4.290e-009

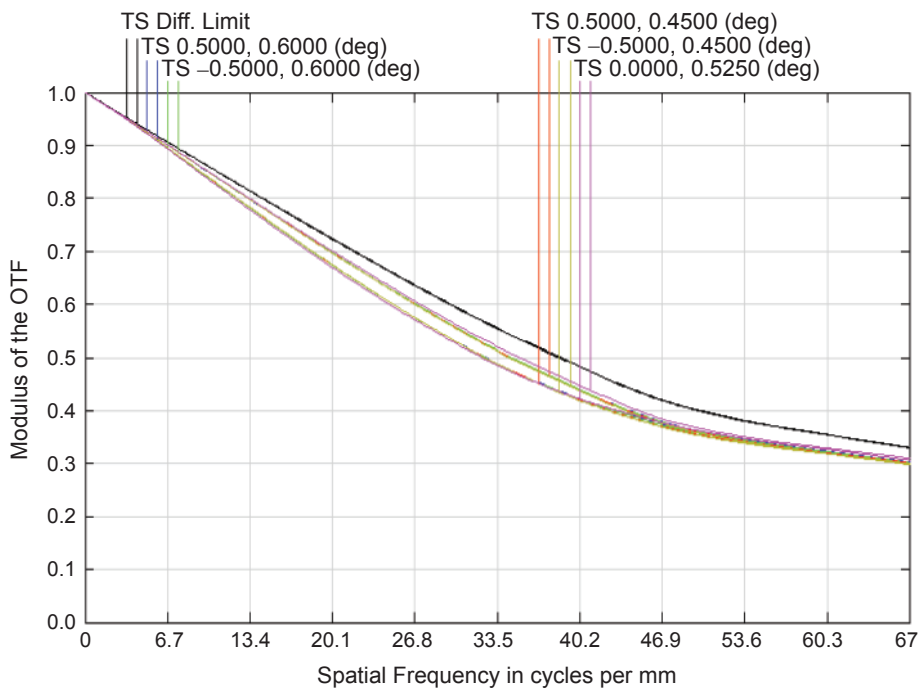


圖 8. 光學系統調制轉換函數變化值。

5. 組裝量測

Korsch 光機結構組裝與整測規劃，主要分成主鏡次系統組裝、次鏡次系統組裝、叁鏡次系統組裝、折鏡次系統組裝、FPA 組裝調校，待各次系統組裝完成後，再進行整體光機結構系統組裝與整測。而整體光機結構系統組裝與整測又可區分成三階段，首要階段為使用三次元量測儀 (coordinate measuring machine, CMM) 進行座標移轉，將主鏡片光學面上座標移轉至標準球上，接著進行主鏡光軸方向距離量測，並調整焦點位置及對稱性；第二階段為使用瞬間干涉儀 (interferometer)，

量測光學系統成像品質，並調整叁鏡及折鏡位置與姿態；最後階段則進行電路模組 FPA 裝置與調整，如圖 9 所示為 Korsch 光學系統量測示意圖，而圖 10 所示為 Korsch 光機結構使用干涉儀組裝量測示意圖。

四、結論與建議

本研究整合光學設計與光機分析技術，進行次世代遙測衛星酬載，離軸式 Korsch 光機結構之靜態強度及動態剛性分析，預估光機結構所承受之自

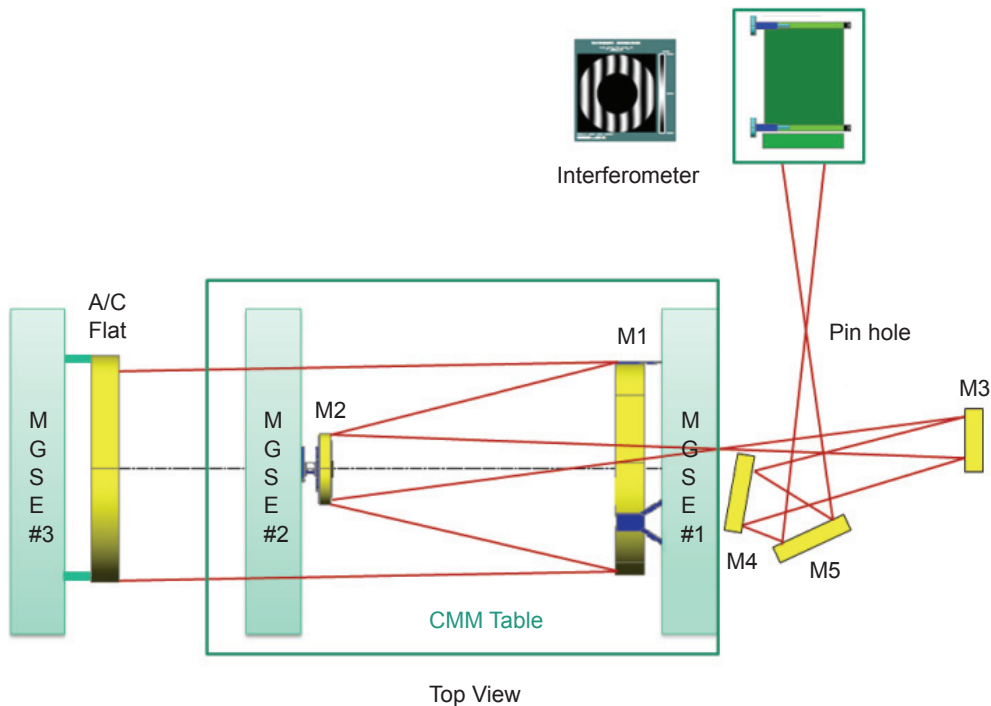


圖 9. Korsch 光學系統量測示意圖。

重變形與應力分布，並求取自然頻率與模態振形，以評估整體光機結構性能，研究過程並探討自重變形導致光學鏡片對成像品質之影響，為後續系統組裝工程綜合分析，使光學系統影像達成最佳設計值，綜合上述整體遙測酬載光機設計分析可得以下結論：

1. 靜態強度分析結果顯示，離軸式 Korsch 光機結構最大自重變形量為 $19.70 \mu\text{m}$ ，發生在次鏡及支撐環處，最大等效應力值約為 7.54 MPa ，遠小於桿件材質 Al7075-T6 之降伏強度 505 MPa 。
2. 動態剛性分析結果顯示，離軸式 Korsch 光機結構第一階自然頻率發生在 121.55 Hz ，在整體遙測酬載光機結構設計上，應避免第一階共振頻率與衛星主結構系統的共振頻率過於接近，其相對應之模態振形則發生在次鏡片及其支撐結構處，呈現局部彎曲模態。
3. 光機模擬分析結果顯示，離軸式 Korsch 光機結構光軸垂直地表重力場時，主鏡片光學像差主要為 Coma、Tetrafoil、Pentafoil 等高階像差，P-V 值約為 0.165λ ($\lambda = 0.632 \text{ mm}$)、R.M.S 值約為 0.019λ ；次鏡片光學像差主要為 Coma，P-V 值約為 0.041λ 、R.M.S 值約為 0.007λ ；叁鏡片

光學像差主要為 Focus、Astigmatism、Trefoil，P-V 值約為 0.063λ 、R.M.S 值約為 0.017λ 。光學系統在軸上時全色態波段視角之 MTF 值變化不大，但隨著視角愈大 MTF 值稍有降低趨勢，各視場角 MTF 值降低百分比約介於 $7.4\% - 11.0\%$ 之間。

4. 光機結構組裝與整測，主要分成主鏡次系統組裝、次鏡次系統組裝、叁鏡次系統組裝、折鏡次系統組裝、FPA 組裝調校，待各次系統組裝完

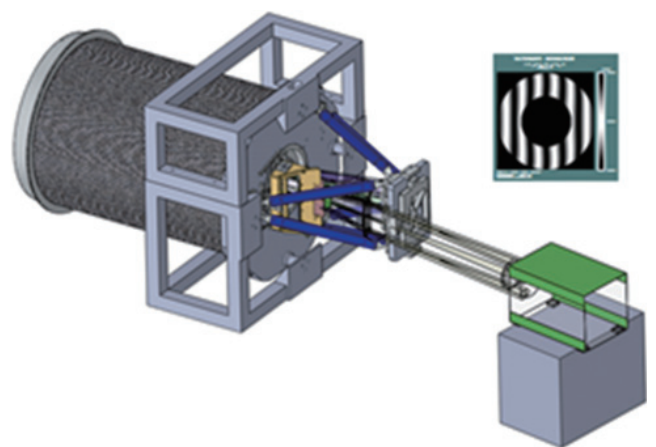


圖 10. Korsch 光機結構組裝量測示意圖。

成後，進行整體光機結構系統組裝與整測，其主要分成三階段，首先使用三次元量測儀進行座標移轉及主次鏡光軸方向距離量測，並調整聚焦點位置及對稱性，第二階段使用干涉儀量測光學系統成像品質，並調整叁鏡及折鏡位置與姿態，最後階段進行電路模組 FPA 裝置與調整。

5. 未來可針對 Korsch 光機結構進行細部優化設計，如主板結構與材質使用輕量化碳纖維蜂巢減重設計、主鏡彈性雙足支撐結構 (bipod flexure) 用料材質分析、使用零熱膨脹玻璃反射鏡片等，讓整體光機結構更接近實際衛星遙測酬載飛行體模組。

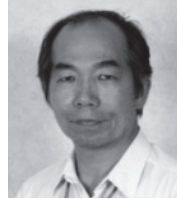
參考文獻

1. R. J. Noll, *Journal of the Optical Society of America*, **66**, 207(1976).
2. K. B. Doyle, V. L. Genberg, and G. J. Michels, Washington: SPIE Press, 50 (2002).
3. Y. C. Lin, S. T. Chang, L. J. Lee and T. M. Huang, *Lecture Notes in Information Technology*, **19**, 53(2012).
4. Y. C. Lin, L. J. Lee, S. T. Chang and T. M. Huang, *Applied Mechanics and Materials*, **378**, 26 (2013).
5. Y. C. Lin, S. T. Chang, et al., *Design and Analysis of a TMA Telescope Structure*, Remote Sensing Satellite Technology Workshop - FORMOSAT-5 User Conference, Hsinchu, Taiwan, TS-01, 2015.



林育全先生為國立台灣大學工程科學與海洋工程博士候選人，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Yu-Chuan Lin is a Ph.D. candidate in the Department of Engineering Science and Ocean Engineering at National Taiwan University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現任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 Catholic University of America. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



連俊傑先生為國立中興大學機械工程碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副工程師。

Roger Lien received his M.S. in mechanical engineering from National Chung Hsing University. He is currently an associate engineer at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Ting-Ming Huang received his Ph.D. in aeronautics and astronautics from National Cheng Kung University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.