

光學系統中的雜散光與抑制

Stray Light Analysis and Suppression in Optical System

何承舫、黃鼎名、張勝聰

Cheng-Fang Ho, Ting-Ming Huang, Senq-Tsong Chang

雜散光為光學系統中不需要或是額外衍生出來的光線，雜散光的出現會降低對比、影像品質，嚴重者會導致系統或是任務失敗，因此抑制雜散光是相當重要的課題。雖然無法完全使雜散光消失，但是適當的光機設計 (opto-mechanical design) 將可以有效的抑制雜散光在合理的程度內。本文將討論雜散光的成因、雜散光抑制的基本概念、雜散光分析的方法以及在實務上的應用。

Stray light are the unwanted light in optical system, it will reduce contrast or image quality. Sometimes, it will cause the mission fails. The stray light in optical system is always being there, but we can control the stray light in a reasonable order by a suitable opto-mechanical design. This article presents some basic concepts of stray light, the analysis of stray light suppression, and an analysis result of real case.

一、雜散光

雜散光，簡而言之，就是光學系統不需要或是額外衍生出來的光線。雜散光會降低影像品質，它會遮蔽住系統中微弱的訊號，降低訊雜比 (SNR) 與對比度 (contrast) 等。對於不同的系統，雜散光造成的影響也不同，在光輻射度及光度量測系統則它會造成量測上的誤差，在高功率的雷射系統中也有可能導致光學元件或是感測器的毀損。一般引發雜散光的因素眾多，經驗上大致可分類為 (1) 光源直射 (straight-shots)；(2) 穿透式光學元件的鬼影反射 (ghost reflection)；(3) 光學表面及機械表面的

散射，即散射雜散光 (scatter stray light)；(4) 其他，如光圈 (stop) 及擋光板 (baffles) 的邊緣繞射 (edge diffraction)、光柵所產生出的多餘光線 (unwanted diffraction orders)，甚至於紅外線系統中機構與光學元件的溫度輻射效應 (thermal emission effect) 也會形成雜散光。以下為前三種常見的類型。

1. 光源直射

在反射式或是折反射式望遠系統中，視角外的光線按照設計的光路徑，即不經過主反射鏡與次反射鏡反射，直接入射於焦平面，對正常影像造成干擾。參考圖 1。

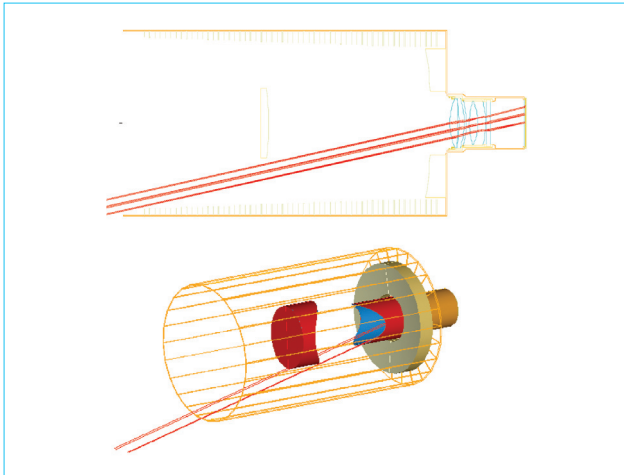


圖 1. 折反射式望鏡系統中的光源直射。

2. 鬼影

鬼影 (ghost image) 是由強光源產生的離焦 (out-of-focus) 或是如鬼魅般的成像。因為光學表面並非具有 100% 穿透率，所以當光線與光學表面作用時，會有部分穿透、部分反射的情況發生，產生額外的子光線。同樣地，這些經由部分穿透、部分反射所產生的子光線也會衍生出其他額外的光線。主光線及子光線等光源在光學系統內經過各個鏡片多重的反射、折射後成像於焦平面 (底片或是 CCD 感測器) 上的能量分布，便是鬼影。光學系統的光學結構會影響鬼影呈現離焦發散或是聚焦收斂的狀態，發散型分布通常會降低影像對比度，而聚焦狀的能量分布則會形成重疊的影像或是明顯的光點，一般以光圈疊影 (可參考圖 2(a))，以及弧狀鬼影最

為常見。而形成鬼影的光線在各光學表面間的反射次數必為偶數，如二次反射鬼影、四次反射鬼影等。另外，當有強光源入射時，透鏡鏡面、鏡筒 (barrel) 以及擋光板 (baffles) 上的散射光線，也有形成鬼影的可能。

3. 散射雜光

由入射光源照射在光學表面或是機械結構表面上的散射光束所引起的雜散光。此類的雜散光略分為單次散射雜光 (single scatter stray light) 與多次散射雜光 (multiple scatter stray light)。當光源入射於光學系統內時，部分的散射光會直接的或是經由折射而抵達焦平面上，這些散射於系統視角內的雜散光即稱為單次散射雜光。而多次散射雜光則是經過多次表面間的散射所產生。一般而言，多次散射雜光的強度遠小於單次散射雜光，在一般的成像系統可能影響不大，但是對於某些光訊號微弱、需要高訊雜比的高靈敏系統，多次散射雜光的效應就不能忽略。雜散光使得影像對比度降低的例子可參考圖 2(b)。

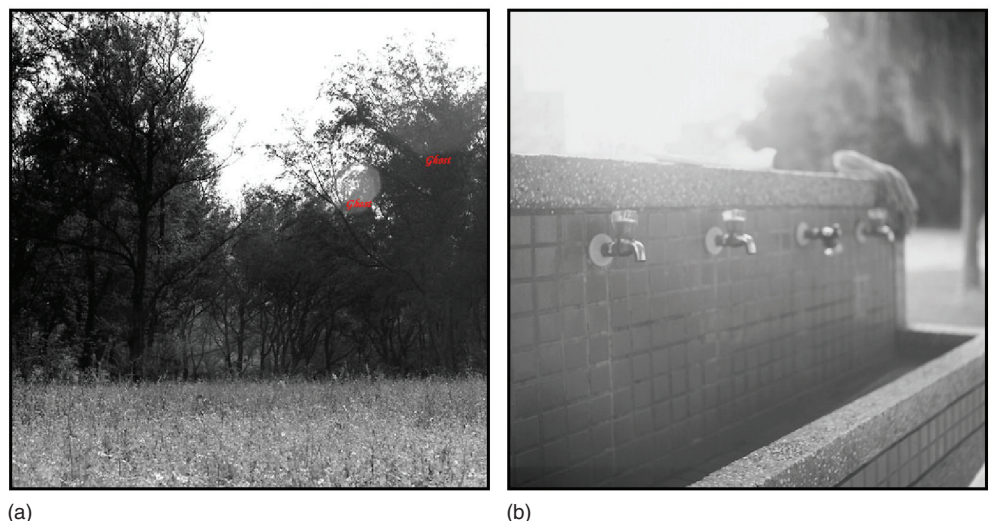
二、雜散光抑制與分析

1. 雜散光抑制

雜散光會降低系統的成像品質，因此雜散光抑制 (stray light suppression) 在光學設計上顯得相當重要。要完全的抑制系統之內的雜散光，使其完全的消失殆盡是不可能的。所以，一般是將雜散光抑制

圖 2.

(a) 圖為鬼影 (圖中紅色字部分)，(b) 圖則是雜散光導致影像對比度的降低。



在一個可容忍的範圍之內即可。雜散光可視為一種光學雜訊 (optical noise)，如同電子雜訊 (electric noise) 是可以事先在設計上設法尋求解決的，適當的光機設計將可以有效的抑制雜散光的產生。若是從訊號能量的觀點來看，感測器 (Φ_c) 接收到的能量不外乎會受到以下因素的影響：

- (1) 光源的能量 Φ_s
- (2) 表面散射光源的能量 BSDF_s ，這個跟材質表面的散射特性 (bidirectional scatter distribution function, BSDF) 相關。
- (3) 感測器與光源間的光機幾何結構，這稱之為幾何因子 (geometrical configuration factor, GCF)

可以得到 $\Phi_c = \Phi_s \times \text{BSDF}_s \times \text{GCF} \times \pi$ ，其中 Φ_s 為待觀察訊號的能量。對於一個完美的系統，理論上感測器接收的能量會與光源能量相同 ($\Phi_c = \Phi_s$)，而當系統有雜散光發生時，感測器便會接收到額外的能量，此時 $\Phi_c > \Phi_s$ ，所以如果要降低雜散光落在感測器上比例，可以從幾何因子與 BRDF 上來尋求解決。通常適當的光圈闌 (aperture stop) 位置、增加擋光板與擋光舵板 (vanes) 以及黑化機構表面可以有效的抑制雜散光的發生。

- (1) 光圈在光學系統中控制著系統的入光量，對於雜散光抑制，光圈位置則限制著感測器的視角，阻擋視角外可視的物件，避免其形成雜散光來源。同樣的，放置在系統中間成像 (intermediate image) 上的視場光闌 (field stop) 與焦平面前的立奧光闌 (lyot stop) 也是利用開口大小與位置來限制光線，並阻隔視角外反射與散射光線對於感測器的干擾。
- (2) 擋光板與擋光舵板是常被使用來抑制雜散光的結構，擋光板通常為圓錐狀、筒狀的結構，用於直接阻隔光源直射於系統內，擋光舵板則是擋光板上之次結構，有防止結構表面散射雜光的作用。設計良好的擋光舵板甚至可以在離軸視角時將雜散光訊號抑制 4 到 5 個數量級。
- (3) 將機構表面黑化，形成黑化表面 (black surface)，或是利用加工，在表面形成可造成光線多重反射的均勻微結構，則是改變機構表面之散射分布特性來達到雜散光抑制的效果。

2. 雜散光分析

雜散光分析則是在探討雜散光對於系統成像品質及對比度等的影響，並且追蹤出具有影響力的關鍵雜散光路徑，設法加以阻擋或是抑制。另分析時，必須考慮各個與系統相關的參數，如系統的光學設計、光機設計、光源的強度、各個表面的反射、折射及散射分布特性等，藉由雜散光在焦平面上的分布了解雜散光與光機系統間的相互關係，進而找出導致雜散光的關鍵成因，並作為光機系統設計改進的依據。

以運用電腦程式計算來進行雜散光分析是目前最常使用的方式，例如光影追蹤 (ray tracing) 與熱輻射演算法 (radiosity) 是現今最通用的雜散光分析方式。光線覓跡法是模擬光線在光學系統中的傳播，而熱輻射演算法則是採用了有限元素法 (finite-element radiometry) 的概念來表達能量在光學系統中的轉移。熱輻射演算法雖然在模擬視角外的雜散光源有較高的效率，但有不具顯示幾何模型與視覺化表達光束傳播等缺點。光線覓跡法則可處理一般大部分的系統，也較適用於模擬視角內的雜散光源，而直接以及圖像化的表達光線的傳播則有助於使用者發現雜散光的問題及其來源。

雜散光分析方式可分為定性與定量兩類。(1) 定性分析：將給定出容易發生直接散射雜散光的光學元件或機構元件等物件，方法是利用光束追蹤，分別在像空間以及物空間定義出對應的關鍵物件 (critical objects) 與被照明物件 (illuminated objects)，其中關鍵物件為感知器可直視的物件，被照明物件則是由光源入射方向為出發點，被光源直射的物件。在歸納兩者之交集後，便可尋找出容易產生直接散射雜散光的物件與表面。(2) 定量分析：則是用 PST (point source transmittance) 量化此成像儀的雜散光特性。簡單來說，PST 是在討論光源進入系統時之能量以及最後落於焦平面上之雜散光能量這兩者間的轉換。PST 可表示為：

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

PST 的目的並非是要刻意的去定義出何者為導致雜

散光的光源，重要的是，它可將整個光機系統的雜散光資訊彙整成一個單一的數據，以利於系統間的相互比較。

三、應用實例

以下將以國家實驗研究院儀器科技研究中心(以下簡稱儀科中心)使用於遙測取像之折反射式望遠鏡系統為例，介紹雜散光分析與抑制設計在實際光學系統上的應用。

1. 折反射式望遠系統

此系統為儀科中心 93 年度之光電遙測系統研製計畫，其有效焦長 (effective focal length) 為 1400 mm，入光瞳直徑 (entrance pupil diameter) 為 280 mm，即 $F/\# = 5$ ，修正透鏡組由 4 片石英玻璃鏡片組成，設計成像半高為 41 mm (半視角為 1.7 度)，並使用線型 CCD 感測器，如圖 3 所示。而用於抑制雜散光的遮光系統包含遮光系統可分類為外鏡筒 (outer baffle 或是 sun-shield)、位於主反射鏡中央缺孔的主擋光板 (primary baffle)、環繞於次反射鏡週邊的次擋光板 (secondary baffle)，及位於各遮光元件與機構上的擋光舵板等。外鏡筒可提供主、次反射鏡適當的屏蔽，以排除光源直射。主擋光板與次擋光板則可阻隔由主反射鏡中央缺孔直接入射至修正鏡組的視角外光線，如圖 4 所示。主、次擋光板是以傳統的幾何描繪並且電腦輔助設計，並利用光束覓跡扣除法來決定擋光板的外觀與尺寸。雜散光

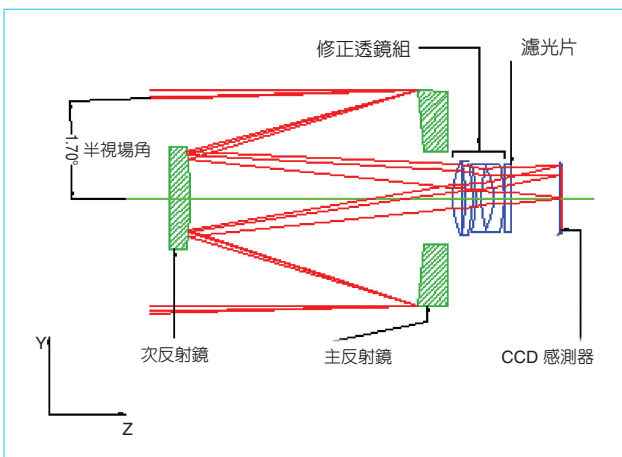


圖 3. 儀科中心研製之折反射式望遠鏡系統。

分析中包含內擋光板的效能進行評估，以及整體光機系統之雜散光能量比例。

擋光板的位置、形狀尺寸、開口大小與光學設計及感測器有關，擋光板在設計上除了考慮必須阻隔光源直射之外，也必須維持成像光路的完整性，並且要能確定其中央遮蔽率要足夠大，以避免次擋光板之邊緣在焦平面成像。做法上可以先行利用軸上入射光束的初階計算，估算出擋光板需要的預留長度，並當成初始設計值。接著再根據光學系統的視角與感測器規格，配合特徵光線的光束追蹤。將擋光板上阻擋成像路徑的過長部分逐步去除。軸上幾何估算可參考下列式 (2) 至式 (5)：

$$L_{sb} = L_d + (k - 1) \cdot f_{(1)} \quad (2)$$

$$D_{sb} = k \cdot D \quad (3)$$

$$L_{pb} = \frac{L_d \cdot L_b - f_{(1)} \cdot L_b + L_d \cdot k \cdot f_{(1)} + L_b \cdot k \cdot f_{(1)}}{f_{(1)} - L_d + L_b \cdot k + L_d \cdot k} \quad (4)$$

$$D_{pb} = \frac{k \cdot D \cdot (L_b + f_{(1)}) \cdot (f_{(1)} - L_d)}{f_{(1)} \cdot f_{(1)} - L_d + k \cdot L_d + L_b \cdot k} \quad (5)$$

其中， D 為望遠鏡組之入射瞳 (entrance pupil) 半徑， k 為中央遮蔽率， $f_{(1)}$ 為主反射鏡之焦距長， L_{sb} 為次擋光板長度， D_{sb} 為次擋光板半徑， L_{pb} 為主擋光板長度， D_{pb} 為主擋光板半徑。 $f_{(1)}$ 為主反射鏡焦距， L_d 為主反射鏡與次反射鏡之距離， L_b 為主反射鏡至系統焦點的距離。圖 5 為特徵光線進行光束追蹤之示意圖，圖 6 擋光板的開口曲線以及其三維結構示意圖 (請參考圖 6)。

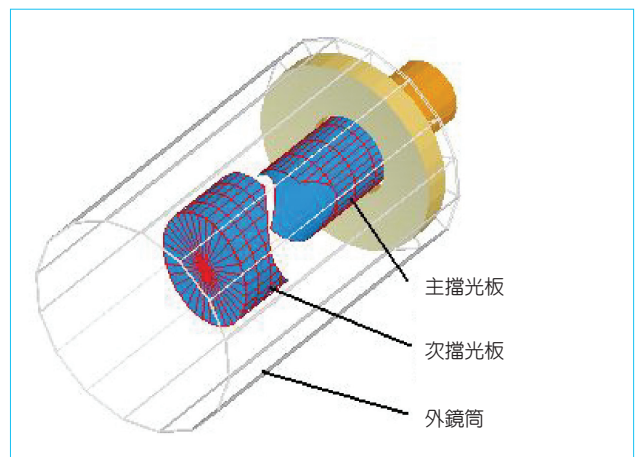


圖 4. 遮光系統示意圖。

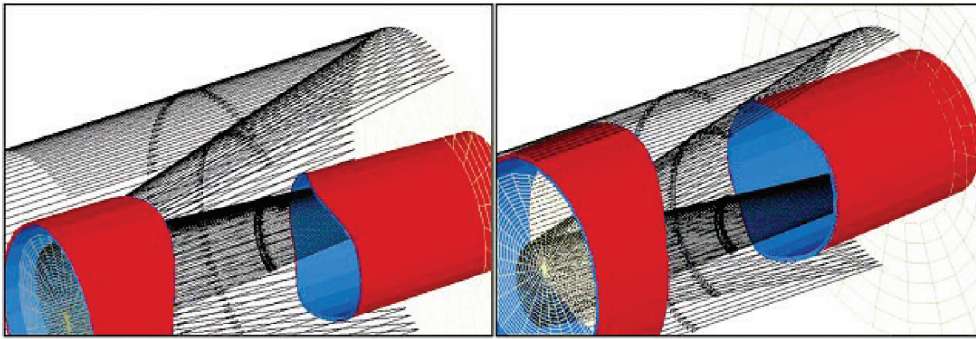


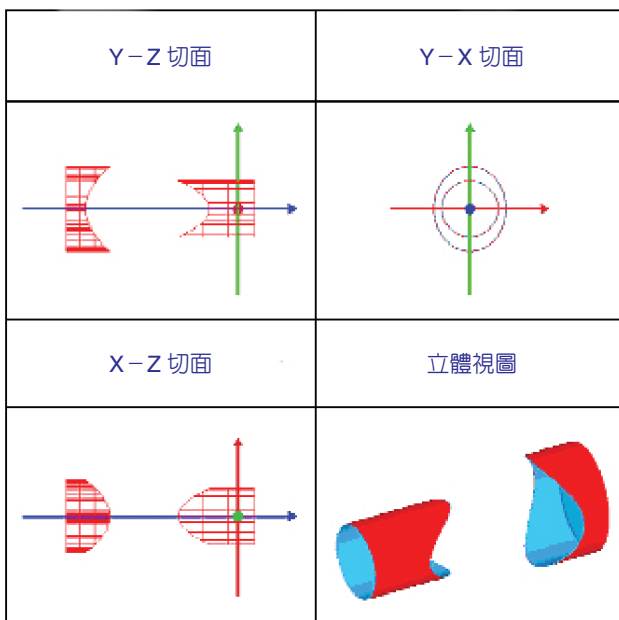
圖 5. 特徵光線的光路追蹤。

2. 擋光板效能與雜散光分析

這將會驗證擋光板的作用，並且分析此系統的雜散光。藉由 PST 曲線可以清楚的比較裝置擋光板前後的雜散光比例差異，與內部擋光板阻擋直射光源的功用，參考圖 7。紅色曲線為先前未增加內部擋光板時所獲得的雜散光比例，比較之下，很明顯的，在原本會有光源直射現象的角度區間內，雜散光的比例可獲得有效的抑制，由原先的 1.8% 被抑制至 $5.19E-3\%$ (以 10 度入射時的峰值為例)，因此內擋光板可如預期的阻擋直射光源進入望遠鏡組之後端組件。表 1 為光源直射區間內，其他角度在增加內擋光板前後的雜散光比例。

雖然說在增加內擋光板之後可以有效的解決光源在 6—18 度間入射時的直射問題，但對於 4—5 度區間入射的光線而言，內擋光板反而是誘發雜散光的關鍵機構，在這個區間入射的部分光線會由主反射鏡將光線反射至次反射鏡，在由次反射鏡反射至主擋光板之上，最後經由主擋光板的反射以及散射將光線引導至焦平面之上，形成雜散光線，其光路徑可見圖 8(a)。另外，於 15 度左右的雜散光能量主要是來自於部分的入射光線直射於修正鏡組與焦平面間的鏡筒機構之上而產生的反射，其光路徑如圖 8(b) 所示。

另外，增加內擋光板後對於大角度的入射光線所引發的雜散光也有抑制的效果。在外鏡筒與內擋光板的遮蔽之下，在視角外的雜散光源主要是來自於各結構表面的散射，其中更以主反射鏡所散射之光線的貢獻為最高。若以入射區間來看，於 6—35 度的典型散射雜散光路徑如圖 9 所示，光線會於主反射鏡產生散射，再經由次反射鏡的反射抑或是散射將其引導至 CCD 焦平面上，見圖 9(a)。而如果



Red : X-axis, Green : Y-axis, Blue : Z-axis

圖 6. 擋光板的三維視圖。

折反式望遠鏡之雜散光比例 (光線入射延伸至 70 度)

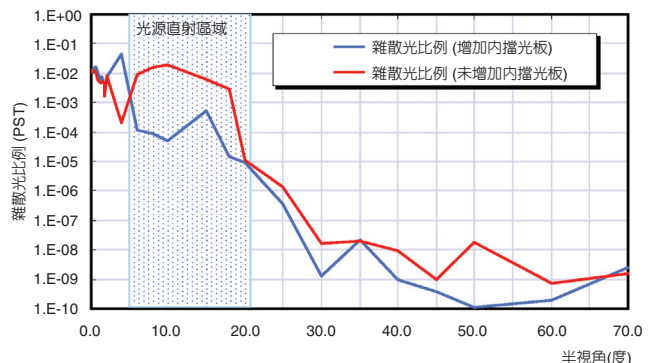


圖 7. PST 曲線 (增加內擋光板前後的比較)。

表 1. 光源直射區間內，增加內擋光板前後的雜散光比例。

入射角度 (度)		6	8	10	15	18	20
雜散光比例 (PST)	增加內擋光版前	9.33E-03	1.55E-02	1.85E-02	5.93E-03	2.98E-03	1.05E-05
	增加內擋光版後	1.13E-04	8.72E-05	5.19E-05	5.22E-04	1.44E-05	9.03E-06

是更大的入射光線，如大於 35 度斜角時，光線直接入射於主反射鏡的機率降低，散射雜散光主要是由外鏡筒所散射，或是散射光線再經由主反射鏡之二次散射至次反射鏡而反射至焦平面，如圖 9(b)。

3. 擋光板對系統成像品質的影響

內擋光板可以有效的解決光源直射的問題，但是對於整個光機系統而言，卻也增加了一個引發雜散光的物件。因此，在設計的視角範圍中的雜散光能量值得與未增加內擋光板前的雜散光能量互相比較，如圖 10，可以發現在增加內擋光板後在設計內會引發比較多的雜散光，淡綠色曲線 (尺度參見

副座標) 為其變化的百分比。利用逆向光束追蹤並加以分類歸納，找出導致雜散光增加的原因，可以發現在增加內擋板後雜散光增加的入射區間內有極大部分的雜散光是經由主擋光板的引導而產生的 (紅色區塊)，如光路徑可見於圖 11。另外，在接近邊緣視角時的雜散光主要是來自於 CCD 與鏡筒間的反射 (深藍色區塊)。

另外，雜散光對於成像品質的影響，則可以對 MTF 進行評估。各視角之下滑情況如表 2 以及圖 12，在圖中 MTF 所依據的空間頻率分別 25 lp/mm 與 70 lp/mm，實線與虛線各表示矢狀切面 (sagittal) 與子午切面 (tangential) 方向上的 MTF。

圖 8.

(a) 由主擋光板所反射至焦平面之雜散光線，(b) 15 度入射時直射於鏡筒機構之光線路徑。

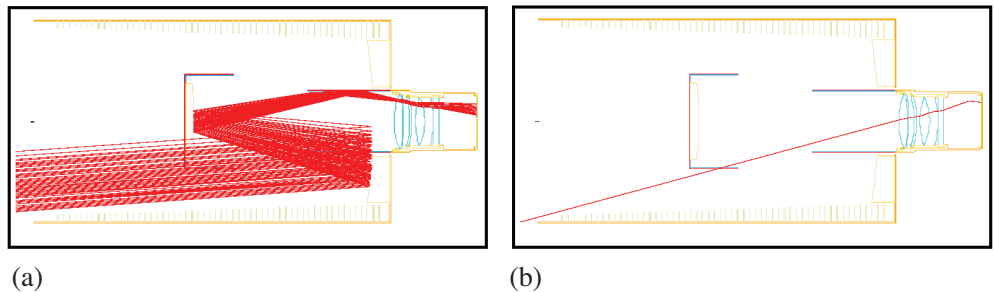
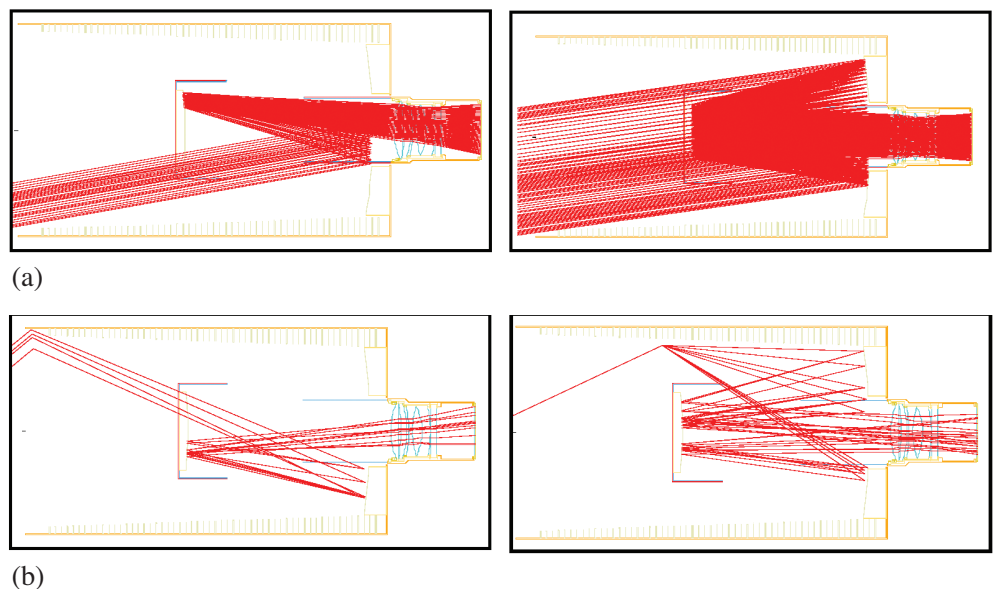


圖 9.

(a) 經由次反射鏡反射至 CCD 焦平面上的雜散光路徑。(b) 光線於大角度入射時產生的雜散光。



視角範圍內之雜散光

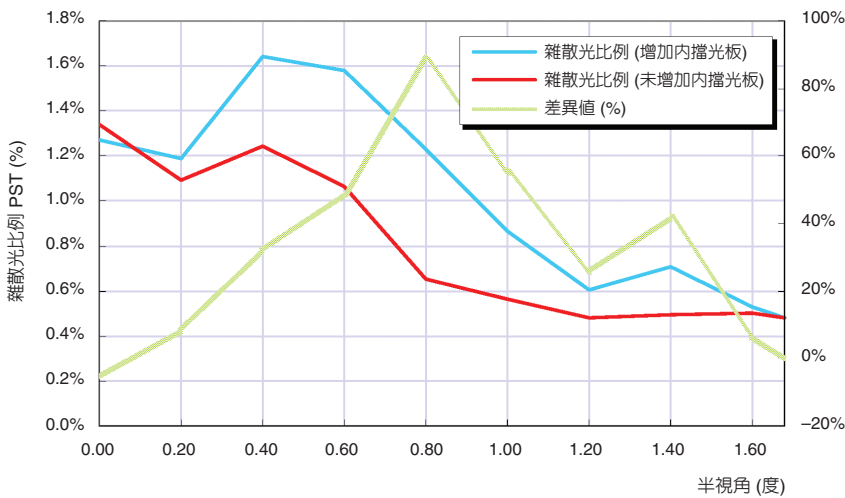


圖 10. 折反射式望遠鏡視角範圍內的雜散光比例。

折反射式望遠鏡系統的雜散光分類 (前 5 大項)

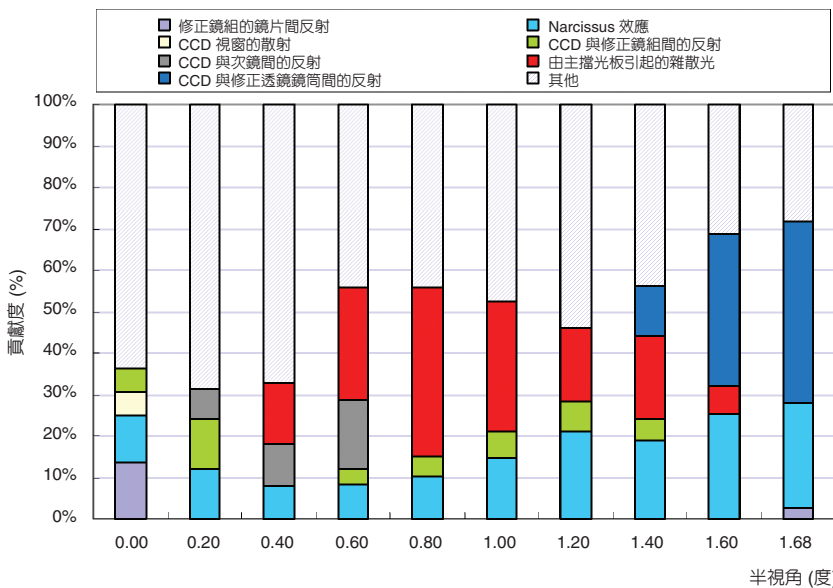


圖 11. 折反射式望遠鏡視角範圍內的雜散光分類。

4. 小結

本段討論了反射式望遠鏡系統的雜散光分析與擋光板阻擋光源直射的效果。雜光抑制上除了在機構件施以陽極霧面染黑之外，並在各鏡片邊緣塗佈特殊塗料，降低其與機構介面間的反射，另外內擋

光板表面則刻以螺紋線，並噴沙處理增加內擋光板的粗糙度，以降低其引發的雜散光能量。目前，此反射式望遠鏡已經進入最後的調校階段，未來將配合材料 BSDF 量測與系統雜散光量測，以驗證設計成效。

表 2. 雜散光對 MTF 值的影響。

視角 FOV	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.70
雜散光比例	0.0336	0.0314	0.0470	0.0459	0.0363	0.0261	0.0185	0.0205	0.0153	0.0142
MTF 衰減函數	0.9664	0.9687	0.9530	0.9541	0.9637	0.9739	0.9816	0.9796	0.9847	0.9859

注：MTF 衰減函數為 1 減去雜散光比例。

MTF 受雜散光影響的下降預測 (空間頻率為 25, 70 lp/mm)

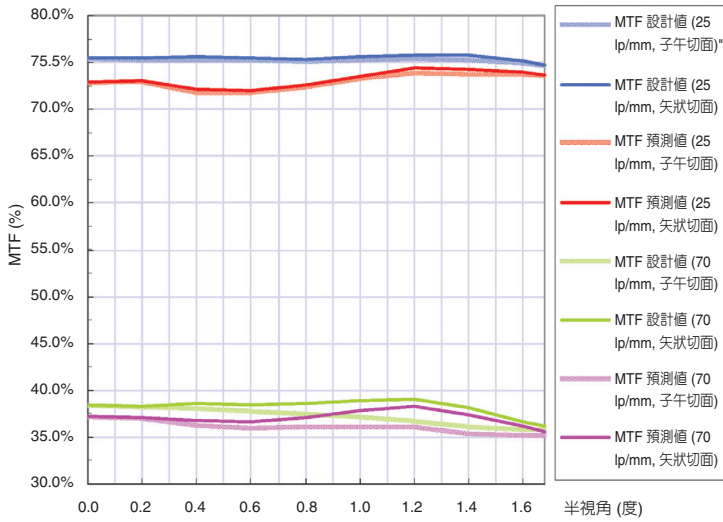


圖 12. 受雜散光影響的各視角 MTF。

四、結論

本文敘述了光學系統中雜散光的成因以及其分析、抑制的基本概念。由於雜散光的影響關係到光學系統設計的成敗，所以雜散光抑制必須從整個系統層面來思考。雖然在大部分的光學系統雜散光分析與抑制概念是相同的，但在實用的方法上，則因系統任務、光學系統需求、計畫時程及經費預算而有差異。希望本文的案例能夠對光學設計及光機設計者提供另一個思考方向。

參考文獻

1. R. P. Breault, *Handbook of Optics*, 1, 2nd ed., 38.1, New York: McGraw Hill (1995).
2. N. Song, Z. Yin, and F. Hu, *Opt. Eng.*, **41** (9), 2353 (2002).
3. *ASAP Procedural Note*, BRO-PN-1157 (2001).
4. 何承舫, 黃鼎名, 張勝聰, 望遠鏡擋光板設計, 台灣光電研討會 (2004).
5. 光機電系統整合概論, 270, 國研院儀器科技研究中心 (2005).

- 何承舫先生為國立成功大學物理碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
- 黃鼎名為國立成功大學航太工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼光電與遙測組組長。
- 張勝聰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研究員。
- Cheng-Fang Ho received his M.S. in physics from Nation Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Ting-Ming Hung received his Ph.D. in aeronautics and astronautics engineering from Nation Cheng Kung University. He is currently a researcher and the director of Electro-Optics & Remote Sensing Division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Senq-Tsong Chang received his M.S. in physics from the Catholic University of America. He is currently a researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.