

遙測酬載雜光抑制分析與擋光板組裝

The Straylight Suppression and Assembly of Baffle of Remote Sensing Instrument

黃鼎名、何承舫、吳昆寰、黃柏涵

Ting-Ming Huang, Cheng-Fang Ho, Kun-Huan Wu, Po-Han Huang

本文說明福衛五號擋光板設計與雜光分析結果。文中說明光路中各種雜光路徑，及擋光板優化過程，擋光板功能評估，雜光分析方法與結果，及擋光板組裝。

The baffle design and stray light analysis of Remote Sensing Instrument were introduced. Different kinds of stray light were reported. The optimization of baffle shapes and evaluation of baffles were depicted. The assembly of primary baffle was also illustrated.

一、前言

雜光為光學設計路徑之外經光學系統進入感測器的光，因此光線經感測器所得並非正常訊號，故須儘量抑制，抑制程度依系統需求而訂。Robert 廣泛說明雜光的抑制的方法及評價方式，為雜光分析與抑制的重要參考資料⁽¹⁾，參考文獻 2 對雜光路徑有所介紹。

福衛五號遙測酬載(RSI)光學設計為折反射式望遠鏡型態，計有主、次鏡及四片修正透鏡，焦平面尺寸為 $12 \times 8 \text{ mm}$ ，計有五個波段，其安排為藍 (B1)、綠 (B2)，全波段 (PAN)、紅 (B3) 及近紅外 (B4)。全波段的畫素尺寸為 $10 \mu\text{m}$ ，計 12000

畫素，其他多波段 (MS, B1~B4) 畫素尺寸為 $20 \mu\text{m}$ ，每個波段有 6000 畫素。由於福衛五號軌道高度 720 km，全波段地面解像力為 2 m，故瞬間視角 (IFOV) 為 $2.78 \mu\text{rad}$ ，多波段 IFOV 為 $5.56 \mu\text{rad}$ 。依任務需求，圖 1 所示雜光抑制需能使焦平面上的每一個畫素雜光能達到表 1 標準的程度，而此雜光累計來自於 $1000 \times 1000 \text{ PAN IFOV}$ 範圍的光對於 10、20 及 40 畫素外的訊號影響程度。

二、擋光板設計

福衛五號光學設計為折反射式望遠鏡型態，容易出現直接入射雜光，此類雜光由主鏡中央開口

表 1. 雜光抑制規格 (對每一畫素皆適用)。

雜光抑制規格	Requirements			
	間距需求	10PAN_IFOV	20PAN_IFOV	40PAN_IFOV
		$\leq 4.0 \%$	$\leq 2.0 \%$	$\leq 1.0 \%$

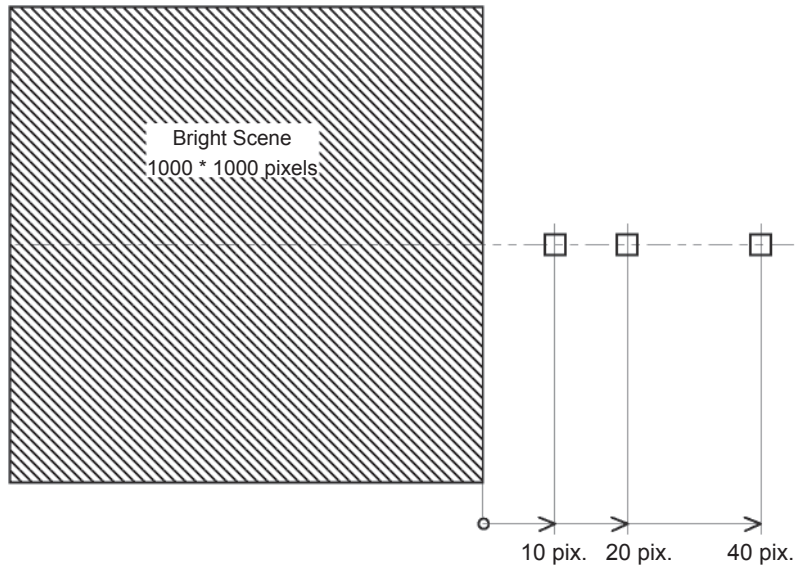


圖 1. 雜光抑制需求圖示。

經修正透鏡直接到達焦平面，因而有必要設計擋光板 (baffle)，此擋光板有以下功用：(1) 阻擋太陽光直射主、次鏡與修正透鏡，(2) 阻擋地面光線直接由主鏡中央開孔入射焦平面，(3) 限制 RSI 觀測地面的視角。其中上述第 (1) 及 (3) 項功用由外罩達成，第 (2) 項功能則有賴主擋光板及次擋光板，分別臨近主鏡及次鏡，其外型由光路及焦平面形狀決定，Song 等人提出一種可初期迅速決定光軸

上擋光板外型的方法⁽³⁾，Arnoux 也提出一種初步決定擋光板尺寸的方法⁽⁴⁾，而在此我們利用電腦輔助設計 (CAD) 軟體決定初版外型，再經由特別軟體 ASAP 可分析此組擋光板是否適用，分析過程中所得主、次擋光板如圖 2 所示，計有 3 個版本。圖 2 左方較大橢圓為次擋光板，第一版較小，第二及三版較大，較小黑色為主擋光板，會有 3 個版本擋光板原因乃是經由實際光路追跡後，仍然發現有

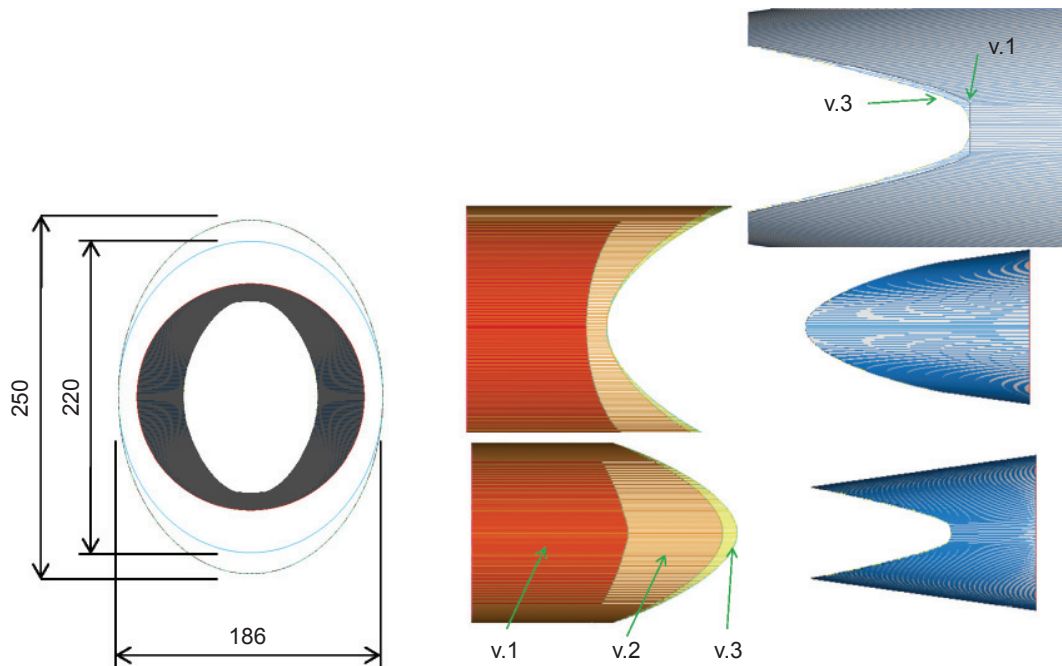


圖 2. 不同版本的擋光板。

部份由主鏡中央開孔入射焦平面的光線所致，如圖 3 所示；圖 3 也可發現遙測酬載的外罩，遙測酬載的座標系統也於圖中標註。為確保雜光可以得到更高程度抑制，於主擋光板內側增加三片擋光葉片 (vane)，其主要目的為阻擋因反射或散射的雜光，其外型及位置如圖 4 所示。

三、擋光板功能評價

點光源穿透率 (point source transmittance, PST) 通常用於評價擋光板的效益，其定義如下

$$PST(\theta) = \frac{\text{Focal plane irradiance}}{\text{Entrance aperture irradiance}(\theta)} \quad (1)$$

分母為不同角度主鏡上的照度，分子為此入射角度在焦平面的照度。PST 計算結果如圖 5，遙測酬載設計角度為 ± 0.95 度，在此角度內留待之後分析，此角度外可見於 3 度之後因不同版本擋光板逐漸上升至某個角度後再下降，但其比例仍在 0.5% 以下，最後一版的擋光板已可將 PST 抑制於萬分之一以下，可見此擋光板可達成任務。

擋光板雖可抑制雜光，但必需付出降低系統 MTF 及入光量的代價，圖 6 為焦平面處的照度分析，若以未安裝擋光板前為基準，可知照度隨著入射角度增大而降低，此乃由於遮擋直接入射雜光或二次反射而增大擋光板遮光面積所致，可以預期在大入射角度時的 MTF 會有比較大的降低。二次反射指在主、次鏡上反射二次而到達焦平面的光 (如圖 7)，此類光線入射角度大於光學設計時的角度，也屬雜光的一種。

遙測酬載 RSI 安裝於衛星頂部，直接面向太陽或外太空，故 RSI 外罩外側使用金色 MLI (multi-layer insulation)，內側使用黑色 MLI，主、次擋光板外側也使用黑色 MLI，其內側則使用黑色漆，此黑漆曾於國外之衛星計畫中使用過。黑色 MLI 與黑漆的雙向散射傳遞函數 (bi-directional scattering distribution function, BSDF) 如圖 8 所示，圖中可發現隨著入射角度增大，BSDF 也增大。由於散射產生的雜光如圖 9 所示。

除圖 3、7、9 雜光之外，也有因抗反射膜 (AR coating) 的反射造成的雜光，此類雜光通常形成鬼影，在遙測酬載中因還有不同波段的帶通濾光片，

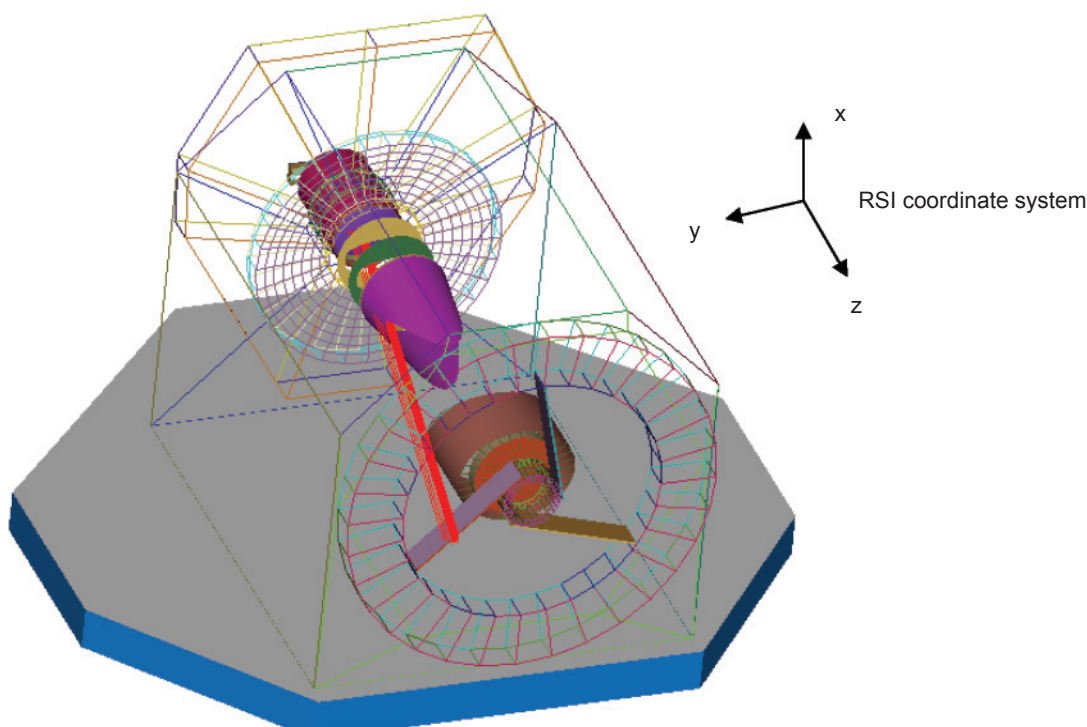


圖 3. 直接入射雜光。

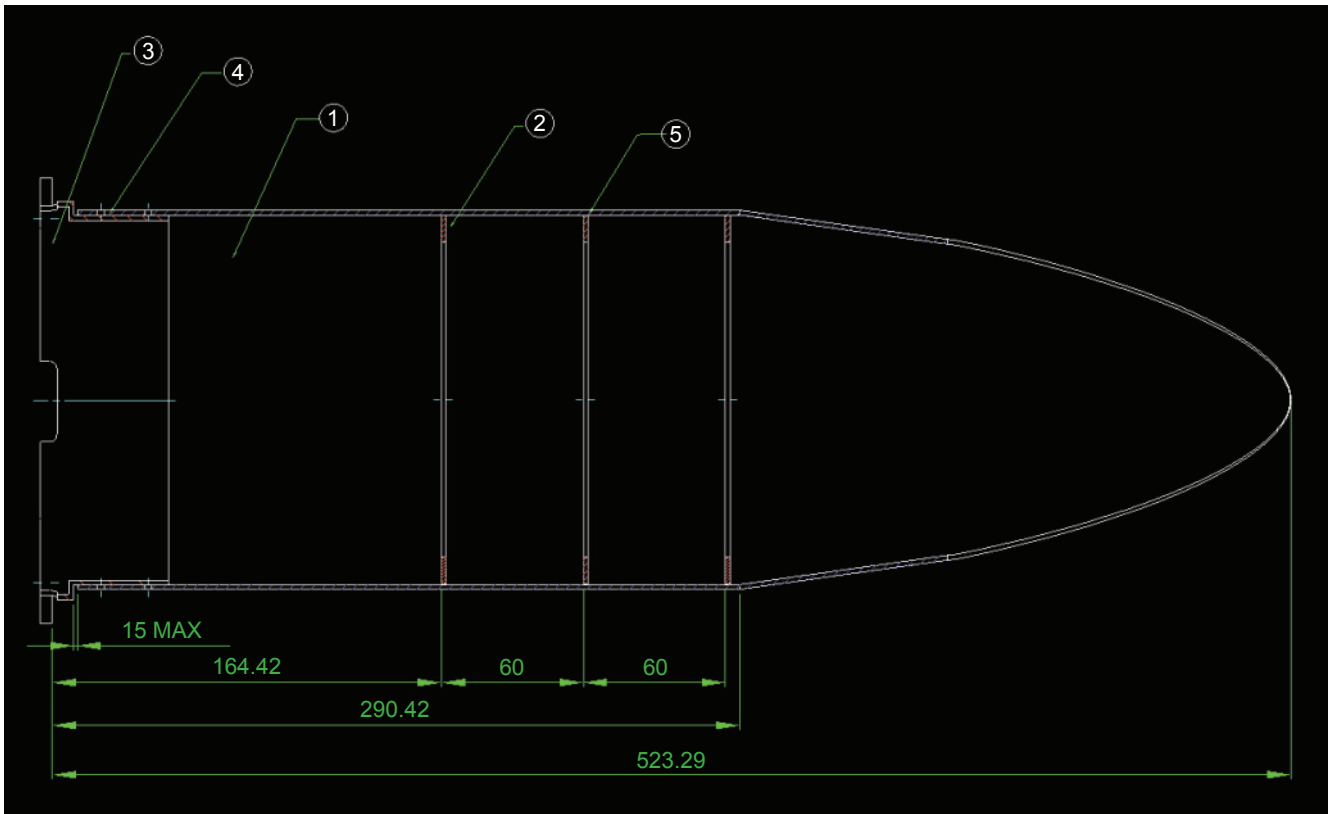


圖 4. 主擋光板組立。

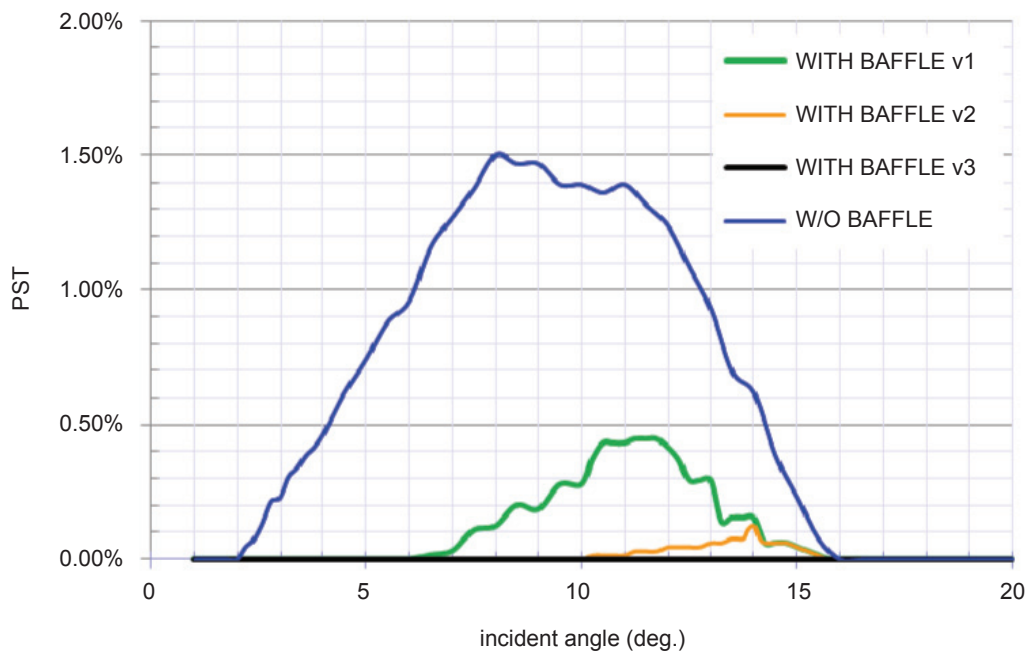


圖 5. PST 分析結果。

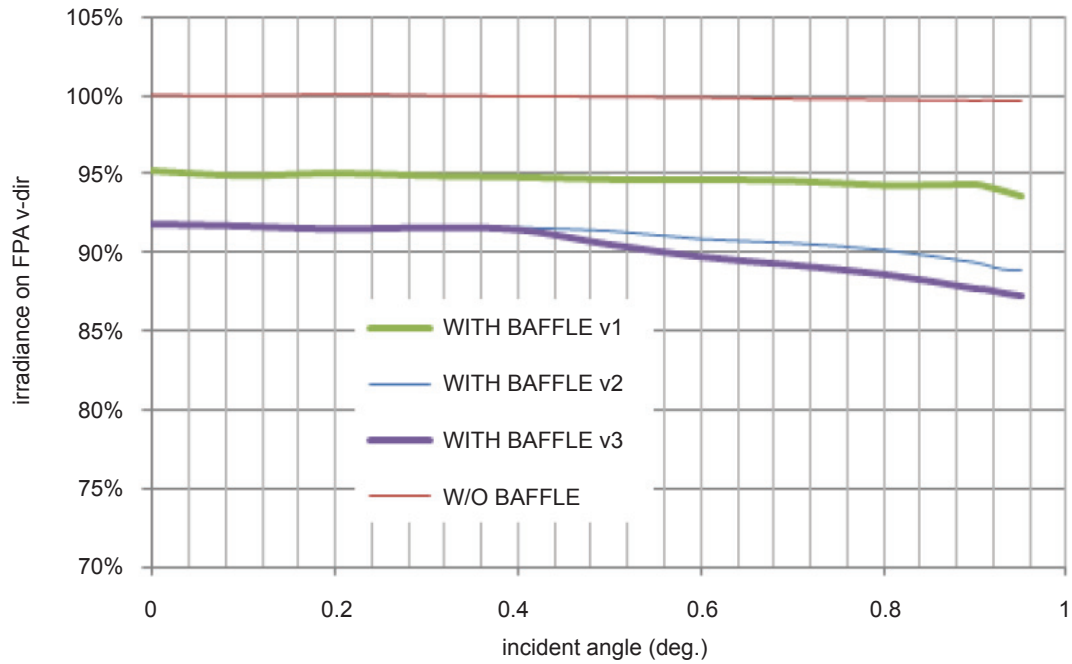


圖 6. 焦平面照度分析。

因抗反射膜產生的雜光也與帶通濾光片上反射一併出現，如圖 10。

四、雜光分析

依據表 1 規格，雜光計算依據下列三個式子計算訊號、雜光及雜光比例。

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) \cdot L(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \cdot R(\lambda) \cdot d\Omega_{\lambda} \cdot d\lambda \quad (2)$$

$$S_{stray} = \int_{350nm}^{1000nm} T(\lambda) \cdot L(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \cdot R(\lambda) \cdot d\Omega_{\lambda} \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$Ratio = \frac{S_{stray}}{S} \quad (4)$$

其中 T 為穿透率， L 分光輝度 (spectro-radiance)， R 為焦平面的響應函數， Ω 為立體角。依據規格，RSI 接受之分光輝度、各波段帶通濾光片穿透率如圖 11，此外焦平面使用之 CMOS 感測器的波段間有電路，此電路亦有反射，此反射於分析時已加入考慮。分析時因焦平面對於 x 軸對稱，故只考慮半邊，分析結果如表 2，可知部份視角高於規格，尤其 B1 及 B3 波段高出特別多，B1 最高雜光比例可

達 7.98%。

為確認雜光比例能否再降低，將 CMOS 感測器各波段感測區間的電路塗黑，假設此塗黑表面之反射率為 5%，其餘設定皆相同情形下，分析所得雜光比例如表 3，可知大部份區域的雜光比例下

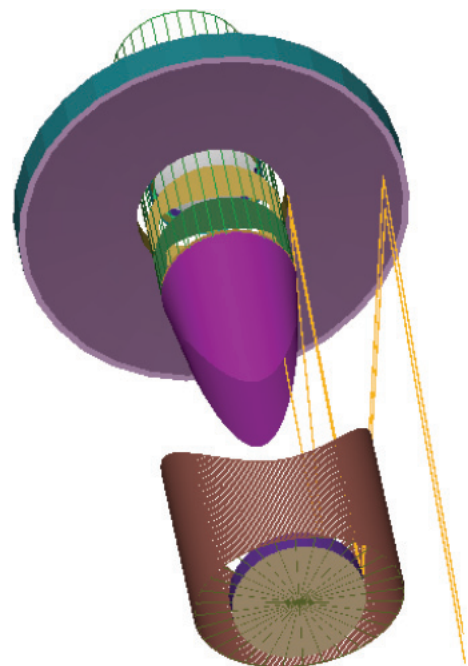
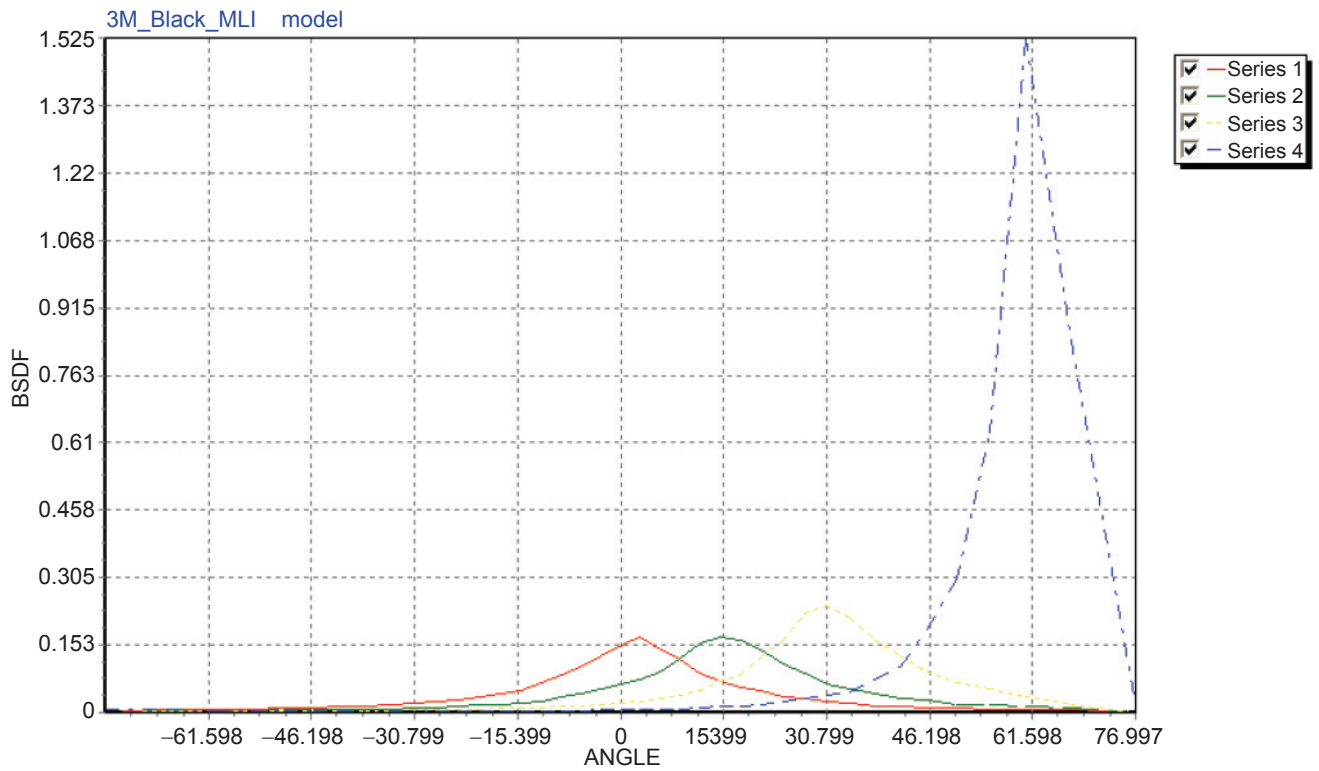
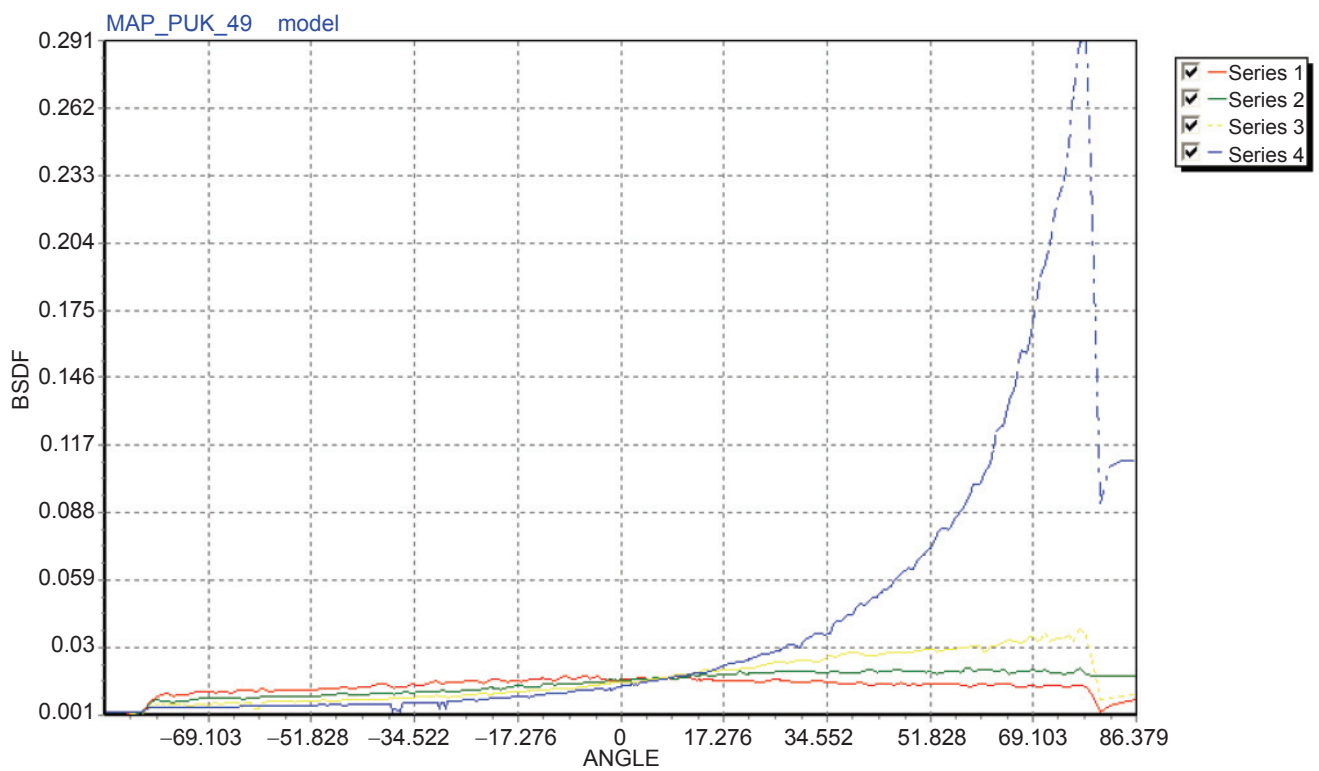


圖 7. 二次反射雜光例子。



Angle: 1 = 2.0 2 = 15.0 3 = 30.0 4 = 60.0
 % TIS: 6.4053 6.2837 6.2496 6.5624



Angle: 1 = 2.0 2 = 15.0 3 = 30.0 4 = 60.0
 % TIS: 4.3246 4.4899 4.6411 5.4167

圖 8. (a) 黑色 MLI 之 BSDF，(b) 黑漆之 BSDF。

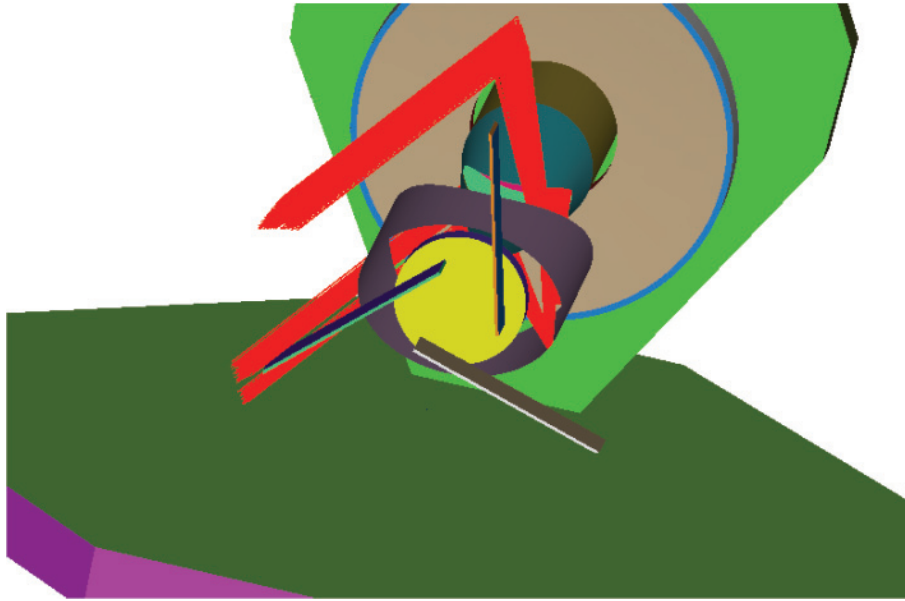


圖 9. 由於散射產生的雜光。

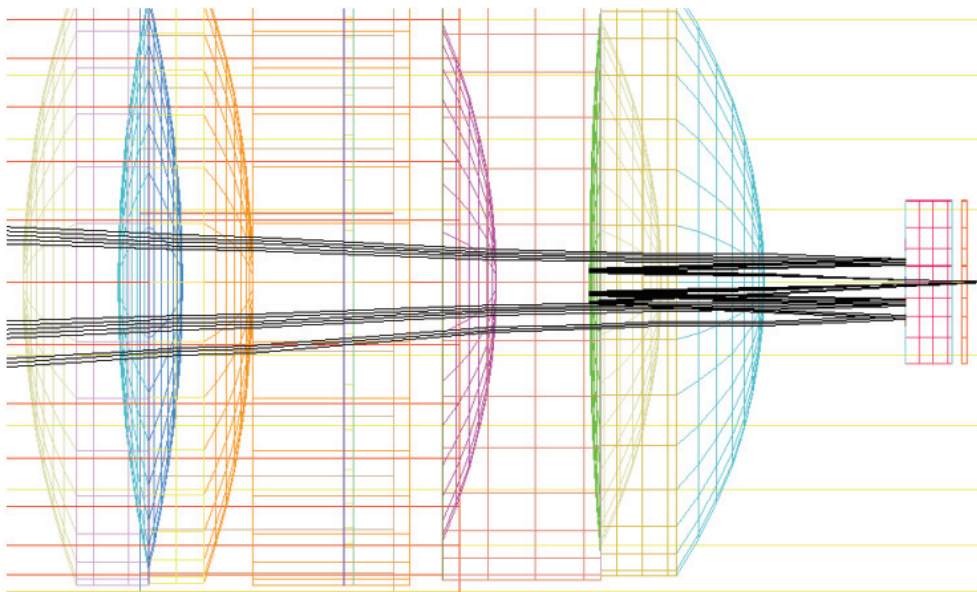


圖 10. 由於 AR coating 及帶通濾光片產生的雜光。

降，尤其高於規格的部份，降幅由 0.2% 至 2%，但仍有部分區域雜光比例高於需求。可知電路區雖以塗黑方式降低反射率，但仍非有效抑制雜光方法。仔細分析表 3 資料，可將不同雜光再細分為因為散射、同波段雜光及異波段雜光，結果詳如表 4 所示，其中 Same λ 表示同波段引起的雜光，而 different λ 表示由此波段範圍外的光引起。例如

對於 B1 而言，其信號波段範圍由 435–515 nm，Same λ 表示此波段範圍內，本來不應入射至此畫素，但因不同原因 (如修正透鏡部份反射、帶通濾光片部份反射等) 而形成的雜光；而 different λ 表示此波段範圍外的光經由不同原因形成雜光。表 4 中 B1 中因為散射的雜光比例總和低於 0.01%，而同波段雜光比例低於 1%，此雜光乃由於帶通濾光

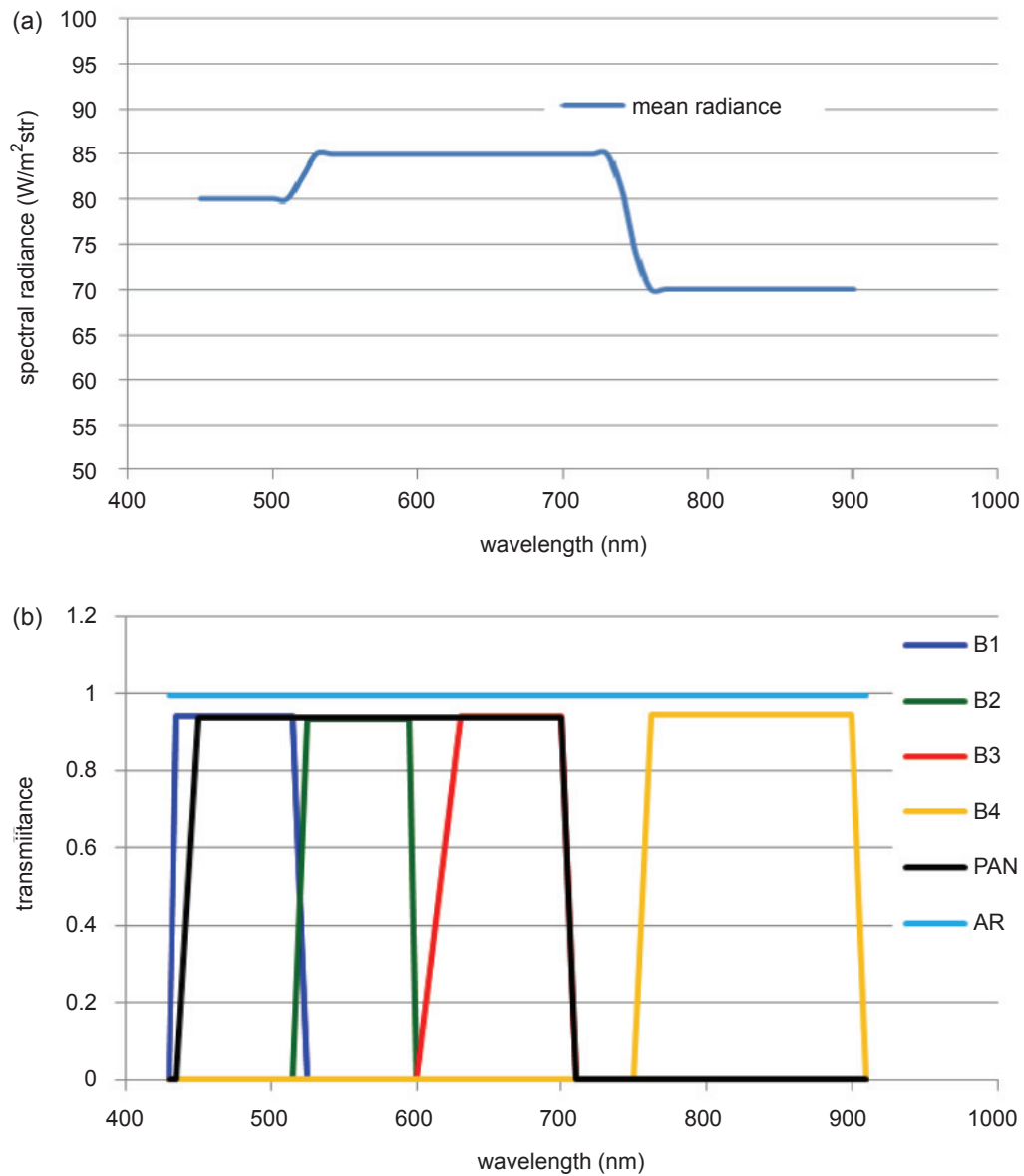


圖 11. (a) RSI 之入射輝光規格、(b) 帶通濾光片穿透率。

表 2. 雜光分析結果 (考慮 CMOS 感測器電路反射率)。

y	0 mm			20 mm			40 mm			60 mm		
	10	20	40	10	20	40	10	20	40	10	20	40
spec	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%
B1	4.87%	1.43%	0.71%	7.98%	2.72%	1.38%	7.41%	4.95%	0.80%	7.81%	7.70%	1.08%
B2	3.20%	1.07%	0.35%	5.42%	2.32%	1.39%	4.97%	3.68%	1.06%	5.25%	4.92%	1.52%
PAN	1.13%	0.45%	0.19%	1.56%	0.74%	0.32%	1.61%	1.19%	0.44%	1.53%	1.46%	0.54%
B3	3.79%	1.24%	0.39%	6.42%	2.73%	1.60%	5.86%	4.27%	1.19%	6.25%	5.86%	1.76%
B4	2.68%	1.16%	0.54%	3.97%	1.91%	1.04%	3.78%	2.64%	0.80%	3.72%	3.58%	0.92%

表 3. 雜光分析結果 (CMOS 感測器電路塗黑表面反射率為 5%)。

y	0 mm			20 mm			40 mm			60 mm		
	10	20	40	10	20	40	10	20	40	10	20	40
spec	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%
B1	4.85%	2.82%	1.52%	7.12%	2.20%	1.19%	6.56%	4.28%	0.44%	6.93%	6.89%	0.50%
B2	2.45%	0.70%	0.32%	4.18%	1.61%	1.16%	3.49%	2.52%	0.47%	3.77%	3.51%	0.61%
PAN	0.63%	0.27%	0.17%	0.92%	0.38%	0.22%	0.88%	0.65%	0.19%	0.79%	0.77%	0.15%
B3	2.78%	0.76%	0.36%	4.78%	1.82%	1.33%	3.92%	2.80%	0.48%	4.28%	4.02%	0.65%
B4	2.04%	0.94%	0.52%	2.95%	1.38%	0.99%	2.53%	1.75%	0.47%	2.44%	2.41%	0.34%

表 4. 雜光貢獻比分析。

B1	y = 20 mm				y = 60 mm			
		Same λ	different λ	sum		Same λ	different λ	sum
Same AOI, differene λ	< 0.01%				< 0.01%			
10xIFOV		0.87%	6.26%	7.12%		0.46%	6.48%	6.93%
20xIFOV		0.71%	1.49%	2.20%		0.43%	6.46%	6.89%
40xIFOV		0.58%	0.61%	1.19%		0.23%	0.27%	0.50%
B3	y = 20 mm				y = 60 mm			
		Same λ	different λ	sum		Same λ	different λ	sum
Same AOI, differene λ	< 0.01%				< 0.01%			
10xIFOV		1.08%	3.70%	4.78%		0.78%	3.49%	4.28%
20xIFOV		0.94%	0.88%	1.82%		0.53%	3.49%	4.02%
40xIFOV		0.82%	0.52%	1.33%		0.34%	0.31%	0.65%

表 5. 雜光分析結果 (CMOS 感測器電路塗黑表面反射率為 5%，帶通濾光片穿透率 98%)。

y position	0 mm			20 mm			40 mm			60 mm		
	10	20	40	10	20	40	10	20	40	10	20	40
spec	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%	4%	2%	1%
B1	0.71%	2.82%	1.52%	0.40%	2.82%	1.52%	0.33%	2.82%	1.52%	0.25%	2.82%	1.52%
B2	0.29%	0.21%	0.18%	0.26%	0.16%	0.12%	0.22%	0.13%	0.06%	0.22%	0.13%	0.06%
PAN	0.27%	0.12%	0.09%	0.60%	0.14%	0.08%	0.56%	0.39%	0.06%	0.58%	0.51%	0.06%
B3	0.33%	0.24%	0.21%	0.23%	0.12%	0.08%	0.22%	0.13%	0.06%	0.45%	0.19%	0.07%
B4	0.43%	0.33%	0.29%	0.30%	0.20%	0.16%	0.28%	0.21%	0.13%	0.20%	0.17%	0.07%

片穿透率約為 93% 而有部份反射，如圖 10。表 4 中佔較高比例者為不同波段的雜光，若能有效降低此部份雜光則較有機會達到規格。

表 2 及表 3 中帶通濾光片各波段穿透率如圖 11(b) 所示，其穿透率約為 93%，若提高穿透率為 98%，分析所得如表 5，可知除少部分區域外已可符合需求。

五、擋光板組裝

擋光板元件製作完成後，先於內部塗佈黑漆，經進行膠合與尺寸量測確認，最後依組裝流程組裝於遙測酬載內，圖 12 為擋光板組裝過程，圖 13 為遙測酬載安裝遮光外罩之後情形。

六、結論

依據任務需要，已完成擋光板設計及雜光分析，依目前完成件的規格計算，雜光仍有部份超出系同需求範圍，若能提高濾光片穿透率則可符合規格。完成之擋光板也依組裝程序安裝於遙測酬載中。

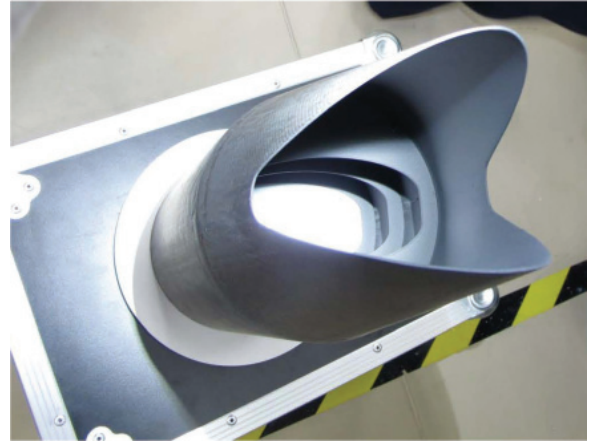


圖 12. 主擋光板安裝情形 (內部已噴黑漆，外部尚未安裝黑色 MLI)。

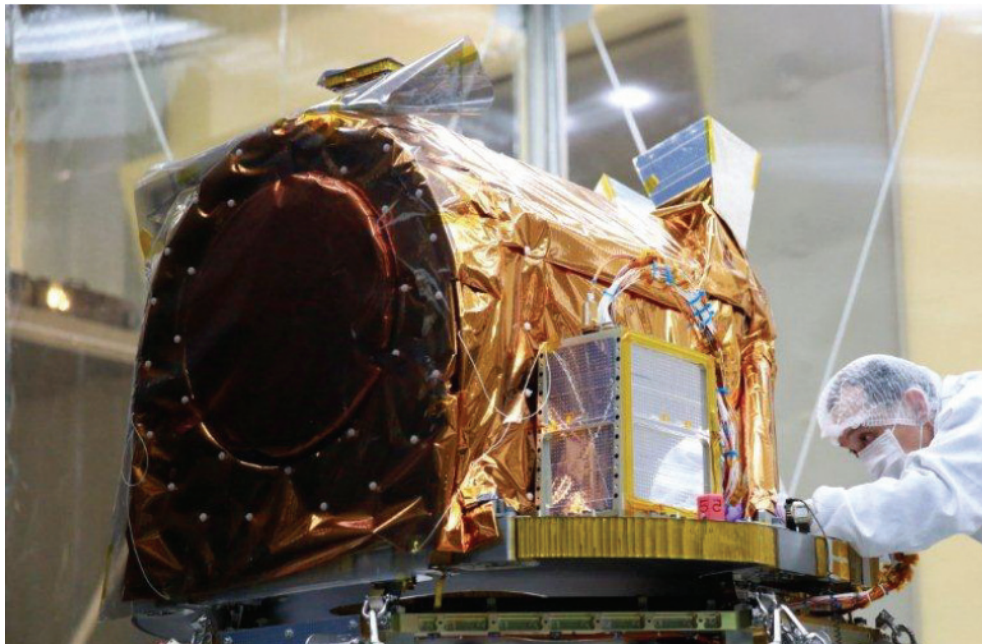


圖 13. 遙測酬載安裝遮光外罩之後情形。

參考文獻

1. Robert, R. P., [Control of Stray Light], ch. 38 in Handbook of Optics, Vol. 1, 2nd ed., McGraw Hill, New York, USA (1995)。
2. 雜光分析與抑制, 5.4 節, 光機電系統整合概論, 儀器科技研究中心 (2005)。
3. Song, N., Yin, Z., and Hu, F., *Opt. Eng.*, **41** (9), 2353(2002).
4. Arnoux, J.-J. P., *SPIE*, **2864**, 333(1996).



黃鼎名先生為國立成功大學航太博士，現為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 engineering from National Cheng-Kung University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, NARLabs.



吳昆寰女士為國立高雄應用科技大學
模具工程研究所碩士，現為國家實驗
研究院儀器科技研究中心助理研究
員。

Kun-Huan Wu received her M.S. in
Department of Mold and Die Engineering from National
Kaohsiung University of Applied Sciences. She is
currently an assistant researcher at Instrument Technology
Research Center, NARLabs.



何承舫先生為國立成功大學物理碩
士。現為國家實驗研究院儀器科技研
究中心副研究員。

Cheng-Fang Ho received his M.S. in
physics from National Cheng Kung
University. He is currently an associate researcher at
Instrument Technology Research Center, NARLabs.



黃柏涵先生為國立彰化師範大學機電
工程研究所碩士，現為美商陸得斯科
技股份有限公司半導體工程師。

PoHan Huang received his M.S. in
electro-mechanical engineering from
National Changhua University of Education. He is currently
a semiconductor engineer at Rudolph Technologies, inc.