

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

應用二維經驗模態分解消除水域影像日光返照
**Sun Glint Removal from Water Area Image using
Bidirectional Empirical Mode Decomposition**

研究生：施伶蓓

指導教授：史天元

中華民國一百零一年七月

應用二維經驗模態分解消除水域影像日光返照

**Sun Glint Removal from Water Area Image using Bidirectional
Empirical Mode Decomposition**

研究生：施伶蒨 Student：Ling-Chien Shih

指導教授：史天元 Advisor：Tian-Yuan Shih

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

應用二維經驗模態分解消除水域影像日光返照

學生：施伶蒨

指導教授：史天元

國立交通大學土木工程學系

摘要

水域的航空遙測影像容易因為水面對太陽輻射的鏡面反射而造成日光返照，因而造成影像資訊損失，影響影像之製圖及解讀，本研究嘗試分析日光返照形成之原理，並使用能量傳輸解析與影像處理方法測試減低日光返照之影響。

讀取測試影像所得為影像灰度值，無法轉換至輻射值，即使使用 Cox and Munk (1954) 模型及 MODIS 軟體得到之傳輸量及光源輻射值，亦無法進行輻射值改正；影像拍攝當時海表面模型未知，所計算之傳輸量無法符合每個點位之差異，難以進行日光返照之改正。因此先嘗試從影像色彩不均及資訊損失之補償方法著手，使用白平衡及去霧處理兩種影像處理方法進行測試，測試結果發現日光返照區域有過度增顯情形，範圍增大且亮度誇張化。但若將日光返照區域視為亮度特徵，把影像 RGB 色彩空間轉為 HSV 色彩空間後，以亮度進行二維經驗模態分解，發現原始影像減去模擬影像之殘餘項與日光返照之範圍與特徵相當，將其視為雜訊後去除後得到之影像，可以有效改善了日光返照之影響。

使用平均值、均方根誤差、峰值訊號雜訊比及結構相似性指標對於影像結果進行統計指標計算，並與肉眼觀察結果進行比較，RGB 波段平均值主要與原始影像色調有關，SSIM 指標值可以看出色彩結構的維持，但主要以人眼判識為主。

關鍵字：日光返照、雙向反射分布函數、MODIS 軟體、白平衡、去霧處理、HSV 色彩空間、二維經驗模態分解、峰值訊號雜訊比、結構相似性指標。

Sun Glint Removal from Water Area Image using Bidirectional Empirical Mode Decomposition

Student : Ling-Chien Shih

Advisor : Tian-Yuan Shih

**Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University**

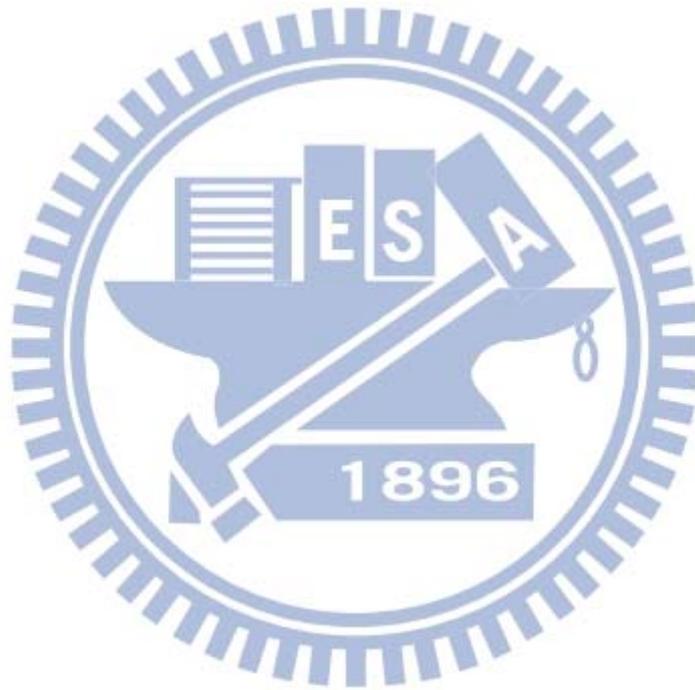
Abstract

When taking aerial photography images on sea area at daytime, the sea surface reflection of solar radiation cause the sun glint. It will cause the loss of image information, even continuous images stitching. In this paper bring up the definition of sun glint, and use the radiation transfer analysis and image processing methods for testing.

We readed images to get digital numbers, but we can't transfer it to radiance. Even we use Cox and Munk (1954) Model and MODO to get the transmittance and solar radiance, we still can't correct the radiance. There was no models of sea surface when shooting images, the transmittance we calculated can't apply for every point of surface, it can't be used to correct sun glint. For the uneven image colors and the loss of image information, using white balancing and dehazing for testing, the results found sun glint region increased significantly, increase the range and brightness exaggerated. If sun glint area can be regarded as the brightness characteristics and allowed images from RGB color space into HSV color space, the Value processed with Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD), and found that the region and characteristics of residual with sun glint of origin images are the same, and removed the residual. That results can found that BEMD really improve the sun glint.

The Mean value, Root Mean Square Error (RMSE) , Peak Signal to Noise Ratio(PSNR), and Structural Similarity (SSIM), which are the statistical indicators calculated for results, and these indicators compared with the naked eyes, and finally make conclusions and suggestions.

Keywords: sun glint, BRDF, MODO, white balancing, dehazing, HSV color space, BEMD, PSNR, SSIM.



致謝

轉眼間兩年的碩士生活結束了，曾經在修課的時候遇到很多困難，很多不足都仰賴老師、學長姊們還有同學們的支持度過，從大學時對於測量只是選修幾門基礎課，這兩年來對於測量知識一點一滴的累積，都讓我覺得很幸運能成為測量的一份子。

在此感謝兩年的指導教授史天元 博士，老師即使在非常忙碌的時候，依然會抽出時間與我討論研究的問題，對於我專業知識的不足與論文寫作的困難與錯誤給予指導，總是不厭其煩，很感謝老師在學生身上所花費的心力，學生在畢業後會更加努力，老師也要記得保重身體。

在此亦感謝口試委員曾義星 博士、蔡榮得 博士與張智安 博士對於學生論文的指導與建議，感謝曾老師特別趕來新竹，並且主持學生的口試；感謝蔡老師對於學生論文的用心，一字一句的建議，想必花了老師不少時間；感謝張老師在兩年期間，指導學生寫程式所遇到的困難，提供學生軟體的協助，給予許多寶貴的建議，尤其學生在程式的最後一部遇到關卡時，老師給的建議讓學生卡了幾個禮拜的問題迎刃而解。

兩年中小閩學長、雅信學姊提供的幫助無數，感謝你們容忍我對於軟體與寫作的困難，不厭其煩的教導我；感謝薇帆、昭儀、郁珊時時刻刻的陪伴與支持，感謝柏溶的幫助與關心，也感謝世涵、邦和、詠升，兩年的跨年有你們的陪伴好熱鬧，八個人的歌唱與嬉戲，是我在兩年研究生活中可以繼續的動力，我已經開始期待未來的同學會。也感謝尚儒和張朔在我忙碌的時候提供協助，以及幫助我口試的準備與紀錄。

感謝我最重要的家人，奶奶、外公、爸媽還有兩個哥哥，還有已經在天堂的外婆。外婆還在的時候總是不停的跟我說要好好讀書，也總是跟媽媽關心我的近況；爸媽非常希望我可以完成研究所的學業，但又努力的盡量不給我壓力，謝謝您們相信我；感謝兩位哥哥在與我談心之餘，告訴我支持我的決定。我親愛的家人們，我很愛你們。

最後感謝許許多多幫助我關心我的長輩與朋友們，有你們的支持才能度過這些年，祝福每一位未來萬事如意，健康順心。

目錄

摘要	I
ABSTRACT	II
致謝	IV
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	X
1. 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	1
1.3 研究流程	3
1.4 論文架構	4
2. 研究方法	5
2.1 輻射傳輸解析	5
2.1.1 MODTRAN4 模組	5
2.1.2 Cox and Munk (1954) 模型	9
2.1.3 雙向反射分布函數	10
2.2 影像處理	11
2.2.1 白平衡基本原理	12
2.2.2 去霧處理基本原理	13
2.2.3 經驗模態分解原理	16
2.2.3.1 一維經驗模態分解	16
2.2.3.2 二維經驗模態分解	18

2.2.3.3 實驗過程.....	18
2.2.3.4 散亂極值點形成包絡面方法-Delaunay 三角網.....	20
2.2.3.2 取得 IMF 之過程.....	21
2.2.3.4 HSV 色彩空間.....	25
2.3 利用近紅外波段資訊進行校正.....	26
2.4 影像品質指標.....	30
3. 研究資料.....	33
4. 成果與討論.....	35
4.1 輻射傳輸解析-MODO.....	35
4.2 白平衡&去霧處理成果.....	38
4.3 二維經驗模態分解(BEMD)影像成果.....	43
4.3.1 第一組測試影像.....	43
4.3.2 第二組測試影像.....	58
4.4 影像品質分析.....	63
5. 結論與建議.....	65
參考文獻.....	66

圖目錄

圖 1.1、東沙環礁航空影像拼接(陳雅信, 2010).....	2
圖 2.1、太陽輻射散射路徑圖(李暢游等, 2011).....	6
圖 2.2、MODO 流程圖(MODO, 2010).....	7
圖 2.3、一般 MODTRAN4 之參數設定檔(tape5).....	8
圖 2.4、MODO 軟體參數設定介面.....	9
圖 2.5、反射幾何示意圖(Cox and Munk, 1954).....	10
圖 2.6、BRDF 示意圖(Centennial, 2001).....	11
圖 2.7、太陽輻射消散示意圖.....	14
圖 2.8、去霧處理流程圖.....	15
圖 2.9、去霧處理前後之影像.....	16
圖 2.10、EMD 架構流程圖.....	17
圖 2.11、BEMD 分解流程圖.....	19
圖 2.12、(a)紅點為眾圓之圓心，黑線為圓上任意三點連成之 Delaunay 三角網。(b)將 (a)之紅點連起來為 Voronoi 圖形。(Wikipedia, 2012).....	20
圖 2.13、Delaunay 三角網示意圖(胡珺婷, 2012).....	21
圖 2.14、EMD 分解示意圖(Huang, 1998).....	23
圖 2.15、待分解的原始訊號.....	24
圖 2.16、尋找局部極大值點.....	24
圖 2.17、插值得到局部極大值包絡線.....	24
圖 2.18、插值得到局部極小值包絡線.....	24
圖 2.19、將局部極大值與極小值包絡線平均後之均值包絡線.....	25
圖 2.20、原始訊號減去均值後之餘項.....	25
圖 2.21、HSV 色彩空間示意圖.....	26
圖 2.22、可見光波段與近紅外波段亮度之線性關係(Hedley, 2005).....	27

圖 2.23、永興島 Worldview2 原始衛星影像(銳梯科技, 2010).....	28
圖 2.24、(a)、(c)為原始影像圈選之測試區域, (b)、(d)為處理後之影像結果.....	29
圖 3.1、IDE UI-2250SE 數位相機(IDE, 2010).....	33
圖 4.1、太陽(輻射光源)位置之計算.....	36
圖 4.2、光譜值之萃取.....	36
圖 4.3、太陽表面輻射值與傳輸量輻射值之圖示.....	37
圖 4.4、測試影像 A 原始影像.....	39
圖 4.5、測試影像 A 去霧處理後.....	39
圖 4.6、測試影像 A 白平衡後.....	40
圖 4.7、測試影像 B 原始影像.....	40
圖 4.8、測試影像 B 去霧處理後.....	41
圖 4.9、測試影像 B 白平衡後.....	41
圖 4.10、測試影像 C 原始影像.....	42
圖 4.11、測試影像 C 去霧處理後.....	42
圖 4.12、測試影像 C 白平衡後.....	43
圖 4.13、測試影像 A 原始影像.....	44
圖 4.14、測試影像 A 之 IMF1.....	44
圖 4.15、測試影像 A 之 IMF2.....	45
圖 4.16、測試影像 A 之 IMF3.....	45
圖 4.17、測試影像 A 之殘餘項.....	46
圖 4.18、測試影像 A 影像結果(HSV 色彩空間).....	46
圖 4.19、測試影像 A 二維經驗模態分解結果.....	47
圖 4.20、測試影像 B 原始影像.....	48
圖 4.21、測試影像 B 之 IMF1.....	48
圖 4.22、測試影像 B 之 IMF2.....	49

圖 4.23、測試影像 B 之 IMF3	49
圖 4.24 測試影像 B 之殘餘項	50
圖 4.25、測試影像 B 影像結果(HSV 色彩空間)	50
圖 4.26、測試影像 B 二維經驗模態分解結果	51
圖 4.27、測試影像 C 原始影像	52
圖 4.28、測試影像 C 之 IMF1	52
圖 4.29、測試影像 C 之 IMF2	53
圖 4.30、測試影像 C 之 IMF3	53
圖 4.31、測試影像 C 之殘餘項	54
圖 4.32、測試影像 C 影像結果(HSV 色彩空間)	54
圖 4.33、測試影像 C 二維經驗模態分解結果	55
圖 4.34、測試影像 D 原始影像	56
圖 4.35、測試影像 D 二維經驗模態分解影像結果	57
圖 4.36、測試影像 E 原始影像	59
圖 4.37、測試影像 E 二維經驗模態分解結果	59
圖 4.38、測試影像 F 原始影像	60
圖 4.39、測試影像 F 二維經驗模態分解結果	60
圖 4.40、15 張原始影像鑲嵌結果	61
圖 4.41、15 張測試影像二維經驗模態分解結果之鑲嵌	62

表目錄

表 3.1、東沙地區航線規劃參數.....	33
表 3.2、相機規格.....	33
表 3.3、實驗影像資訊.....	34
表 3.4 飛行及相機相關參數.....	34
表 3.5、第二組實驗影像資訊.....	34
表 4.1、影像 A 指標值.....	64
表 4.2、影像 B 指標值.....	64
表 4.3、影像 C 指標值.....	64
表 4.4、影像 D 指標值.....	64



1. 前言

日光返照(Sun Glint)現象發生在太陽與海表面之入射角及感測器與海表面之反射角相同時，受影響區域若為平滑海面會產生鏡面反射，反之，若為粗糙海面則會形成陰暗色調(Wikipedia, 2012c)。本章簡述研究背景與目的，其後提出解決日光返照問題使用之方法與背景，對於這些方法使用相同影像進行測試，並在測試後進行成果討論。

1.1 研究背景

當太陽的仰角越大，日光返照之影響區域會越集中，灰度值強度也會更高，對於影像的資訊損失會更加明顯，在日光返照的去除後，資訊的損失常常無法彌補。

航遙測影像在影像拍攝時，因為海面的波動或是拍攝時間接近正午，都有可能造成日光返照而使海面下之資訊不明或是顏色亮度過高之情形，因此本研究希望可以藉由能量傳輸解析以及一般影像處理進行日光返照之改正。

1.2 研究動機與目的

在執行拍攝任務時，拍攝時間雖然可以盡量避免正午或天候不佳，但每日太陽東昇西降之時間略有差異，甚至拍攝日數與預算之限制等等，在拍攝時仍有無法避免之日光返照情形，因為返照之影響會造成影像本身資訊損失，光影不均之情況也有造成人為判斷錯誤的可能性。

受限於像幅大小，拍攝一整個區域之影像必須進行鑲嵌才可得到完整地區影像。將一批有一定重疊之影像，拼接後去除邊緣部分，組成大範圍之鑲嵌圖，用來鑲嵌之影像一般具有一定程度的幾何一致性及色調連續性。航空影像即使為連續拍攝，重疊區域仍然可能因為拍攝角度不同而有影像色調之差異，如圖 1.1 所示，當拍攝角度剛好符合表面的反射路徑時，即會產生日光返照，在拼接時會造成拼接處的光影，破壞影像的連續性及資訊的遮蔽。

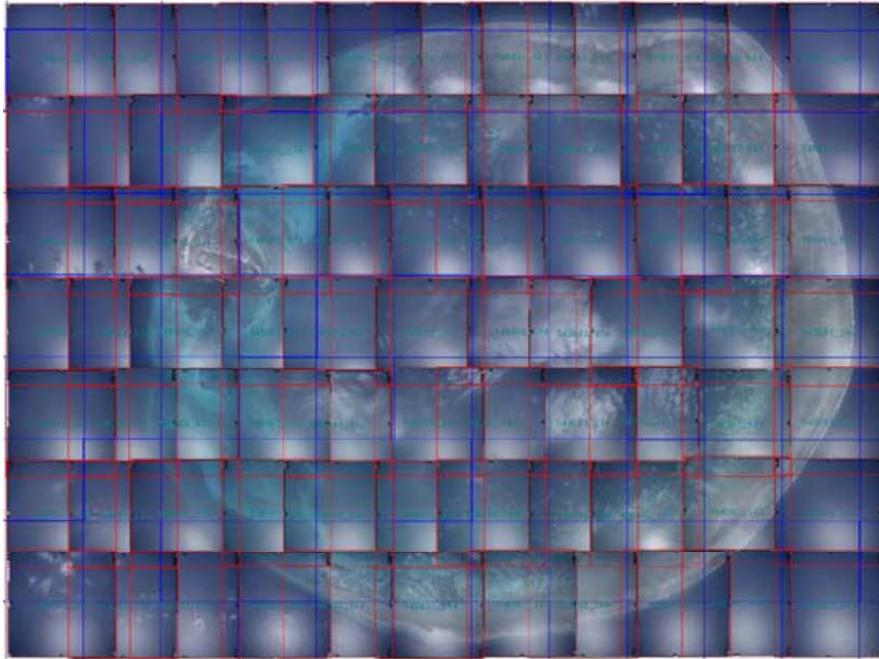


圖 1.1、東沙環礁航空影像拼接(陳雅信，2010)

本研究之實驗資料為航空拍攝影像，拍攝地區為海域，海域之風速與浪高無法確切得知，本研究希望藉由影像處理方法，對於海域之日光返照進行測試，並分享測試成果進而給予建議。

1.3 研究流程

一般處理日光返照之文獻或相關工具程式，大多會參考 Cox and Munk (1954) 提出之模型，此模型建立光源之入射與反射的幾何情形，並且考慮大氣或風浪等影響，由影像所量測之輻射量去除這些影響後，以模型模擬拍攝當時之表面輻射量。使用該模型必須先得到反射表面之雙向反射分布函數(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)，BRDF 可以由率定後之相機與光源拍攝真實物件而直接測得。

Rosa et al.(2006)使用 Cox and Munk(1954)模型進行 MIVIS 影像之日光返照(Sun Glint)改正，其中太陽輻射量及輻射傳輸量以 MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmission)進行模擬，因為一般航空拍攝影像為可見光波段(波長範圍約 400~700nm)，因此使用 MODTRAN 進行測試。為了方便使用者輸入參數後來出現了 MODO (MODTRAN Operation)等軟體，本研究測試是否可以使用 MODO 軟體計算之傳輸量用以改正日光返照。

若將日光返照視為雜訊，參考 Huang et al.(1998)提出的經驗模態分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)及 Damerval et al. (2005)提出的二維經驗模態分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)，分解出內建模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMF)後，其中一個模態函數會與日光返照有關，將其去除後即可得到改正之影像。

除了二維經驗模態分解外，使用 Tang et al.(2009)提出之單張影像去霧方法及白平衡這兩種常用於影像改正之處理方法，並且提及處理有近紅外波段資訊影像之日光返照處理。但本篇論文主要以處理航空拍攝彩色影像之日光返照為目的，並無近紅外波段資訊，因此在這只做分享不做評論。

1.4 論文架構

第一章介紹日光返照之形成背景與研究目的，並提出為了解決日光返照之影響所實驗之方法種類；第二章對於能量傳輸解析、影像處理及近紅外波段校正三類方法進行文獻回顧及研究方法介紹，並分享初步的實驗結果；第三章對於實驗影像及使用相機進行規格介紹；第四章提出實驗所遇到之困難以及成果展示，對於成果進行人眼判識及指標分析；第五章提出結論與建議。



2. 研究方法

遙感探測所拍攝之影像，無論是無論由衛星或航空器，在拍攝時有可能會因為天候、雲層或拍攝時間接近正午造成影像資訊損失，其中拍攝海域範圍之影像最常見的情況之一，即為日光返照。

去除日光返照的方法大致可分為輻射傳輸解析、影像處理方法及利用近紅外波段資訊校正，三種類型。

2.1 輻射傳輸解析

利用輸入環境相關參數及太陽入射角等已知參數與影像輻射值進行計算，可模擬拍攝當時之輻射值，本研究所使用之影像拍攝區域為海域，表面崎嶇程度隨著風浪變化，無法得知拍攝當時之反射表面模型，與輻射值無法對應。

2.1.1 MODTRAN4 模組

根據氣象衛星的觀測結果，除了地物會將能量反射至感測器外，亦包含地物環境散射與反射以及大氣的散射與反射等。輻射傳輸方程式描述輻射傳播通過介質時在介質間發生交互作用(吸收、散射、反射等)，而使輻射能夠按照一定的規律傳輸，在地球大氣條件下之求解非常複雜，只能在一些假定的參數下求解。若 $I_\lambda(s)$ 為輻射傳輸量，輻射傳輸方程式定義如下：

$$I_\lambda(s) = I_{S_1} e^{-\int_{S_1}^{S_2} K_\lambda(s) \rho(s) ds} \quad (2.1)$$

其中大氣消散係數 $K_\lambda(s) = -\frac{dI_\lambda}{\rho(s)I_\lambda ds}$ ，表示輻射在大氣中傳播距離 ds 時的相對衰減率；

指數項 $e^{-\int_{S_1}^{S_2} K_\lambda(s) \rho(s) ds}$ 為透射率； dI_λ 為輻射經過距離 ds 後的強度變化值。

如圖 2.1 所示，太陽光入射時，感測器所接收之光量由海表面反射光經過散射及水底反射光經過水中散射所組成，若能由散射後之接收光量計算原始反射量，則可用以估計日光返照之影響。

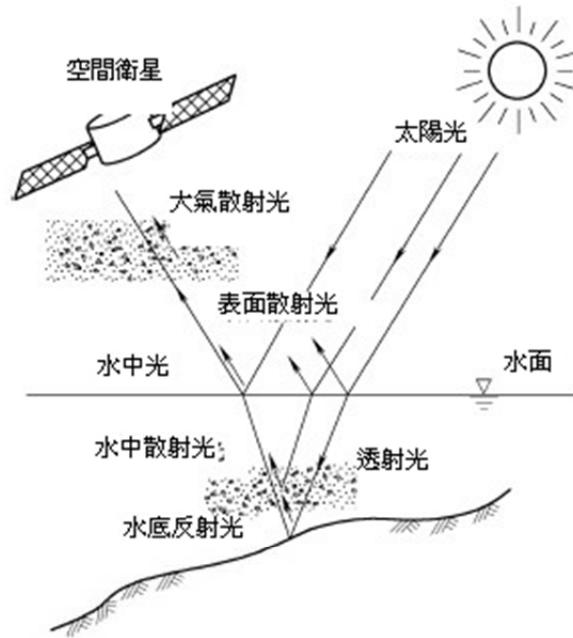


圖 2.1、太陽輻射散射路徑圖(李暢游等，2011)

針對會影響輻射傳輸的因素，相關研究人員研發許多大氣模型模擬大氣的消散過程，例如：Lowtran、MODTRAN、Hitran 等，MODTRAN 適用於波長 200nm~∞之範圍，本研究測試影像為可見光波段，故使用 MODTRAN 進行測試。

輻射傳輸程式 MODTRAN4 為依照現存標準模擬大氣傳輸消散過程，給定輻射傳輸的幾何路徑、大氣溶膠模式、雲層參數及透射率模式等，依輻射傳輸方程式計算大氣透射率及輻射強度。設定參數時介面繁複，因此許多的使用者推出了一些工具解決這些困難，MODO 即為其中之一。

MODO 以圖形使用者介面(Graphical User Interface, GUI)執行 MODTRAN，由圖 2.2 可看出 MODO 擁有完整的邏輯架構，並且可以在介面進行參數設定製作輸入檔“tape5”，隨著輸入 tape5 後的產出為光譜的相關輸出，例如光譜輻射值的萃取、轉換以及繪圖。

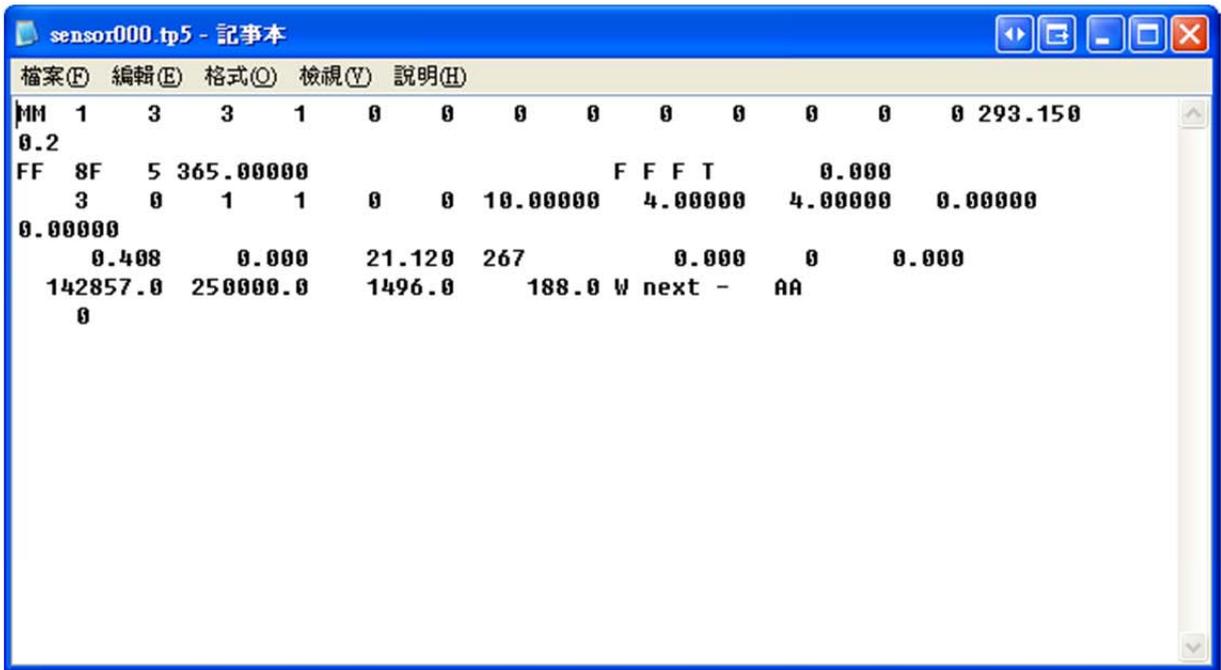


圖 2.3、一般 MODTRAN4 之參數設定檔(tape5)

MODO 的參數設定介面如圖 2.4 所示，參數排序與 tape5 之順序相同，避免了參數位置錯亂的情況；可以選擇 Default 使用原始參數設定並且可以將設定輸出 tape5 檔案供其他軟體使用。

本次實驗所使用之影像為航照，拍攝地區為海域，拍攝當時環境參數含有許多不確定因素，因此變動參數保持空白不予填寫。台灣地區為低緯度地區，因此大氣參數選擇”Tropical Atmosphere”，單位選擇一般 MODTRAN4 使用之標準單位 cm^{-1} ，拍攝地點為海域因此選擇”Navy Maritime”之設定，假設其為無海底火山無雲之開放性海域，各依相應情況選擇適合之參數。

接著輸入相機相關之參數如感測器高度、太陽天頂角、拍攝之 GPS 時以及最後輸入可見光頻率範圍及光譜解析度，即可得到計算結果。

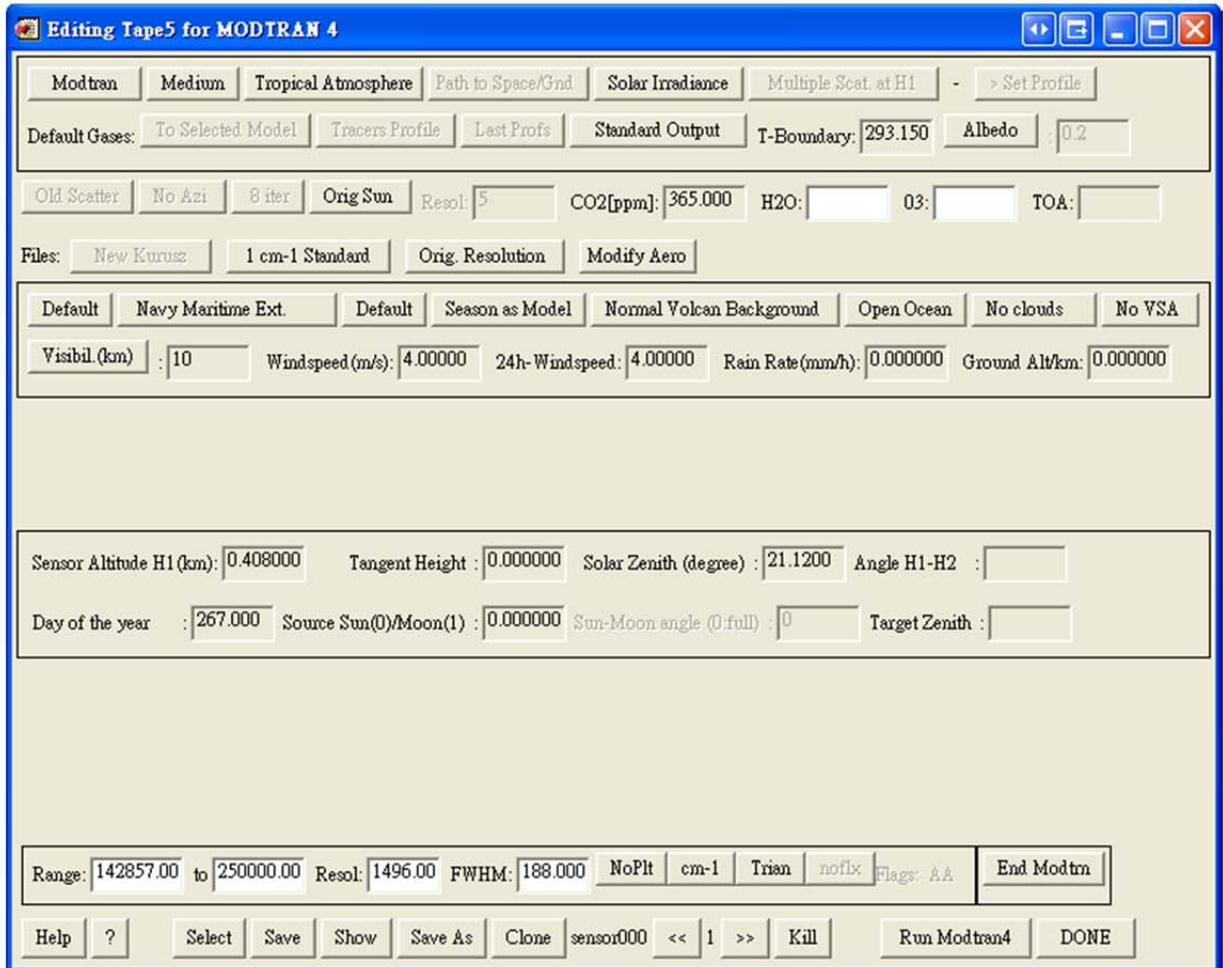


圖 2.4、MODTRAN 軟體參數設定介面

2.1.2 Cox and Munk (1954) 模型

Cox and Munk (1954) 提出一個模型，對於不平靜之海面進行模擬，以平靜海面的反射公式計算不平靜海面模型。該海面模型認為海面有一定的粗糙程度，海面可視為由許多個極小的平面組成，這些極小平面的坡度符合某種統計分布。

圖 2.5 為此模型的反射幾何示意圖，XY 平面為水平面之平行面， β 為極小平面與水平面之夾角(坡度角)； n 、 z 為極小平面與水平面的法向量； θ_i 、 θ_f 為入射角與反射角； ϕ_i 、 ϕ_f 為入射與反射方位角(以 +X 為基準)； χ 為入射線與極小平面法向量之夾角。海面極小平面在 x 與 y 方向之斜率 z_x 、 z_y 可由下式表示：

$$\begin{aligned} z_x &= -\tan\beta\cos\phi_i \\ z_y &= -\tan\beta\sin\phi_i \end{aligned} \quad (2.2)$$

反射率分布函數 p ，一次微分近似值 z_x 、 z_y 滿足

$$p(z_x, z_y) = (\pi\sigma^2)^{-1} \exp\left[-\frac{z_x^2 + z_y^2}{\sigma^2}\right] \quad (2.3)$$

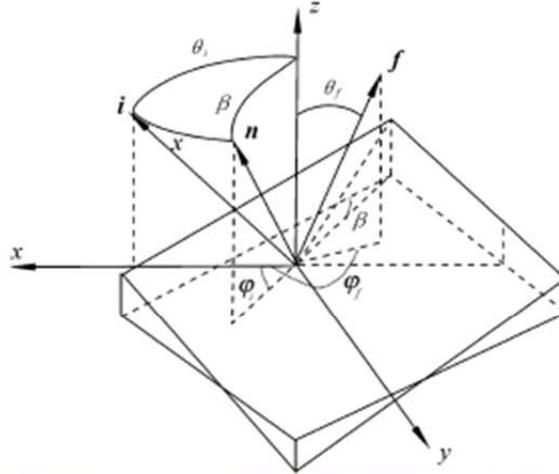


圖 2.5、反射幾何示意圖(Cox and Munk, 1954)

使用此模型必須先有海表面模型，一般會計算海表面之 BRDF，以 MODTRAN4 計算路徑輻射值(路徑傳輸量及太陽輻射量)，可由以下計算式計算日光返照之輻射量：

$$L_{SUNG}(\lambda, h_0, \theta_i) = E(\lambda, d, \theta_f) \cdot T_D(\lambda, \infty, \theta_f) \cdot \rho_G \cdot T_U(\lambda, h_0, \theta_i) \quad (2.4)$$

其中 λ 為波長； $E(\lambda, d, \theta_f)$ 為表面太陽入射輻射量； d 為太陽至地球距離(單位 AU)； $T_D(\lambda, \infty, \theta_f)$ 為太陽傳送至表面之大氣傳輸輻射量； $T_U(\lambda, h_0, \theta)$ 為表面反射至接收器之大氣傳輸輻射量； ρ_G 為日光返照反射係數，定義如下式：

$$\rho_G = \frac{\pi \cdot r(\omega)}{4 \cos \theta_i \cdot 4 \cos \theta_f \cdot \cos 4\beta} \cdot p(z_x, z_y) \quad (2.5)$$

其中 $r(\omega)$ 為 Fresnel 反射係數，在入射角小於 50° 時 $r(\omega) = 0.02$ ； ω 為極小平面上太陽入射光與接收器接收反射光之夾角； β 為極小平面之天頂角。

將影像換算之輻射值以 $L_{SUNG}(\lambda, h_0, \theta_i)$ 作改正後，即為去除日光返照影響後之結果。

2.1.3 雙向反射分布函數

物體表面對於入射光線輻射量之反射可分為鏡面反射、漫射反射及方向反射，鏡面反射之反射能量集中在同一個方向，並且反射角與入射角相同；漫射反射的整個表面的

每個方向都有反射，並且反射強度是均勻的；方向反射在整個表面的各個方向都有反射，反射強度是不均一的。自然界大多物體均假設為漫射反射體，無法使用簡單用反射率描述，地物的方向特徵用來描述地物對太陽輻射反射與散射能力隨著方向空間變化，這種空間變化特徵取決於兩種因素，其一為地物的表面粗糙度，不只取決於表面平均粗糙高度值、與電磁波波長之間有比例關係，也與視角有關。

雙向反射分布函數(BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function)之物理意義為來自地表輻射強度的增量以及其增量引起的反射輻射強度增量之比值。假設波長為 λ ，太陽輻射從 (θ_i, ϕ_i) 方向以輻射強度 $L_0(\theta_i, \phi_i, \lambda)$ 投射至目標物某點，該點輻射強度增量為 $dE(\theta_i, \phi_i, \lambda) = L_0(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i d\Omega$ ，感測器從 (θ_r, ϕ_r) 方向接收到來自目標物反射之輻射強度 $dL(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ ，如圖 2.6 所示。定義雙向反射率分布函數 f 如下式：

$$f = \frac{dL(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (2.6)$$

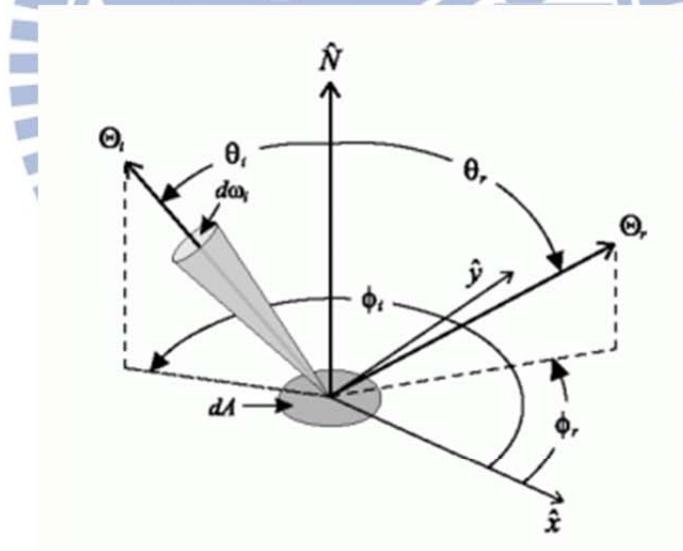


圖 2.6、BRDF 示意圖(Centennial, 2001)

2.2 影像處理

一般影像處理在色調偏差或模糊時常用的處理方式為白平衡(White balancing)及去霧處理(Dehazing)，由於日光返照影像在返照區強度過高且擁有資訊損失情況，因此使用白平衡處理其色調不均情形，以及進行去霧化處理資訊損失情形。

若將日光返照視為雜訊，使用二維經驗模態分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)將影像分成多個內建模態函數，日光返照可能為某個模態函數，將其扣除後可以得到改正後之影像。

2.2.1 白平衡基本原理

色溫為加熱黑體(Black Body)在該絕對溫度下所顯現之色光，影像拍攝時因為不同光波所發射的能量不同，會感知不同的色彩變化。當較高色溫與較低色溫之光源照射在白色物體上，高色溫光源所照射之物體顯色偏藍，低色溫光源所照射之物體顯色偏紅，因此色溫會影響拍攝目標之色偏情況。(Wikipedia, 2012d)

灰階理論為白平衡處理方法之一，對於色彩均勻之影像處理效果極佳，本實驗使用色彩均勻之海域影像，因此選擇灰階理論為研究方法。

進行白平衡轉換時需要調整個色彩之乘積值，即為色彩調整係數。「適應白點」為人眼視覺系統於色溫下感知之恆常性白點，而「採用白點」為相機所拍攝之白點資訊，在此白平衡轉換利用 Von Kries 色適應模式使相機拍攝之採用白點轉換為人眼所感知的適應白點，即為模擬人眼所見之真實色彩(陳炳旭，2012)。由於適應白點為人所感知，無法準確量化，一般以純白點即(R,G,B)=(255,255,255)代表適應白點，可得以下方程式：

$$R = \frac{255}{R_{E,W}} \times R_E$$

$$G = \frac{255}{G_{E,W}} \times G_E$$

$$B = \frac{255}{B_{E,W}} \times B_E$$

(2.7)

其中 $R_{E,W}$ 、 $G_{E,W}$ 、 $B_{E,W}$ 為轉換前之白點色彩訊號； R_E 、 G_E 、 B_E 為轉換前影像各灰度值色彩訊號； R,G,B 為轉換後影像各灰度值色彩訊號； $\frac{255}{R_{E,W}}$ 、 $\frac{255}{G_{E,W}}$ 、 $\frac{255}{B_{E,W}}$ 為白平衡轉換之「調整係數」。

Chiou (2001)提到灰階理論即為假設人眼所感知的自然界影像色彩成份分布均勻，三個色彩之強度相同。依此理論，若想在色調偏差下經由色適應模式模擬人眼所感知之色彩，需將 RGB 平均強度調整至相同大小，模式可表示如下：

$$\begin{aligned}
 R' &= R \times \frac{K}{R_{\text{average}}} \\
 G' &= G \times \frac{K}{G_{\text{average}}} \\
 B' &= B \times \frac{K}{B_{\text{average}}}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

其中 $K = \frac{R_{\text{average}} + G_{\text{average}} + B_{\text{average}}}{3}$ 為影像調整參數；R、G、B 為轉換前各灰度值之強度； R_{average} 、 G_{average} 、 B_{average} 為整張影像之平均強度；R'、G'、B' 為轉換後各灰度值之強度。

2.2.2 去霧處理基本原理

在室外拍攝影像時，有時因為氣候不佳或大氣的吸收與光源的散射會造成影像有霧化的情形，造成影像對比度與色彩辨識度有失真的情形，此時會造成資訊的損失，因此必須進行去霧處理。

霧化影像拍攝當下，相機所接收之輻射值比一般情況低，起因於大氣光量被環境散射光量所替代，此時的環境散射光量即為霧光(airlight)。霧光的多寡端視於景深，因此去霧處理的程序與景深有密切的相關，目前廣泛用來描述霧化影像資訊的方程式如下：

$$I(x)=J(x)t(x)+A(1-t(x)) \quad (2.9)$$

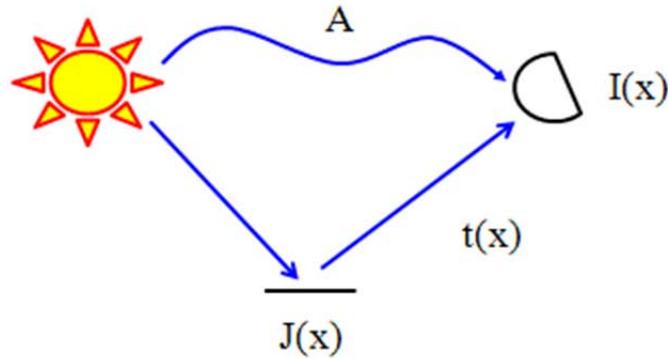


圖 2.7、太陽輻射消散示意圖

$I(x)$ 為欲改正影像畫素 x 之輻射值， $J(x)$ 為景色輻射量或改正後之輻射量， A 為大氣光源消散量， t 為媒介傳輸量。去霧處理主要目標為輸入影像 I 與參數 A 與 t 修復去霧後的影像 J ，其中 $J(x)t(x)$ 稱為直接衰減(Direct Attenuation)，用來描述景色輻射量與在傳輸媒介中的衰減程度； $A(1-t(x))$ 稱為霧光(Air light)，用來描述原始光源大氣折射的程度。其中 $t(x)$ 代替了相機所攝取到除了大氣消散外之光量，可由以下方程式表示：

$$t(x)=e^{-\beta d(x)} \quad (2.10)$$

β 為光經過傳輸媒介之消散係數， $d(x)$ 為景深。

近年來去霧處理之議題引起大眾興趣，相關文獻提出了多種方法，但對於霧氣與未知景深之關係仍然為目前正在探討的地方，目前提出的不同方法有單張影像去霧方法、多張影像去霧方法或使用者輸入影像去霧方法等。在此論文中使用的為 Tang et al.(2009) 提出的單張影像去霧方法-Dark Channel Prior，簡要為幾個步驟：

- (一) 將輸入影像分段，每一段約略有相同的景深
- (二) 一個貢獻方程式可估計大氣光或相機接收到的傳輸量值
- (三) 使用 soft matting 方法優化傳輸量圖
- (四) 優化後之傳輸量圖對應影像輻射值得到去霧處理後之影像

Tang. et al. (2009)提出 Dark channel prior 理論，單指對單張影像進行去霧處理。觀測

戶外無霧化影響之影像，非天空範圍的區域會有一些像元在 RGB 三個波段至少會有一個波段之輻射量擁有低強度，這些波段就稱為 Dark channel。

首先利用 Dark channel prior 方法估計大氣光量，藉由無霧化影像之 J 值趨近於 0 之假設推導傳輸量圖，最後使用 soft matting 方法優化影像。Soft matting 之程序主要為先限制一小區域，由已知鄰近灰度值或反覆執行非線性 α 檢定推估前色與背景色，當 matting 方程式導出之 α 示意圖與霧化模型推導之傳輸量圖相似時，藉由適當的調整可用來優化傳輸量圖。

其中 softmatting 之程序主要為截取影像之一部分，由已知前景深與背景深的像素推估 α map，以 α 值替代傳輸量 $t(x)$ 。

$$I(x)=J(x)t(x)+A(1-t(x)) \rightarrow I(x)=F\alpha+B(1-\alpha) \quad (2.11)$$



圖 2.8、去霧處理流程圖

施伶蓀(2011)使用農林航空測量所於民國 94 年拍攝之東沙環礁數值影像進行測試，如圖 2.9，可以發現在去霧處理後，色彩增顯及視覺效果有所改善，因此選用去霧處理對於影像日光返照之改正進行測試。

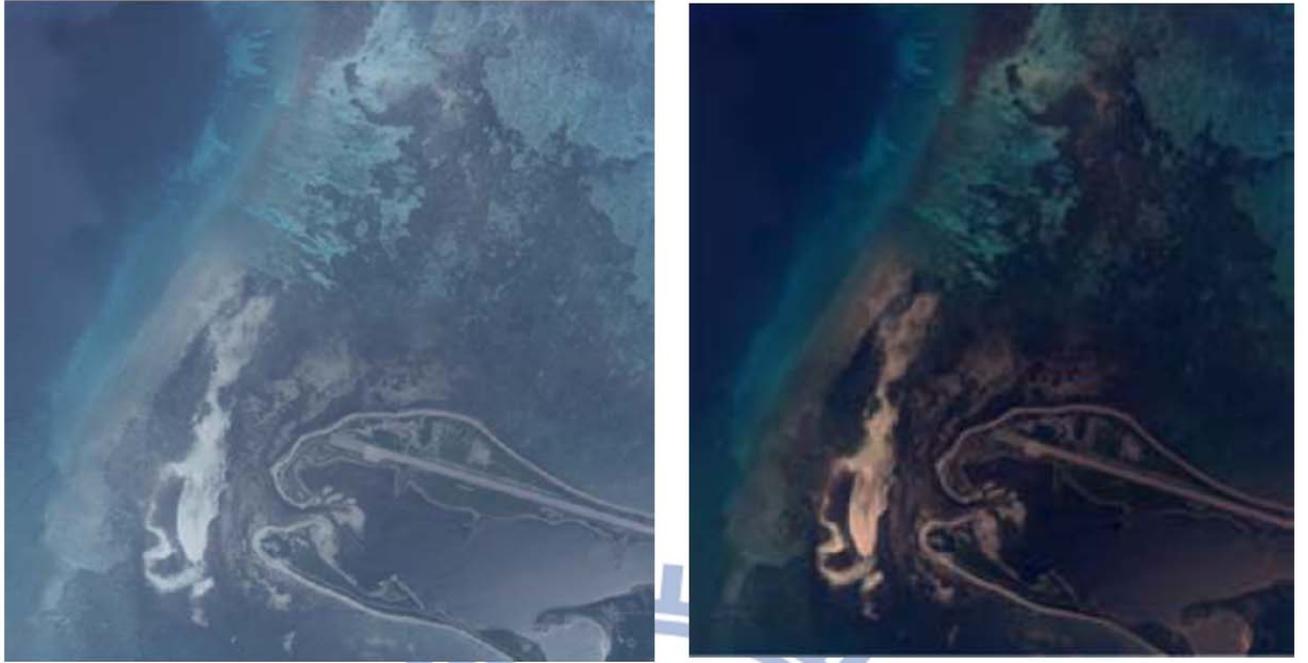


圖 2.9、去霧處理前後之影像

2.2.3 經驗模態分解原理

Huang et al.(1998)提出一維經驗模態分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)，可以用來處理非線性或非平穩訊號，在醫學及地震訊號分析方面是一個很有效的方法，主要利用輸入資料內部變化的時間尺度進行頻率分解，可分解出數個基底訊號稱為內建模態函數(Intrinsic Mode Functions, IMF)，這些分量主要為原始訊號經由稱為篩選程序(sifting process)的演算法後得之。

2.2.3.1 一維經驗模態分解

EMD 分解基於 3 個篩選條件：

- (1) 數據最少有兩個極值，一個最大值和一個最小值。
- (2) 數據的時域局部特徵由極值點間的時間差值定義。
- (3) 如果數據沒有極值點但有轉折點出現，可對數據進行一次或多次微分求得極值，再積分獲得分解結果。

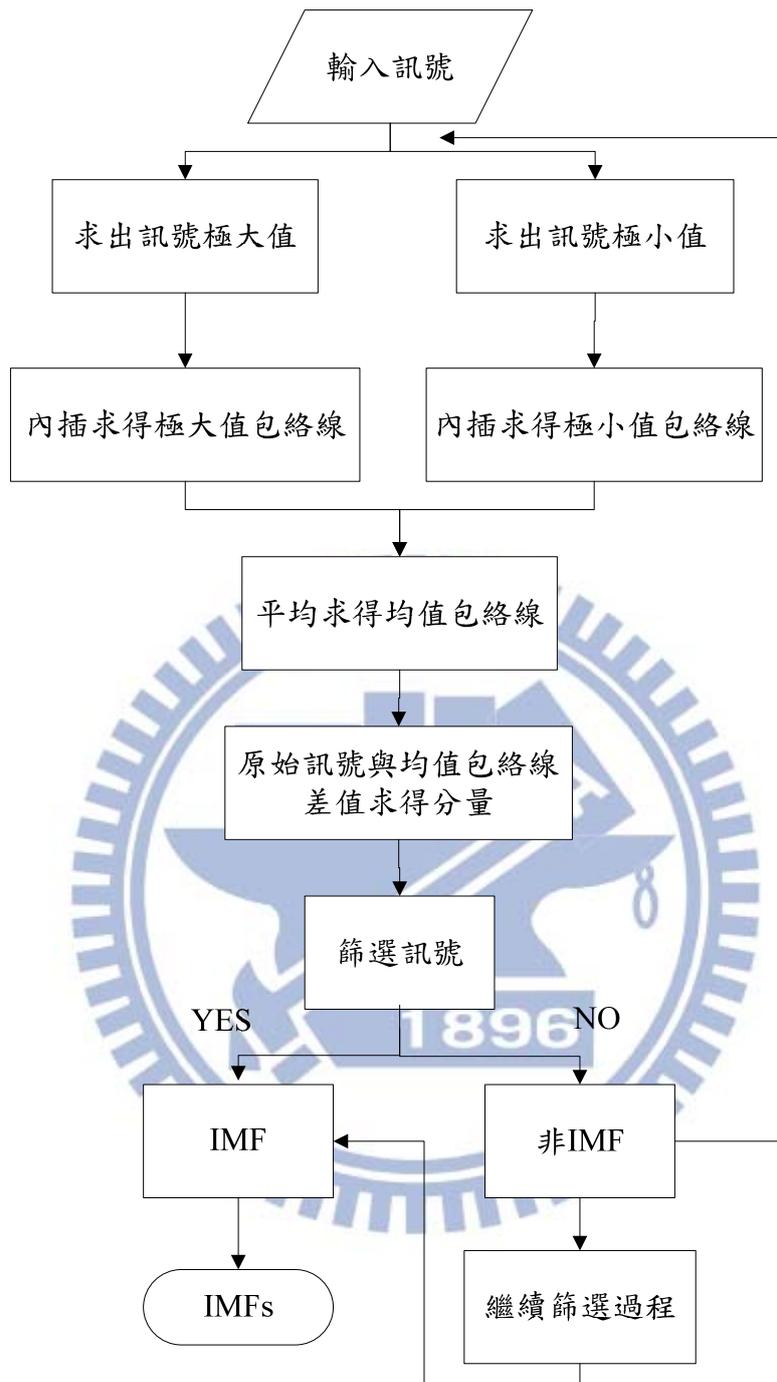


圖 2.10、EMD 架構流程圖

Huang et al.(1998)認為 IMFs 須滿足兩個條件：

- (1)函數在整個範圍內，每個 IMF 局部的極值點及跨零點數目必須相同或相差一個。
- (2)在任意時刻點，局部最大值包絡線(上包絡線)與局部最小值(下包絡線)之平均值需為 0，並且每個 IMF 對稱於局部平均線。

2.2.3.2 二維經驗模態分解

EMD 基本原理主要適用於與時間相關之函數，如潮汐之變化及音調之分析等等，對於處理二維影像時可以保有 EMD 能處理非線性及非穩態資料之特性，以二維影像之行數(或 pixel 數)替代原來的時間作為橫軸。

BEMD 之假設類似於 EMD 如下：

- (1) 二維平面至少包含一個極大值和一個極小值，或是整個平面沒有極值點但是可以進行一階或多階求導數運算後得到極值點。
- (2) 特徵尺度由極值間的距離差值定義。

Pei (2007)將餘數 r_n 視為光場分布趨勢，藉由線性轉換將原始影像光影移除，如下式表示：

$$\begin{aligned} \text{Gain}(x,y) &= I(x,y) - r_n(x,y) \\ I'(x,y) &= \text{Gain}(x,y) * 255 \end{aligned} \quad (2.12)$$

其中 $I(x,y)$ 為原始影像； $r_n(x,y)$ 為光場分布影像； $I'(x,y)$ 為移除光影後之影像。

2.2.3.3 實驗過程

如圖 2.11 所示，將原始影像 RGB 空間轉為 HSV 色彩空間，且投影到 XY 平面，取出影像對應灰度值點的亮度(Value)為 Z 座標值。找出影像亮度的局部極大值與局部極小值，對找出之散亂極值點進行平面 Delaunay 三角剖分，曲面擬合後得到局部極大值包絡線與局部極小值包絡線，並求其均值包絡線。

將原始影像亮度減去均值包絡線，檢查是否滿足篩選程序結束條件，若滿足則結束程序得到 IMFs，檢查殘餘項是否滿足影像分解結束條件(殘餘項已為常數無法再分解)，若滿足則輸出各層結果並結束，若不滿足則繼續篩選過程。由 IMFs 或殘餘項可以找到相應之特徵或趨勢，扣除該趨勢項即可得到改正影像。

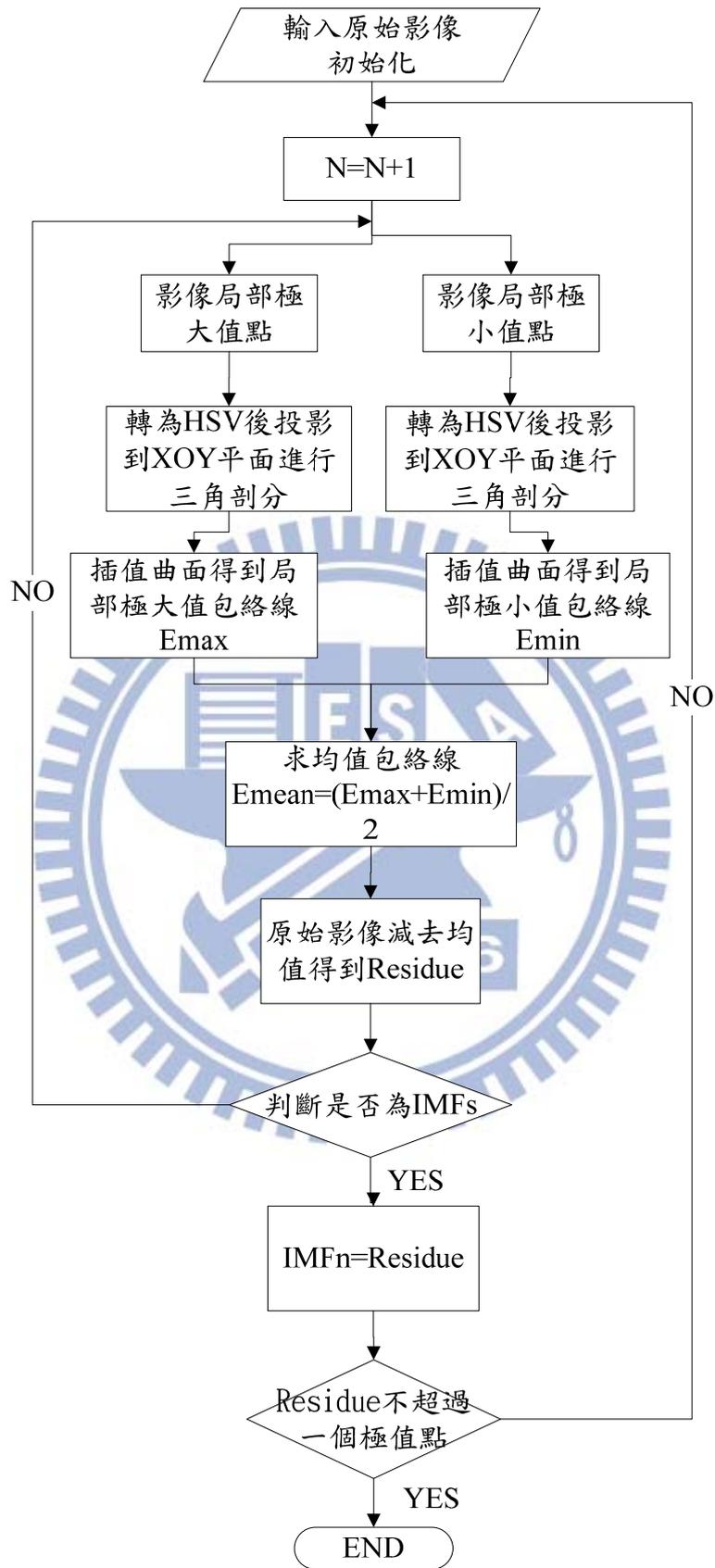


圖 2.11、BEMD 分解流程圖

2.2.3.4 散亂極值點形成包絡面方法-Delaunay 三角網

Voronoi 圖形由許多多邊形集合而成，每個多邊形包含一個點，由圖 2.12(a)可發現將圓心連接後即為 Voronoi 圖形，每個多邊形都包含一個點集合的點，將共邊區域中的點互相連接即構成 Delaunay 三角網。

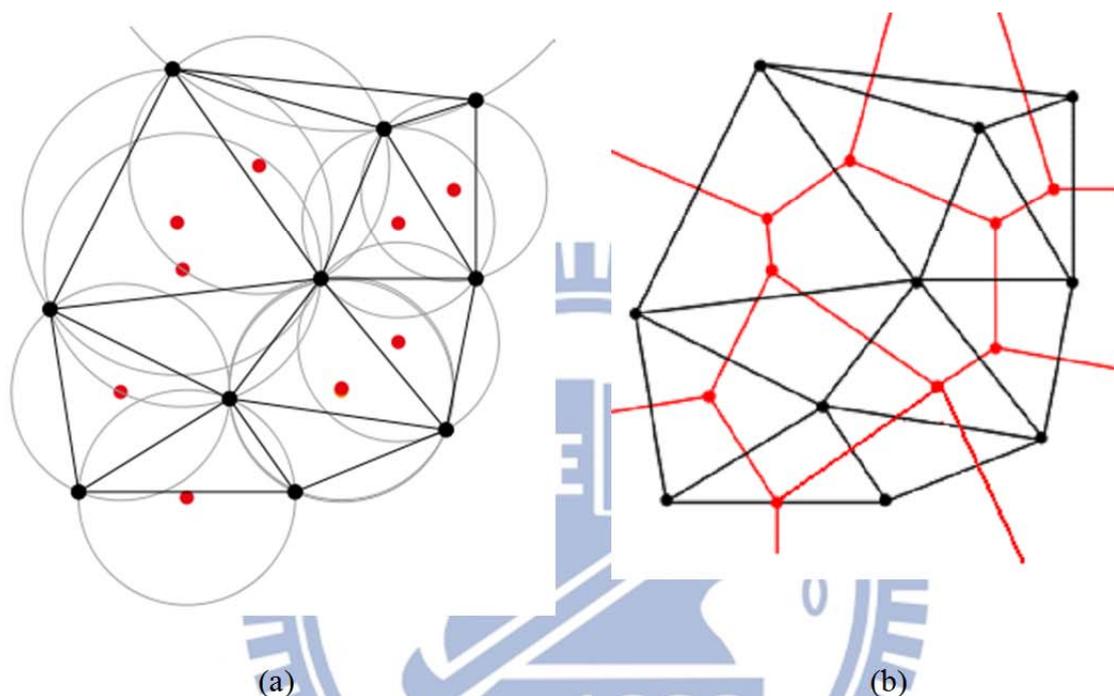


圖 2.12、(a)紅點為眾圓之圓心，黑線為圓上任意三點連成之 Delaunay 三角網

(b)將(a)之紅點連起來為 Voronoi 圖形(Wikipedia, 2012b)

Damerval et al. (2005)提出在二維經驗模態分解篩選過程中採用 Delaunay 三角網與立方曲線插值(Cubic spline interpolation)擬合成包絡面。

將平面上之離散點最大值集合 $D_{\max} = \{P_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ ，平面外圍邊界點連接成之線段集合 $L = \{q_i = \overline{P_i P_j} | i \neq j, 1 \leq i, j \leq N, P_i, P_j \in D\}$ ， L 集合中任一線段 q_i 能與離散點集合 D 中至少一個點構成三角形，以便分割成 Delaunay 三角網。取 $q_1 = \overline{P_1 P_2}$ ，以下列算式計算出極大值點分割區域 R_{\max} ：

$$R_{\max} = \{P_i \in D, \min_{q_i \in L} \|P_i - q_i\|_2 \leq \sqrt{\frac{1}{|D_{\max}|}}\} \quad (2.13)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 為向量歐幾里得長度(Euclidean norm)，可在離散點集合 D 中找到一個點 P_3 組

成最佳三角形 $\Delta_1 = \Delta P_1 P_2 P_3$ ，此時能再分割之區域為 $R_1 = R - \Delta_1$ ，將 R_1 繼續重複步驟得到 $R_2 = R_1 - \Delta_2$ ，直到分割 n 次後 $R_n = R_{n-1} - \Delta_n = \phi$ (空集合)，則得到整個極大值點分割區域 R_{max} 的 Delaunay 三角網。

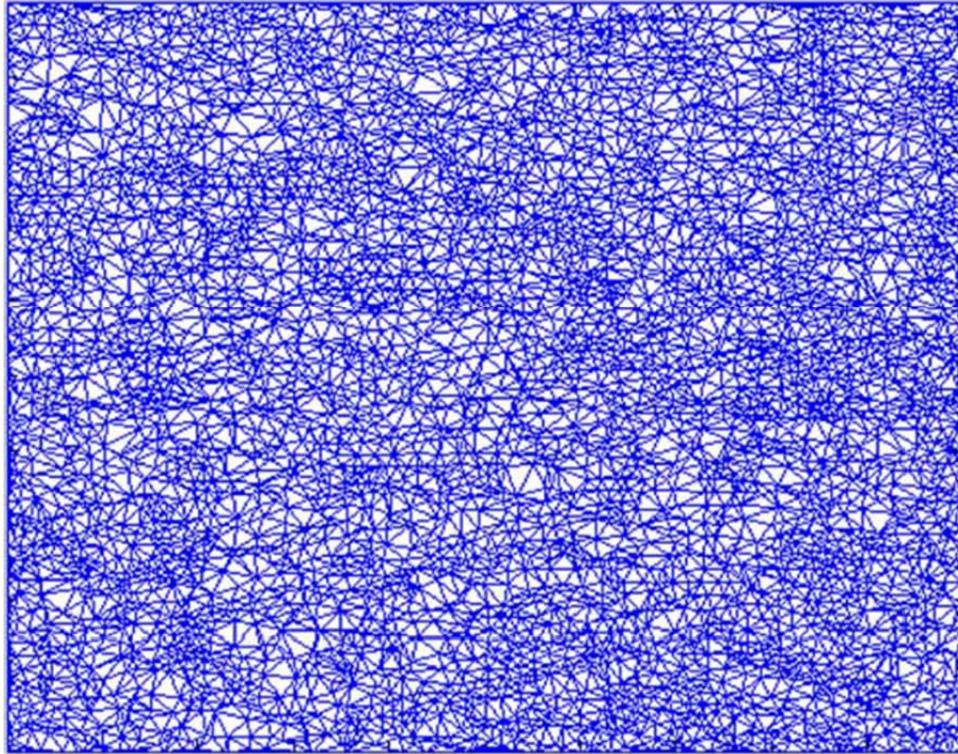


圖 2.13、Delaunay 三角網示意圖(胡瑤婷, 2012)

2.2.3.2 取得 IMF 之過程

取得 IMFs 的方法是從原始訊號經由不斷的篩選程序(Sifting process)擷取出來，首先初始原始訊號： $X_0(t) = f(t)$ ，此時篩選程序會找出訊號中所有局部極大值與局部極小值，組成 Delaunay 三角網後再利用立方曲線(Cubic spline)內插連接所有局部極大值為上包絡線，同樣亦連接所有局部極小值為下包絡線，由圖 2.18 可看出整個訊號資料會介於在局部極大值包絡線及局部極小值包絡線之間。接著將局部極大值包絡線與局部極小值包絡線取平均得到均值包絡線 m_1 ，將原始訊號 $X_0(t)$ 減去均值包絡線後的第一個分量稱為 h_1 ，如方程式所示：

$$X_0(t) - m_1 = h_1 \quad (2.14)$$

第二次的篩選程序將 h_1 視為原始訊號，重複執行篩選程序 k 次後，直到 h_{1k} 為 IMF 為止。因為篩選過程符合了 IMFs 的定義要求， h_1 理論上應為 IMF，但是實際上原始訊號常常會有突然遽變的情況，在執行篩選程序後可能會有新的極值的產生，甚至於先前的極值有過度誇張的情況。在立方曲線插值後有些平均值可能為小數值，無法每次符合前述 IMFs 符合條件(在任意時刻點，局部最大值包絡線與局部最小值之平均值需為 0)，需對其定義一個誤差範圍。

篩選過程中可以平滑不平整的振幅，但是重複篩選程序到達某一程度時可能會除去部分具有物理意義的振幅擾動，必須決定讓篩選程序停止的收斂條件，確保 IMFs 之振幅與頻率變動依然符合物理意義。收斂條件簡述為：

- (1) 跨零點總數與局部極值點總數必須相等。
- (2) 標準偏差值(Standard Deviation, SD)設定在 0.2~0.3 之間，

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2} \right] \quad (2.15)$$

當滿足兩個收斂條件之一則停止篩選程序得到第一個 IMF，則停止此篩選程序，繼續進行下一個 IMF 的篩選程序。若 c_1 為訊號中最好的時間尺度或最短周期的分量， r_1 可以從原始訊號中分解出，如下式表示：

$$X(t) - c_1 = r_1 \quad (2.16)$$

將 r_1 視為新的訊號繼續進行篩選程序，

$$r_1 - c_2 = r_2$$

$$r_2 - c_3 = r_3$$

•

•

$$r_{n-1} - c_n = r_n \quad (2.17)$$

篩選過程中利用收斂條件停止動作，當 r_n 變成常數或單調函數無法再分解出 IMF 就會停止篩選程序，最後的殘餘項會是不對稱的訊號值，也就是訊號的趨勢(trend)。因

此原始訊號可分解成 n 個經驗模態與趨勢或常數，如下式表示：

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (2.18)$$

由圖 2.14 可看出第一個 IMF 分量 IMF1 頻率最高，EMD 方法會將最高的頻率分量分解出來，再分解次高的頻率分量，分解隨訊號波型的動態變化而變化，因此分解出來的 IMF 分量更能真實的表現原始訊號的頻率特徵，具有自適應的特性。

圖 2.15~圖 2.20 為訊號 EMD 分解的一次篩選過程，由原始訊號得到局部極大值與極小值，由極值內插得到局部極大值及極小值包絡線，將其平均後得到均值包絡線，原始訊號扣除均值包絡線即得到篩選結果，再由結果檢查是否符合 IMFs 條件決定是否繼續分解。

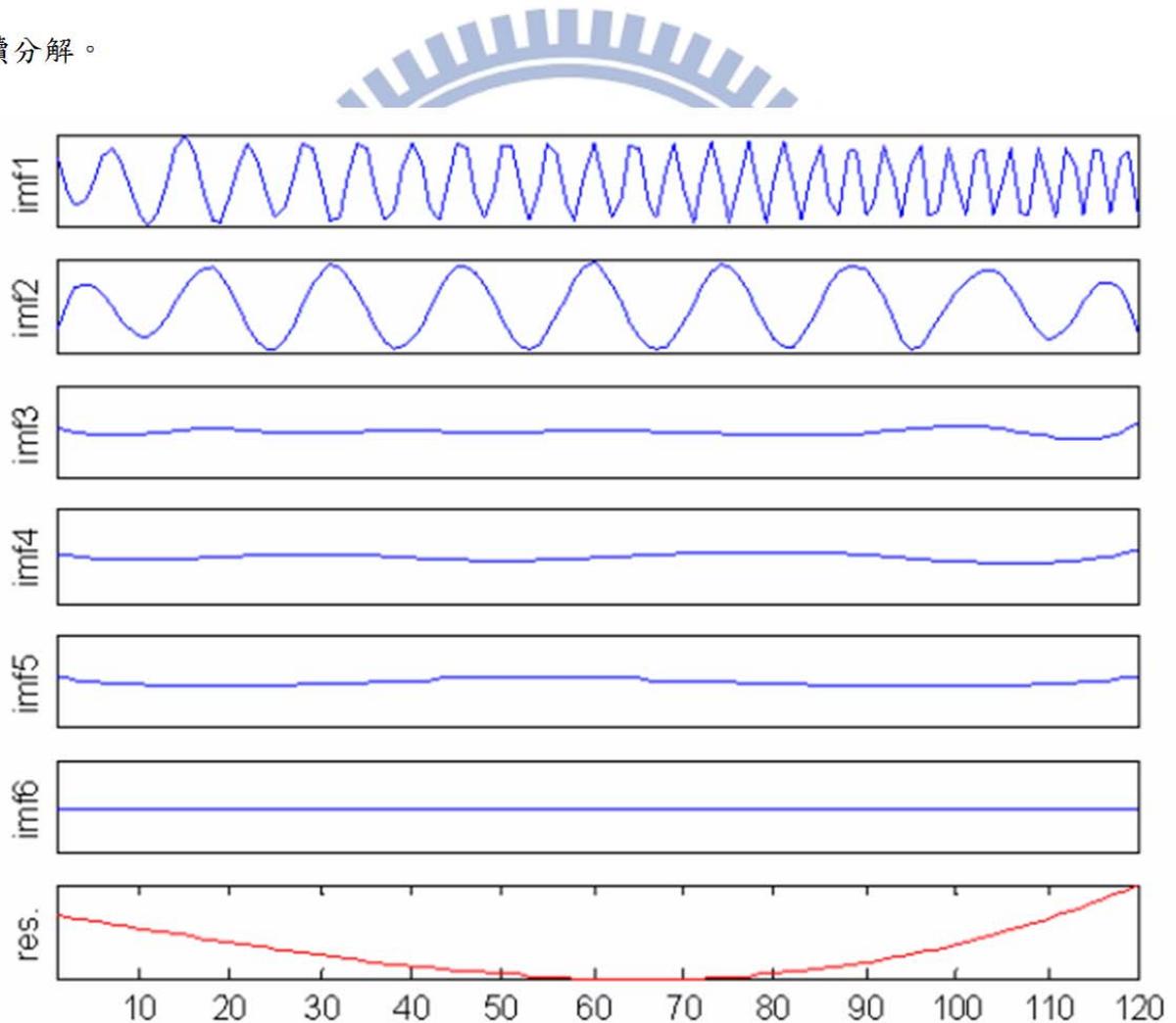


圖 2.14、EMD 分解示意圖(Huang,1998)

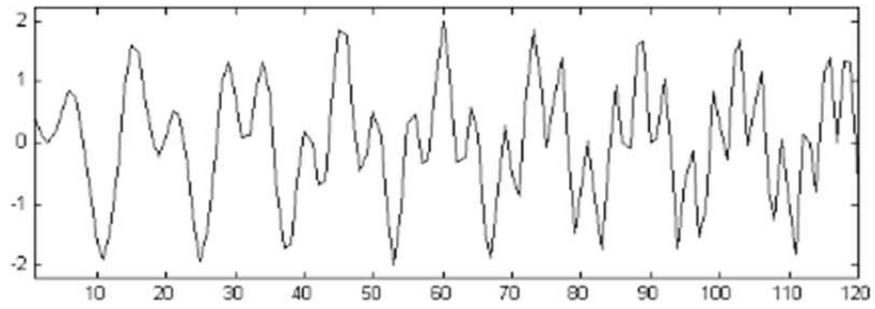


圖 2.15、待分解的原始訊號

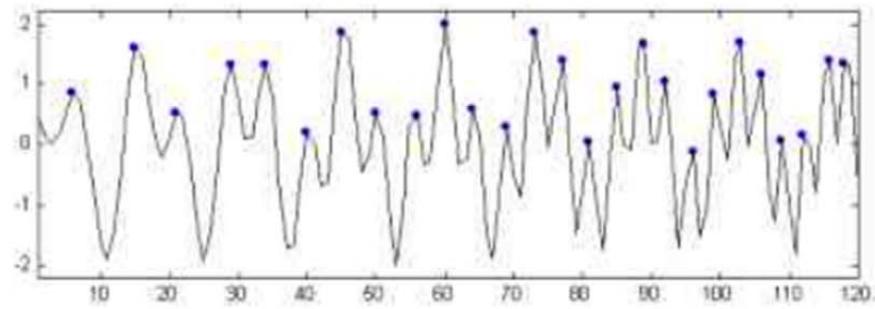


圖 2.16、尋找局部極大值點

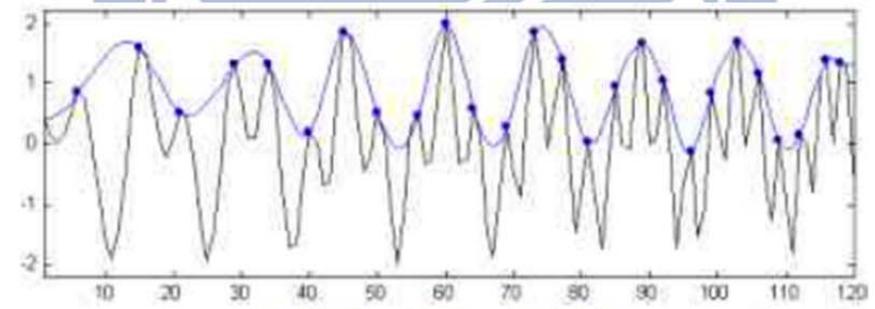


圖 2.17、插值得到局部極大值包絡線

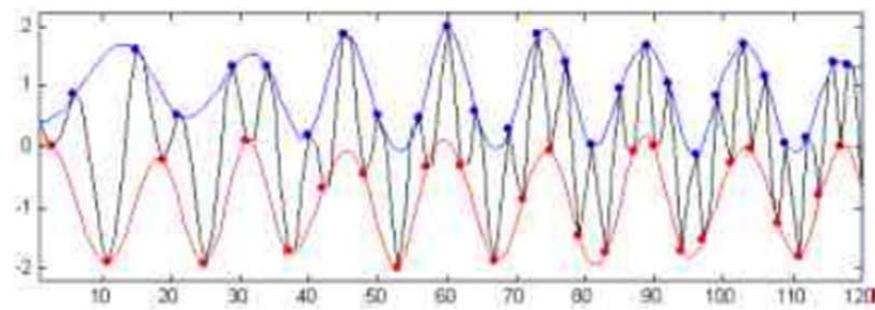


圖 2.18、插值得到局部極小值包絡線

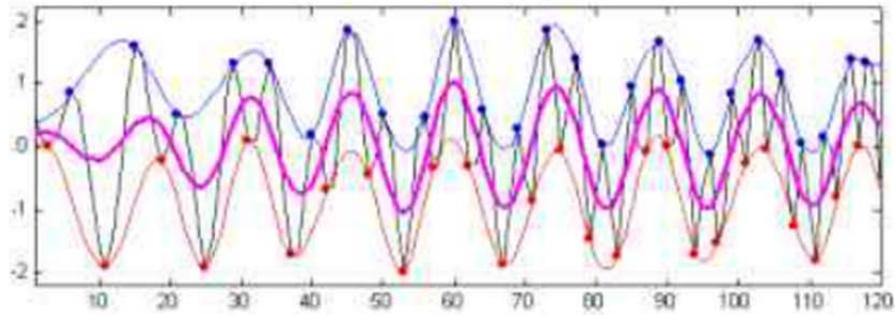


圖 2.19、將局部極大值與極小值包絡線平均後之均值包絡線

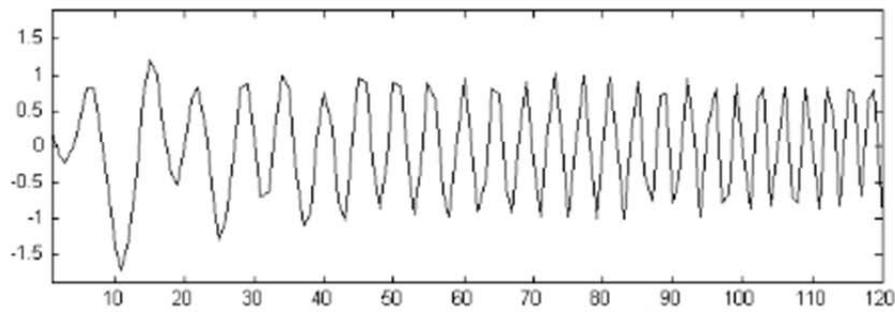


圖 2.20、原始訊號減去均值後之餘項

2.2.3.4 HSV 色彩空間

為了單獨對日光返照進行二維經驗模態分解，將原始影像的 RGB 色彩空間轉換為 HSV 色彩空間。HSV 色彩空間由 RGB 色彩空間經過一個非線性的轉換，HSV 分別表示 Hue(色調)、Saturation(飽和度)及 Value(亮度值，亦稱為強度)，如圖 2.21。其中 Hue 表示基本的色彩，由光譜波長區分依序由紅色光到紫色光再回到紅色，圓柱座標為週期性，只需規定其中一個角所對應之色彩，將顏色座標類比於角度座標，以 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 表示；Value 指在灰階上的亮度值；Saturation 指色彩的純淨度。

就亮度值(Value)而言，降低亮度為保留相同比率但是減少各原色數值，增加亮度為保留相同比率但是增加各原色數值，直到某一原色到達最大值 255 為止，其餘亮度值可能繼續增加，顏色可能開始失真。依一般視覺感官而言，當物體亮度增加時，感覺色彩會偏淡，因此 HSV 色彩空間適合對亮度做微觀調整之測試。

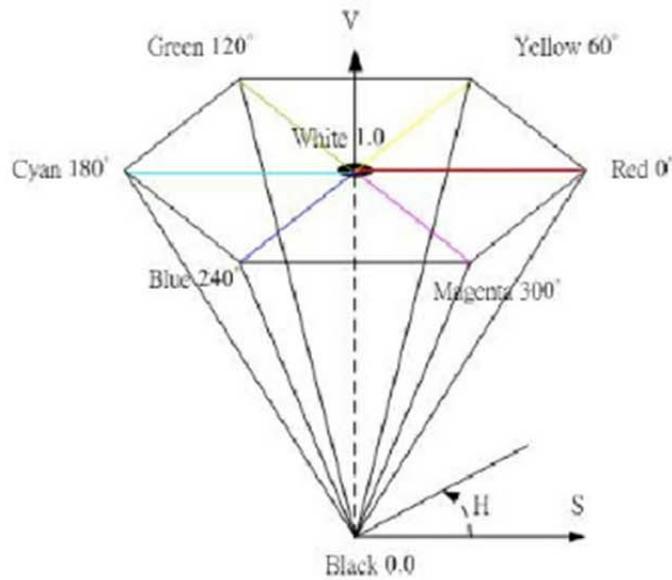


圖 2.21、HSV 色彩空間示意圖

2.3 利用近紅外波段資訊進行校正

部分遙測影像有近紅外波段(Near Infrared, NIR)資訊，例如 Worldview 或 Quickbird 等衛星所拍攝之影像，因為近紅外波段會被水體所吸收，因此可以使用近紅外資訊與其他波段資訊之關聯性，藉以改正其他波段。

Hochberg et al. (2003)提出了兩個基本假設：

- (1) NIR 波段之亮度幾乎只受日光返照及一個周圍環境常態(ambient)影響。
- (2) 可見光波段與 NIR 波段於日光返照區域之亮度存在線性關係。

紀錄整張影像在 NIR 波段裡最高及最低的兩個灰度值，因為在無日光返照影響時此兩個灰度值之光譜特性是相同的；對於地面及雲層區域進行遮罩(masking)以防止亮度最高的灰度值可能在地面或雲層上，但此方法對於較大影像($> 10^6$ pixels)耗費時間且困難。文獻中建議使用一系列擁有均勻底質及同一深度之影像以改善兩個灰度值的不一致性所導致之誤差，但依然無法改善只依賴兩個灰度值的不精確，因為一個小的物件(例如一艘船)或遮罩時的錯誤都可能使一個畫素變成整張影像在 NIR 波段亮度最高的畫素。

Hedley et al. (2005)為了改善 Hochberg et al. (2003)只使用兩個畫素所推導之線性關

係的不精確，對於整張影像採樣進行 NIR 波段與可見光波段亮度的線性回歸以建立線性關係，X 軸為 NIR 波段之亮度而 Y 軸為可見光各波段之亮度，由圖 2.22 可看出其線性關係，找出 NIR 波段與可見光各波段 i 之斜率 b_i ，則每個灰度值可由以下算式進行改正：

$$R_i' = R_i - b_i(R_{NIR} - \text{Min}_{NIR}) \quad (2.19)$$

R_i 、 R_i' 為每個可見光波段之畫素改正前後亮度值， R_{NIR} 為該畫素 NIR 波段之亮度值， Min_{NIR} 可視為無日光返照影響也就是等同於在環境常態下拍攝。

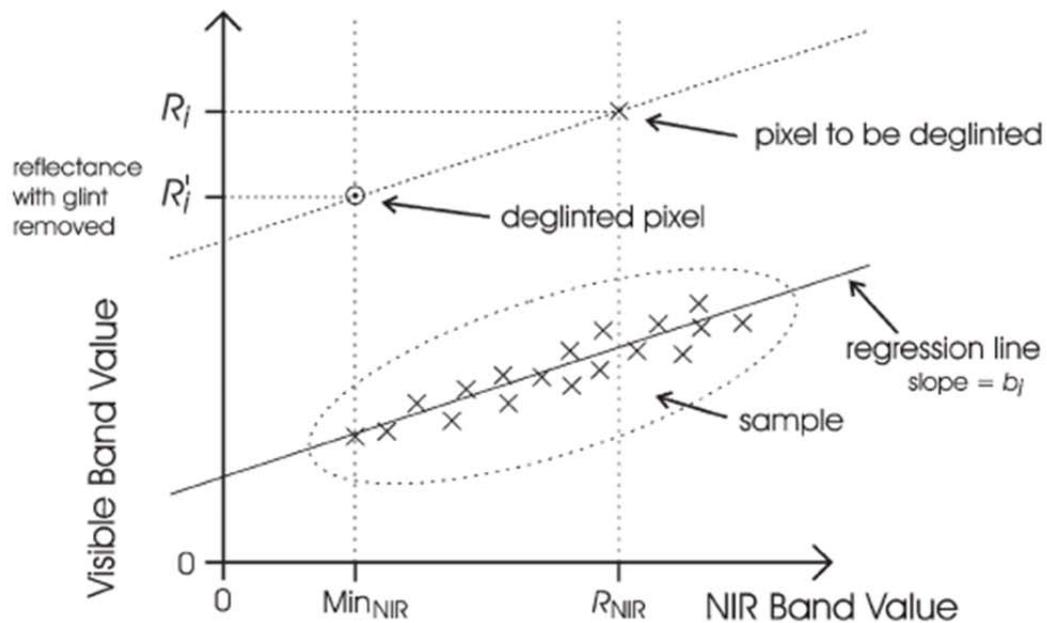


圖 2.22、可見光波段與近紅外波段亮度之線性關係(Hedley, 2005)

測試影像為銳梯科技公司提供之 WorldView2 影像，拍攝日期為 2010 年 8 月 11 日，拍攝地點為南洋群島之一的永興島，為多光譜八波段影像(Red、Green、Blue、NIR1、Red-Edge、Coastal、Yellow and NIR2)，使用近紅外波段(NIR1)資訊對影像進行日光返照改正。

進行影像讀取後，使用 ENVI 軟體之”ROI Tool”將有日光返照之區塊選取後裁切及儲存，在”ROI Tool”點選”basic stats”紀錄近紅外波段資訊；同樣在”ROI Tool”選取”Subset data using ROI”，即為利用 ROI 範圍內的灰度值產生一個新的影像，將此影像儲存為 ASCII 檔案。點選”Spectral Subset”個別選取每一個波段將光譜資訊分別儲存為 XYZ 格

式，接著進行對於欲改正日光返照之波段與近紅外波段之線性回歸。

使用輔助工具 Microsoft Excel 進行線性回歸，開啟先前儲存每個波段的光譜資訊之 ID、UTM 座標及 DN 值，令 X 軸為近紅外波段 DN 值且 Y 軸為其餘波段 DN 值進行線性回歸，紀錄每個離散圖趨勢線之斜率。

影像中欲改正日光返照影響之波段 i 及相對應近紅外波段 DN 值之趨勢線斜率 b_i ，假設近紅外波段 DN 值最小值為 0，則可得改寫算式 2.19 如下：

$$R_i' = R_i - b_i(R_{NIR}) \quad (2.20)$$

在 ENVI 工具列選取 Basic Tools→Band Math，在視窗輸入計算式，例如使用 IKONOS 影像總共 4 個波段，近紅外波段為第 4 波段，對應其他三個波段 DN 值之趨勢線斜率計算後為 0.6538、1.2235、0.8982，選取 $b_1 \sim b_4$ 對應之光譜資訊檔案後則可在 Band Math 輸入：

$$\begin{aligned} & \text{float}(b_1) - 0.6538 * \text{float}(b_4) \\ & \text{float}(b_2) - 1.2235 * \text{float}(b_4) \\ & \text{float}(b_3) - 0.8982 * \text{float}(b_4) \end{aligned} \quad (2.21)$$

最後輸出即為日光返照處理後之影像，如圖 2.23 紅色框框所選取之兩個測試區域 (圖 2.24(a)、(c))，在經由上述處理過程後之結果為圖 2.24(b)、(d)。由圖 2.24(b) 可發現若衛星拍攝時有雲層之情況，此方法會造成過度改正；由圖 2.24(d) 可發現日光返照所造成之亮紋在處理後的确有很大的改善。

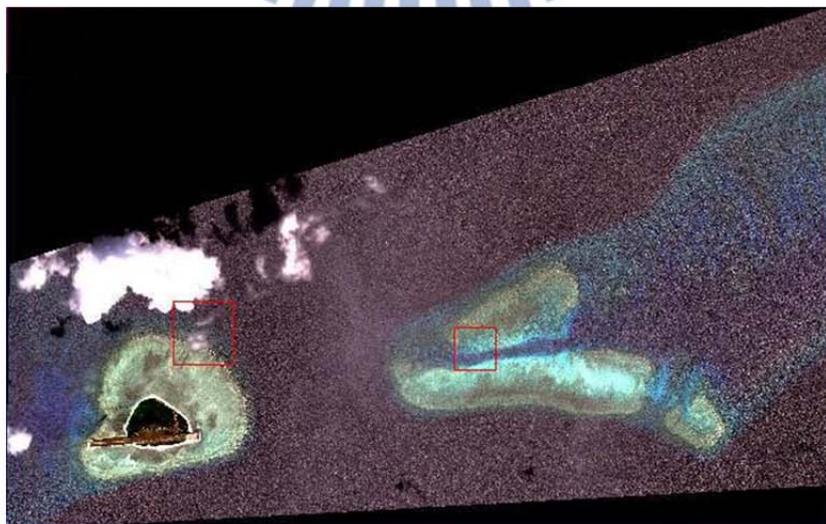
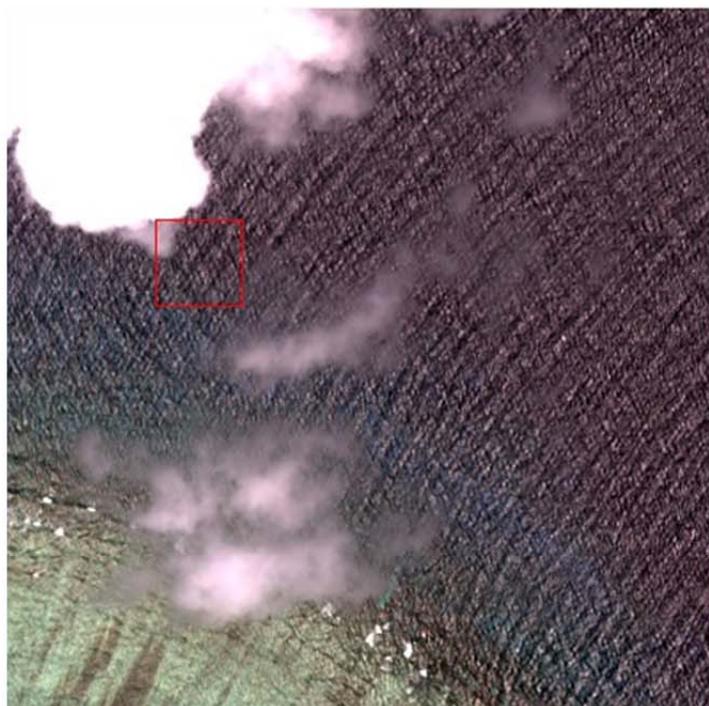
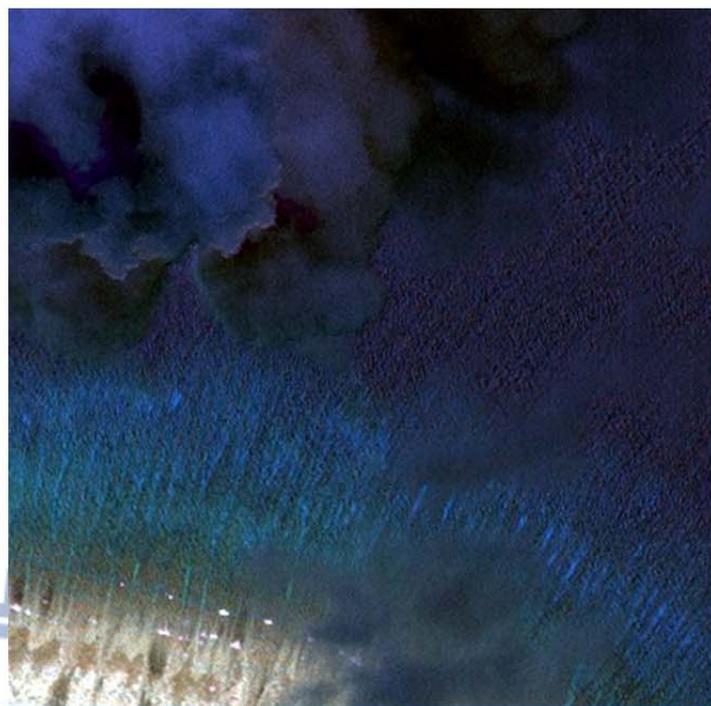


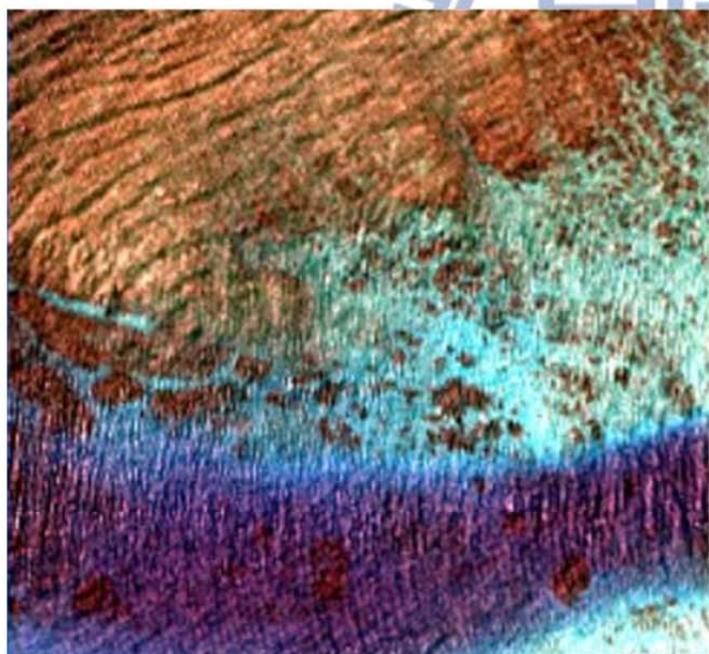
圖 2.23、永興島 Worldview2 原始衛星影像(銳悌科技，2010)



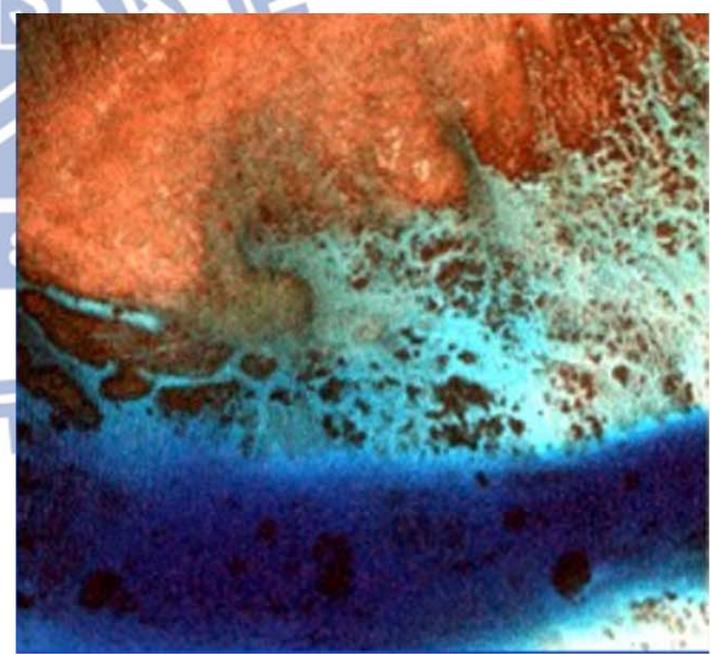
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2.24、(a)、(c)為原始影像圈選之測試區域，(b)、(d)為處理後之影像結果

2.4 影像品質指標

主觀評估以人眼感官判定影像處理後結果之優劣，客觀評估則使用統計方法對於影像結果之數據進行量化。此篇研究主要以探討日光返照為主，因此只對影像亮度值進行統計計算。統計指標值之高低不能代表影像處理結果之優劣，只能對於人眼感知外提供參考，若人眼無法判別兩種方法影像之結果差異，可以參考統計指標值高低比較優劣。

本研究主要討論影像亮度變化，主要希望在處理亮度不均情況時仍然可以保留原始影像之色彩或結構，以防止失真，因此採用常見比較影像品質優劣的統計指標，以下列舉均方根誤差(RMSE)、峰值訊號雜訊比(PSNR)及結構相似性指標(SSIM)，不使用標準化互相關法(NCC)之原因為測試影像為灰度值較為均調之海域，相關係數最大值難以確認。

(一)平均值(Mean)

利用平均值可以得知在影像處理前後亮度變化情形，其平均值越大表示影像整體亮度提高，反之，其平均值越小表示整體亮度降低。將影像 R、G、B 波段分別取平均，可用來比較其色偏情形。

$$\mu = \frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_k(i,j)}{3MN} \quad (2.21)$$

其中 M,N 為影像行列數； $I_k(i,j)$ 為影像第 k 波段在位置 (i,j) 的亮度值。

(二)均方根誤差(Root-Mean-Square Error, RMSE)

均方根誤差(RMSE)常用來量測精度，可以比較原始影像與處理後影像之差異。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2} \quad (2.22)$$

(三)峰值訊號雜訊比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)

峰值訊號雜訊比(PSNR)一般使用在影像壓縮前後的品質比較，亦常用在檢查影像處理後品質，確認該處理程序之適當程度。峰值訊號雜訊比之計算方式如下：

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (2.23)$$

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \right) \quad (2.24)$$

其中 MSE 為兩張影像 $I_{m \times n}$ 、 $K_{m \times n}$ 間的均方誤差， MAX_I 為灰度值最大值(一般設為 255)，PSNR 值之單位為 dB。

PSNR 為目前廣泛使用於比較影像品質的統計指標，影像之 PSNR 值大約在 30~50dB 之間，若在 30dB 以下表示為人眼無法接受，一般 PSNR 值越高表示影像品質越好，但是 PSNR 值無法與人眼感知結果一致，有可能 PSNR 較高者在人眼感知反而品質比 PSNR 較低者差，因為人眼感官對於誤差的敏感度受許多因素影響而非絕對。

(四)結構相似性指標(Structural similarity, SSIM)

結構相似性指標一般用來衡量兩張影像之相似程度，當以一張影像為無失真影像，另一張是否為失真影像，則可由結構相似性判斷失真程度，相較於傳統影像品質指標，例如峰值訊號雜訊比(PSNR)，更能符合人眼對於影像品質之判斷。

Wang(2004)提出之結構相似性指標之性質主要如下：

- (1)指標值有對稱情形，亦即 $SSIM(x,y)=SSIM(y,x)$ 。
- (2)指標值有界限， $-1 \leq SSIM \leq 1$ ；當結構完全相同時， $SSIM=1$ 。

由影像結構來看，影像如同由亮度、對比度及結構三個部分組成，結構相似性指標之計算以平均值(Mean)估計亮度，以標準差(STD)估計對比度，以共變異相關係數估計結構相似度。計算步驟如下：

Step1：

若 x 為原始影像， y 為處理後之影像，平均值 μ_x 、 μ_y 估計了原始及處理後影像之亮度值。

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (2.25)$$

其中 N 為影像灰度值數目； x_i 為影像灰度值； y_i 為處理後影像灰度值。

結構相似性指標中亮度估計值 $L(x,y)$ 計算方式如下：

$$L(x,y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (2.26)$$

其中常數 C_1 之作用為防止 $\mu_x^2 + \mu_y^2$ 之值趨近於零，定義 $C_1=(K_1L)^2$ ， $K_1=0.01$ ， $L=255$ 。

Step2 :

結構相似性指標中對比度由標準差 σ_x 、 σ_y 估計，對比度估計值 $C(x,y)$ 計算方式如下：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}{N-1}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2}{N-1}}$$

$$C(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (2.27)$$

其中常數 C_2 之作用為防止 $\sigma_x^2 + \sigma_y^2$ 之值趨近於零，定義 $C_2 = (K_2L)^2$ ， $K_2 = 0.03$ ， $L = 255$ 。

Step3 :

結構相似性指標中結構相似度由兩張影像之共變異相關係數 $Cov(x,y)$ 估計，結構相似性量化後之估計值 $S(x,y)$ 計算方式如下：

$$Cov(x, y) = \sigma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{N-1}$$

$$S(x, y) = \frac{Cov(x,y) + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (2.28)$$

其中常數 C_3 之作用為防止 $\sigma_x\sigma_y$ 之值趨近於零，定義 $C_3 = C_2/2$ 。

Step4 :

由亮度估計值 $L(x,y)$ 、對比度估計值 $C(x,y)$ 及結構相似性估計值 $S(x,y)$ 將結構相似性指標(SSIM)定義為：

$$SSIM(x, y) = [L(x, y)]^\alpha [C(x, y)]^\beta [S(x, y)]^\gamma \quad (2.29)$$

當 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 時，上式 $SSIM(x,y)$ 值可以表示為：

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (2.30)$$

3. 研究資料

本研究使用兩組影像，第一組測試影像在 2010 年 9 月 21 日於東沙島區域拍攝，搭載 AHAB HawkEye II 光達系統及 IDE UI-2250SE 數位相機(圖 3.1)，航線規劃參數與相機規格如表 3.1 及表 3.2，影像航線、編號及其他資訊如表 3.3。



圖 3.1、IDE UI-2250SE 數位相機(IDE, 2010)

表 3.1、東沙地區航線規劃參數

參數項目	東沙地區
測點密度	3.5×3.5公尺
航高	400公尺
航速	150節
帶寬	160公尺
範圍	450平方公里
總計航線	183條
工作時程 (飛行小時)	22小時 (由東沙機場起降)

表 3.2、相機規格

相機規格項目	IDE UI-2250SE數位相機
解析度	1600×1200
感測器大小	1/1.8"
灰度值大小	4.4 μ m
焦距	12mm

表 3.3、實驗影像資訊

影像	航帶	編號	像素
A	32	36924340165	1600×1200
B	31	32432020013	1600×1200
C	19	62096010166	1600×1200
D	19	62096010164 62096010165 62096010166	1823×1349

第二組測試影像為農航所於民國 94 年拍攝之東沙環礁航空影像掃描數值檔，以 RMKTOP15 型 144116 號相機拍攝，影像編號 94R001_16~20、33~37、68~72，每張 16858X16806 像素，共計 15 張。

表 3.4 飛行及相機相關參數

相關參數	RMKTOP15型144116號相機
解析度	16858×16806
焦距	152.818mm
平均航高	2370m
像比例尺	1/15500
像元對應地面解析度	21.7cm

表 3.5、第二組實驗影像資訊

影像	編號	像素
E	94R001_	16858×16806
F	94R001_	16858×16806
G	94R001_16~20 94R001_33~37 94R001_68~72	35443×43323

4. 成果與討論

本章主要就能量傳輸解析及影像處理方法之結果進行展示與討論。MODO 軟體可以計算太陽輻射量及傳輸量，但沒有雙向反射分布函數無法進一步模擬反射表面輻射量；白平衡與去霧處理由影像成果可看出對於日光返照改正之效果不佳；二維經驗模態分解在去除日光返照之雜訊後結果，可以看出日光返照的明顯改善。

4.1 輻射傳輸解析-MODO

MODO 之輸出有三：

- (一) 太陽(輻射光源)之位置：如圖 4.1，輸入拍攝日期、UTC 標準時間以及拍攝地點經緯度，即可輸出太陽方位角、太陽仰角及太陽天頂角。
- (二) 太陽表面輻射值或傳輸量：如圖 4.2，輸入波長範圍及解析度，選擇輻射值或傳輸量輸出，即可得到太陽表面輻射值或傳輸量。
- (三) 將(二)之輸出量進行繪圖，得到如圖 4.3 之結果，橫坐標為波數(波長之倒數，單位為 cm^{-1} ，表示每公分含有的波數)，縱座標為輻射量，黑色與藍色圖示分別為太陽輻射量及輻射傳輸量。

可見光波段之波數計算後為 $1.4 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4 (\text{cm}^{-1})$ ，由圖十可看到可見光範圍內，輻射消散量(黑色與藍色曲線之差值)接近一個常數，因為在 tape5 介面輸入之參數相同，因此只能得到單一數值。此時如果能計算影像拍攝區域表面之雙向反射分布函數(BRDF)，可由表面反射之狀況及輻射消散常數進行表面輻射量之計算，但實驗影像無法求得 BRDF，即無法得知感測器接受輻射增量與表面反射輻射增量之比值。

除此之外，沒有參數可以得知加常數及乘常數將輻射量換算為影像灰度值，即使得到表面輻射量，若無法換算為影像灰度值，即無法直接對於影像進行日光返照之改正。

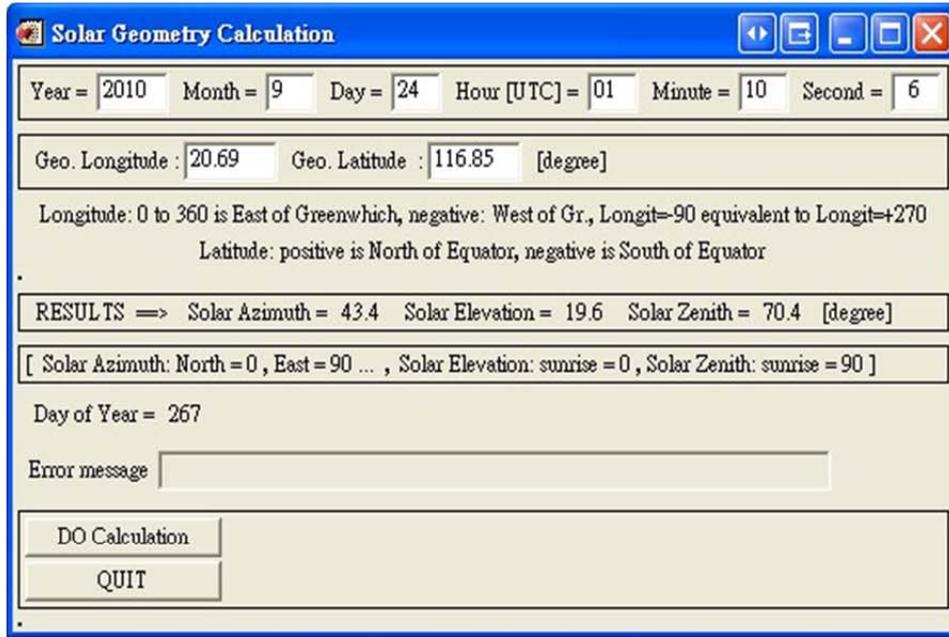


圖 4.1、太陽(輻射光源)位置之計算

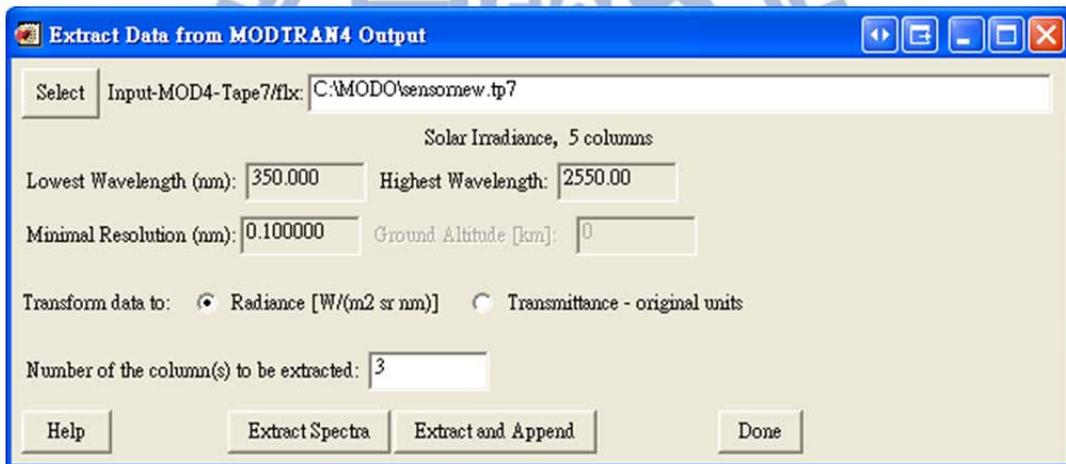


圖 4.2、光譜值之萃取

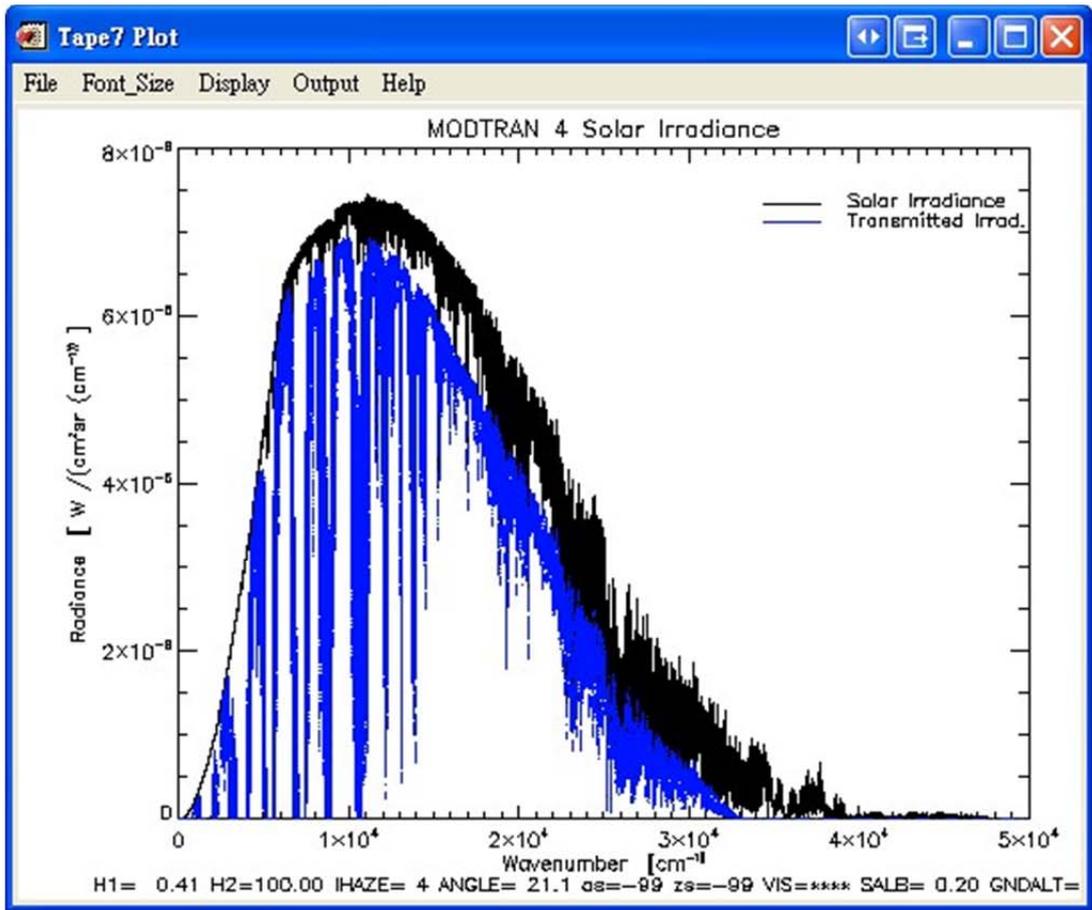


圖 4.3、太陽表面輻射值與傳輸量輻射值之圖示

4.2 白平衡&去霧處理成果

使用三張影像 A、B、C 進行去霧處理及白平衡，影像 A 原始影像及結果如圖 4.4~4.6，影像 B 原始影像及結果如圖 4.7~4.9，影像 C 原始影像及結果如圖 4.10~4.12。

影像 A 為海域，海面下有不明顯之礁塊，去霧處理後影像(圖 4.5)色彩在強度較強區域過於增顯，呈現整張影像色彩失真之情況，右半部有嚴重的資訊損失，但是隱藏之礁塊範圍比較可以分辨；影像 A 白平衡後影像(圖 4.6)色調被均勻化，可以看出右下角區選區域日光返照區域過於強化，海底下之原本不明顯之礁塊範圍比較可以分辨，但是無論是去霧處理或是白平衡只能增顯影像之資訊，對於影像之日光返照無法處理。

影像 B 為較單純海域，因為風浪的走向而使日光返照呈現明顯的波紋，去霧處理後影像(圖 4.8)因為過度誇張化，整張影像偏亮，有嚴重色偏；白平衡後影像(圖 4.9)將色調均化後，右上角之色彩資訊較為明顯，但也看出了日光返照區域反而有強化的反效果。

影像 C 有明顯之礁塊，去霧處理後影像(圖 4.11)，整張影像過度增顯，亮度過亮以致整張影像失真；白平衡後影像(圖 4.12)色彩均勻化，但日光返照區域沒有明顯改善。

由影像 A、B、C 之測試，可以發現去霧及白平衡處理對於海域影像直接進行處理是不可行的，甚至於去霧處理後整張影像過亮，可能是整張影像範圍皆有日光返照之影響，因此在增顯後過度誇張。

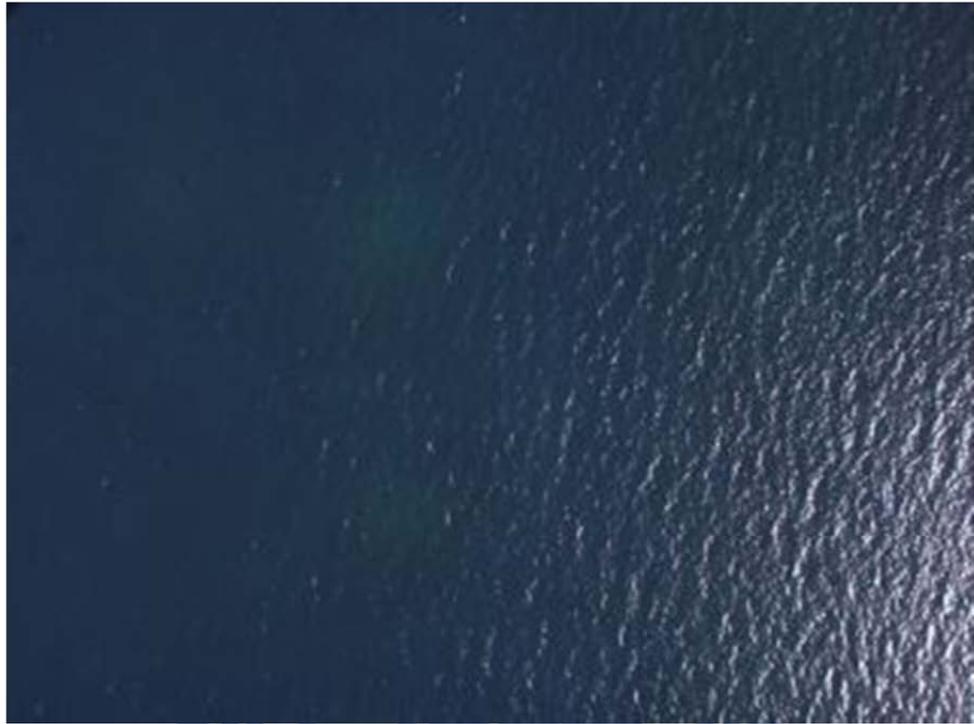


圖 4.4、測試影像 A 原始影像



圖 4.5、測試影像 A 去霧處理後



圖 4.6、測試影像 A 白平衡後

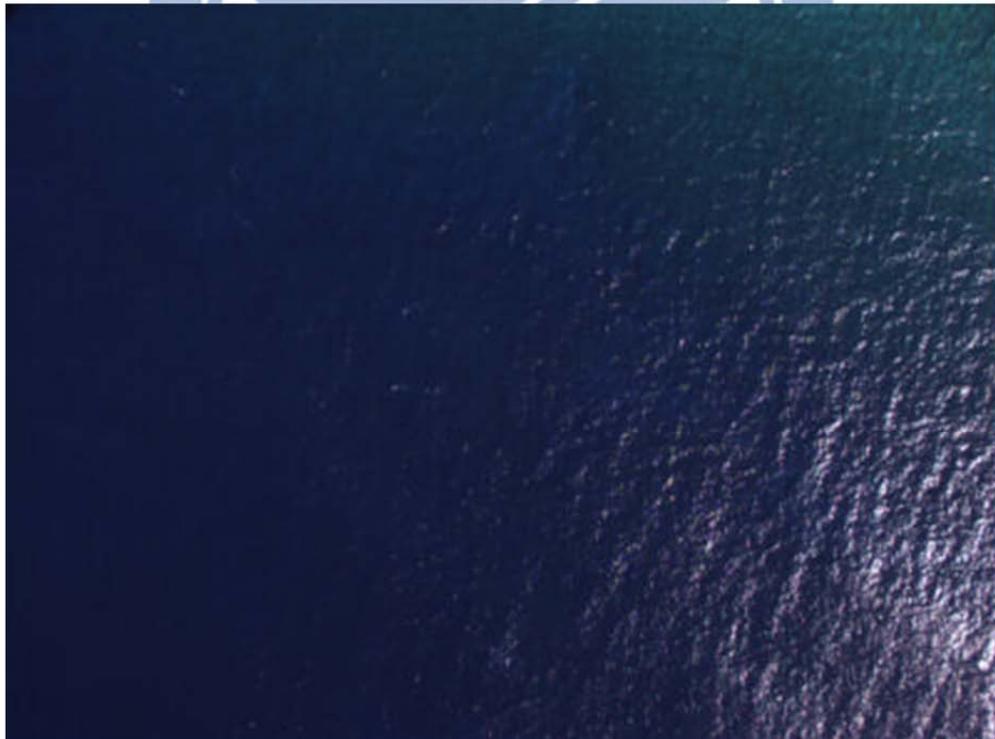


圖 4.7、測試影像 B 原始影像



圖 4.8、測試影像 B 去霧處理後



圖 4.9、測試影像 B 白平衡後

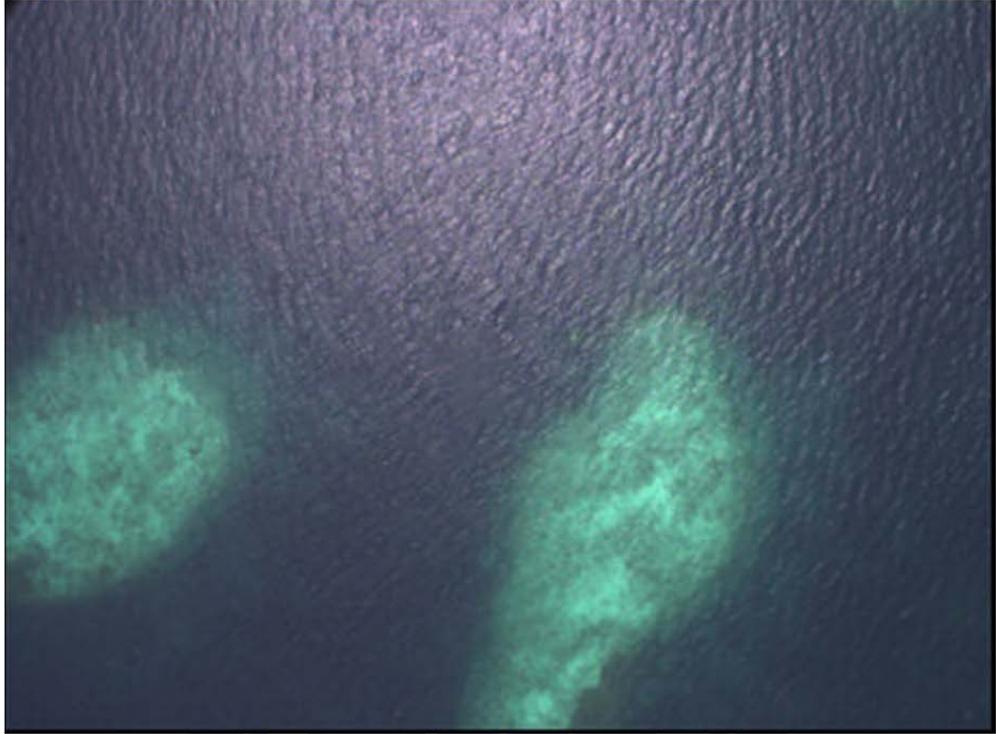


圖 4.10、測試影像 C 原始影像



圖 4.11、測試影像 C 去霧處理後

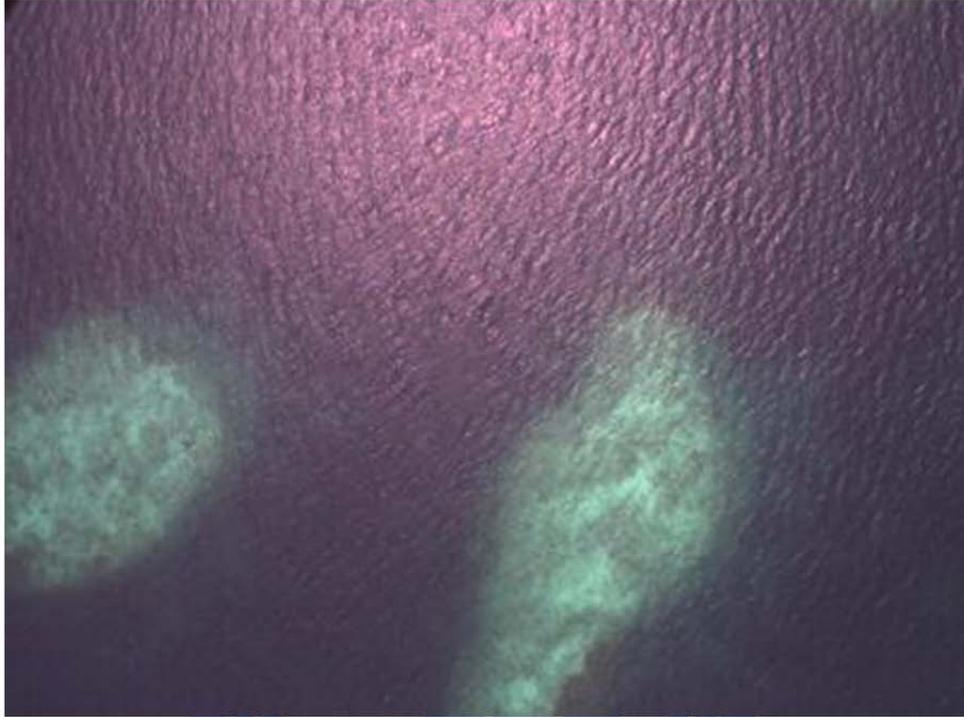


圖 4.12、測試影像 C 白平衡後

4.3 二維經驗模態分解(BEMD)影像成果

將影像轉為 HSV 空間後，對於亮度(Value)進行二維經驗模態分解(BEMD)，測試影像 A、B、C 三張影像在二維經驗模態分解後只能分解出 3 個 IMFs，可以發現亮度之 IMFs 與其日光返照區域有相應位置，由原始影像扣除所有 IMFs 後之殘餘項仍可看出其範圍及特徵與日光返照有關，但已經無法再分解，因此將殘餘項視為雜訊，扣除後之結果再轉回 RGB 色彩空間，得到經由二維經驗模態分解後之校正結果。

4.3.1 第一組測試影像

測試影像 A 原始影像日光返照在影像右下角，影響區域大於半張影像以上，由圖 40~圖 42 可發現 IMFs 之特徵幾乎都在右下角日光返照區域，但幾乎不可明辨；圖 43 之殘餘項特徵範圍大於半張影像，與原始影像對應後大約與日光返照區域相當，於是視為日光返照所影響之雜訊，將其扣除後結果如圖 4.18(HSV 色彩空間)及圖 4.19(RGB 色彩空間)。由處理影像結果(圖 4.19)與原始影像比對，因為波紋而使改正後影像有坑洞之視覺效果，但是日光返照所影響之亮紋的確有明顯改正其亮度之效果。

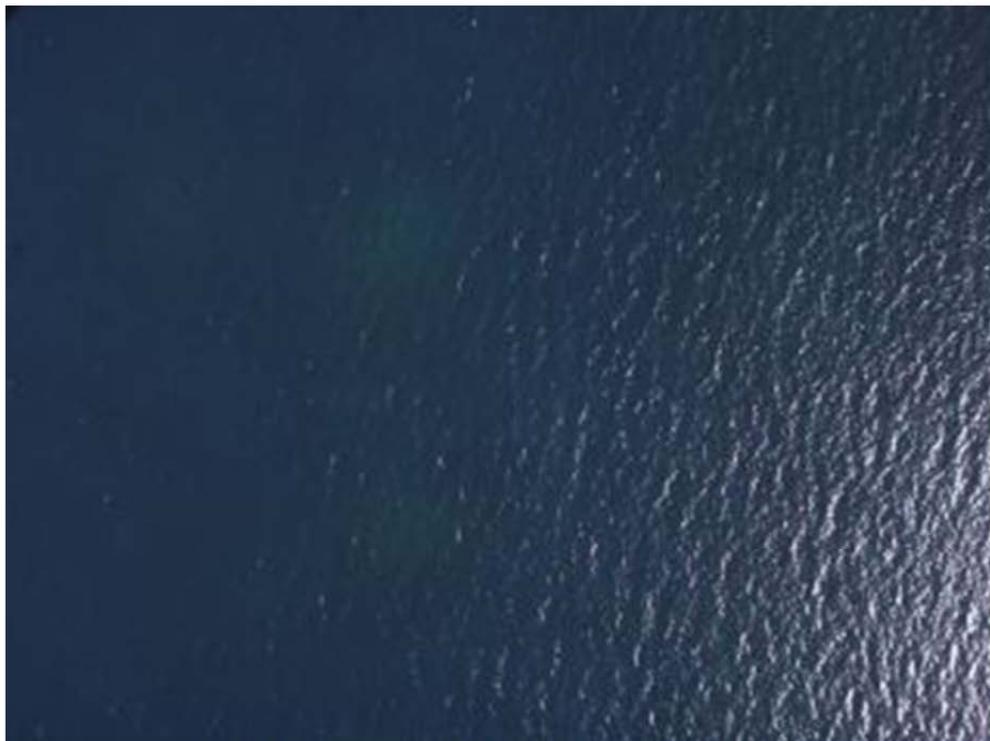


圖 4.13、測試影像 A 原始影像

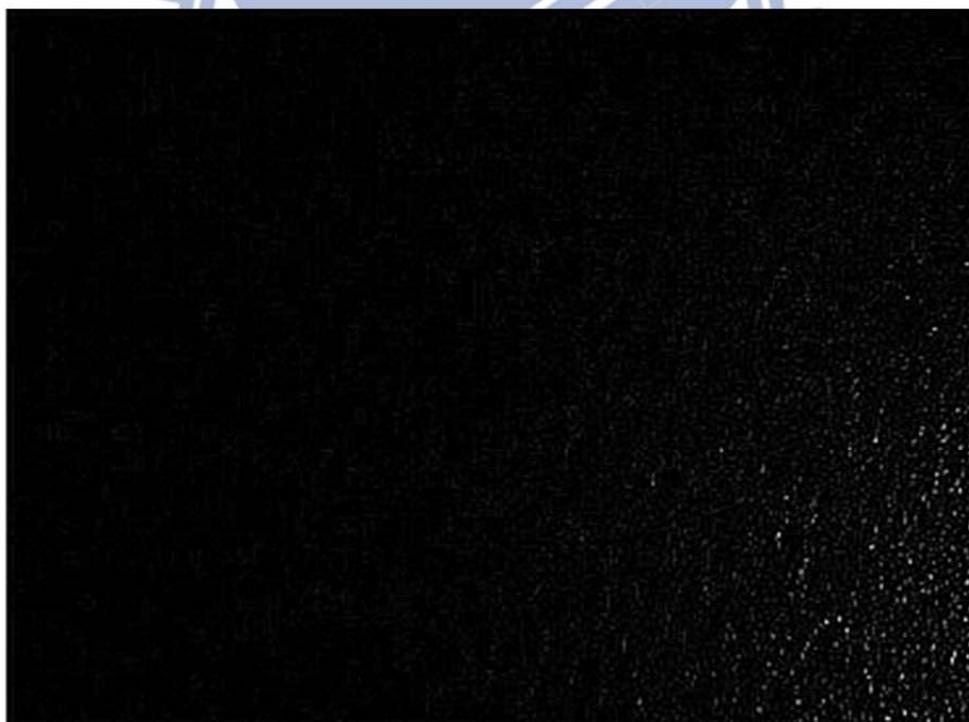


圖 4.14、測試影像 A 之 IMF1(影像增顯後)



圖 4.15、測試影像 A 之 IMF2(影像增顯後)



圖 4.16、測試影像 A 之 IMF3(影像增顯後)

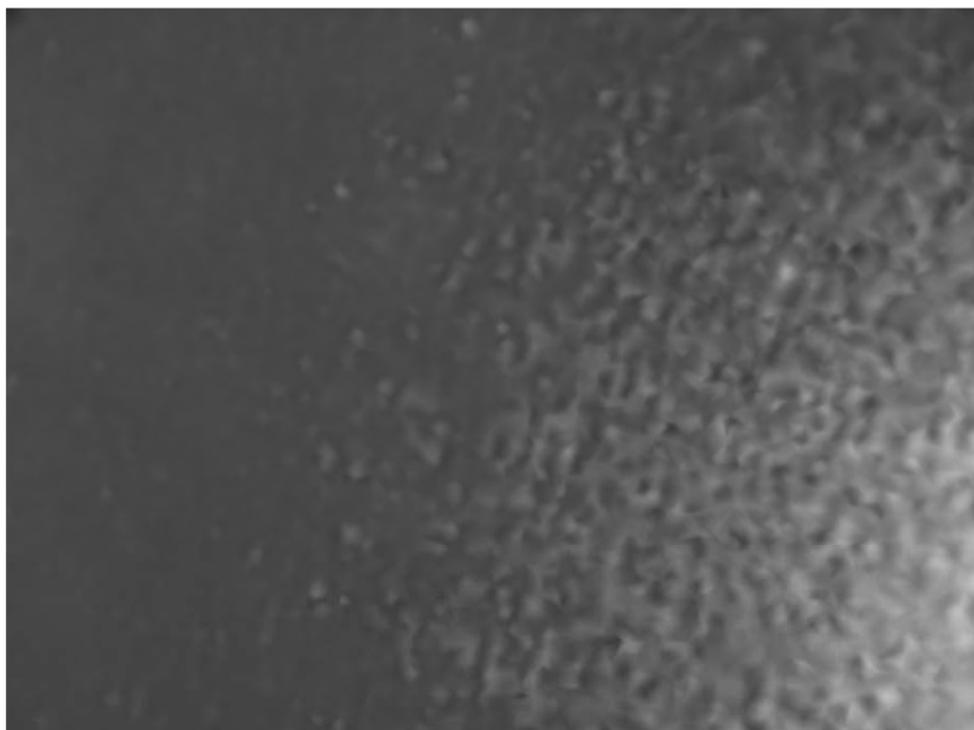


圖 4.17、測試影像 A 之殘餘項



圖 4.18、測試影像 A 影像結果(HSV 色彩空間)



圖 4.19、測試影像 A 二維經驗模態分解結果

測試影像 B 原始影像日光返照在影像右下角，影響區域較測試影像 A 集中，由圖 4.21~圖 4.23 可發現 IMFs 之特徵幾乎都在右下角日光返照區域，但幾乎不可明辨；圖 4.24 之殘餘項特徵範圍大於半張影像，仔細觀察原始影像後，發現原始影像左半部也有日光返照之影響，說明殘餘項之示意圖亦可幫助日光返照影響無法明辨之影像確認返照區域。將殘餘項扣除後結果如圖 4.25(HSV 色彩空間)及圖 4.26(RGB 色彩空間)。由處理影像結果(圖 4.26)與原始影像比對，因為波紋而使改正後影像有坑洞之視覺效果，並且影像除了日光返照處之亮度增加，但是日光返照所影響之亮紋的確有明顯改正其亮度之效果。

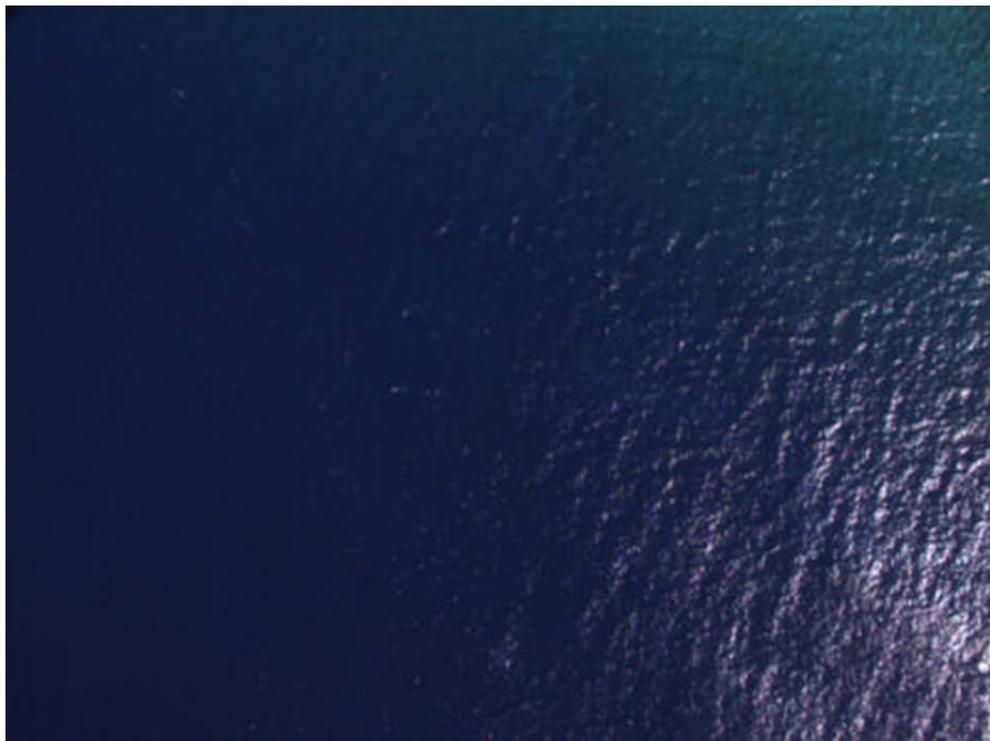


圖 4.20、測試影像 B 原始影像



圖 4.21、測試影像 B 之 IMF1(影像增顯後)



圖 4.22、測試影像 B 之 IMF2(影像增顯後)



圖 4.23、測試影像 B 之 IMF3(影像增顯後)



圖 4.24 測試影像 B 之殘餘項

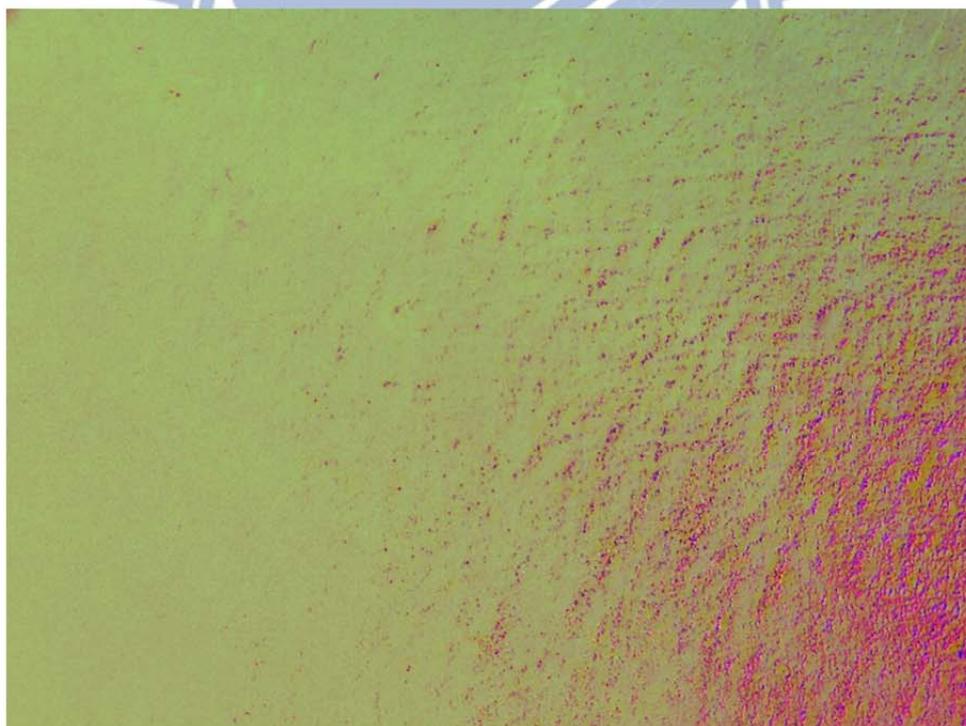


圖 4.25、測試影像 B 影像結果(HSV 色彩空間)



圖 4.26、測試影像 B 二維經驗模態分解結果

測試影像 C 原始影像日光返照在影像上半部較為集中，影響區域幾乎為整張影像，由圖 4.28~圖 4.30 可發現 IMFs 之特徵佔滿整張影像，圖 4.30 依稀可辨認兩塊礁塊之形狀；圖 4.31 之殘餘項之特徵於上半部集中區與兩塊礁塊特別明顯，說明在這些區域之日光返照影響特別集中。將殘餘項扣除後結果如圖 4.32(HSV 色彩空間)及圖 4.33(RGB 色彩空間)，由處理影像結果(圖 4.33)與原始影像比對，對於日光返照之影響之亮紋與礁塊皆有明顯改正亮度之效果，並且兩塊礁塊之紋路較為清晰。

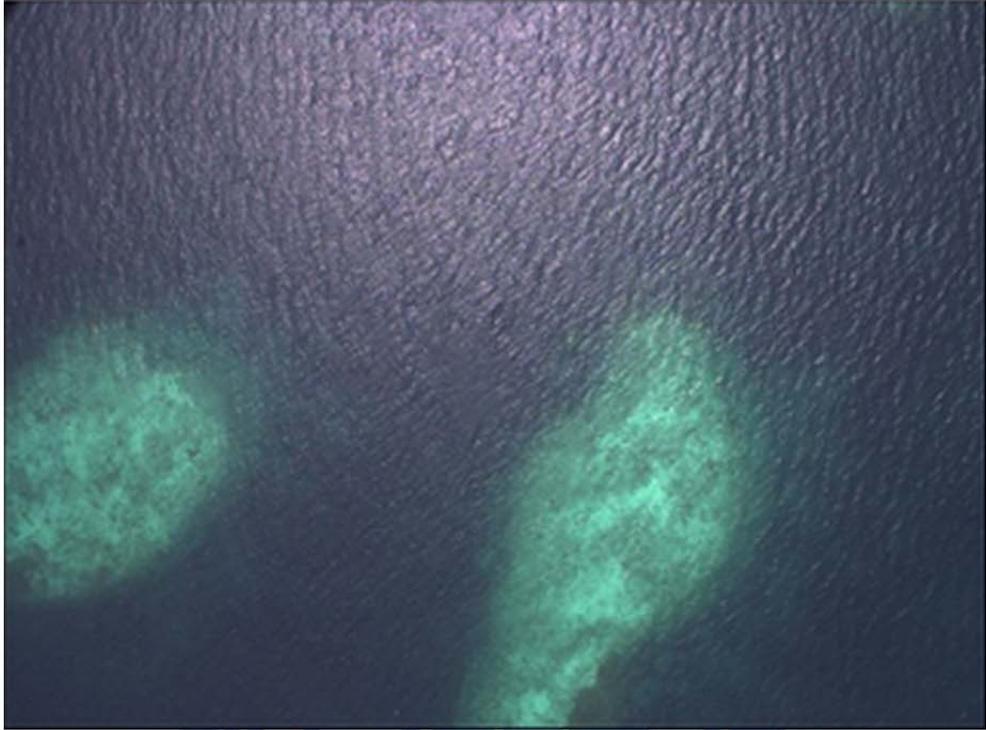


圖 4.27、測試影像 C 原始影像

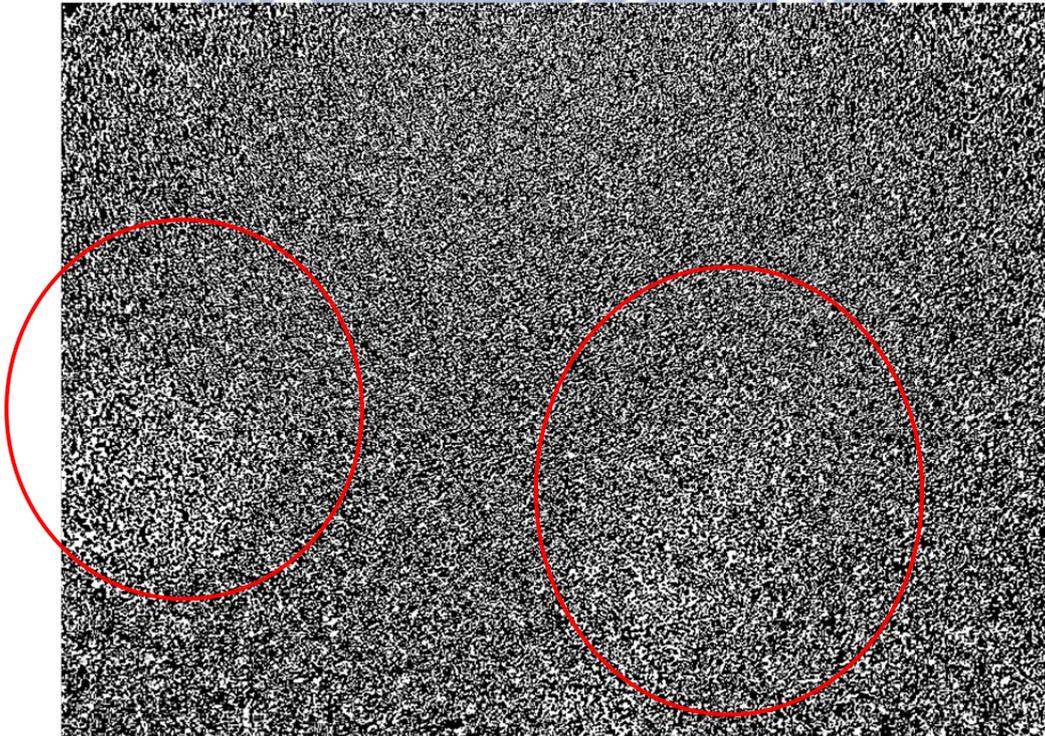


圖 4.28、測試影像 C 之 IMF1

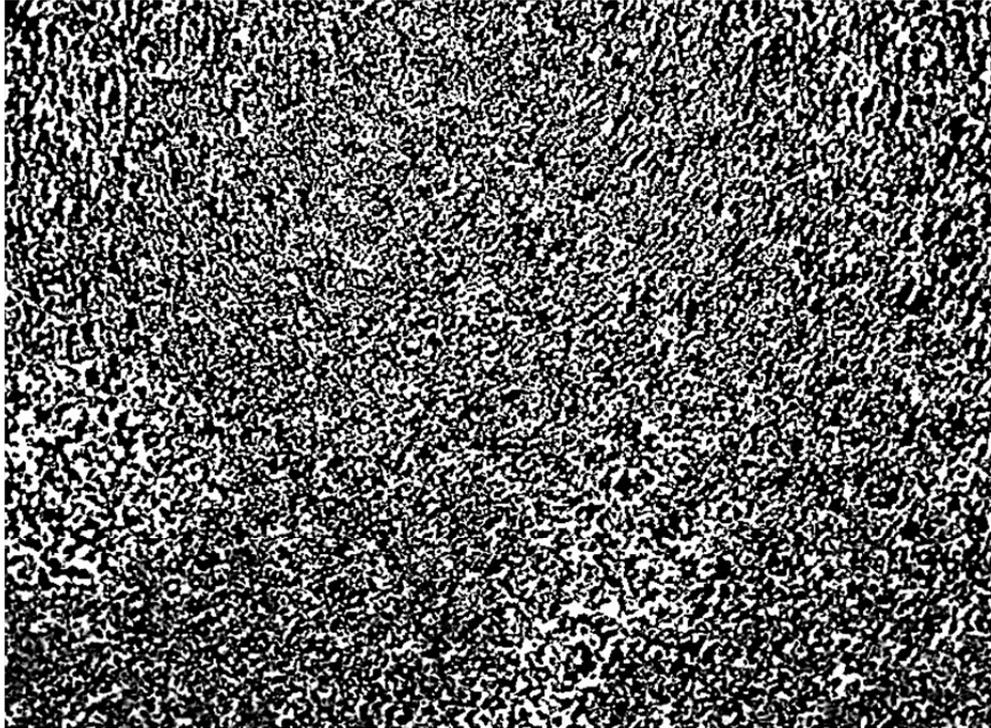


圖 4.29、測試影像 C 之 IMF2

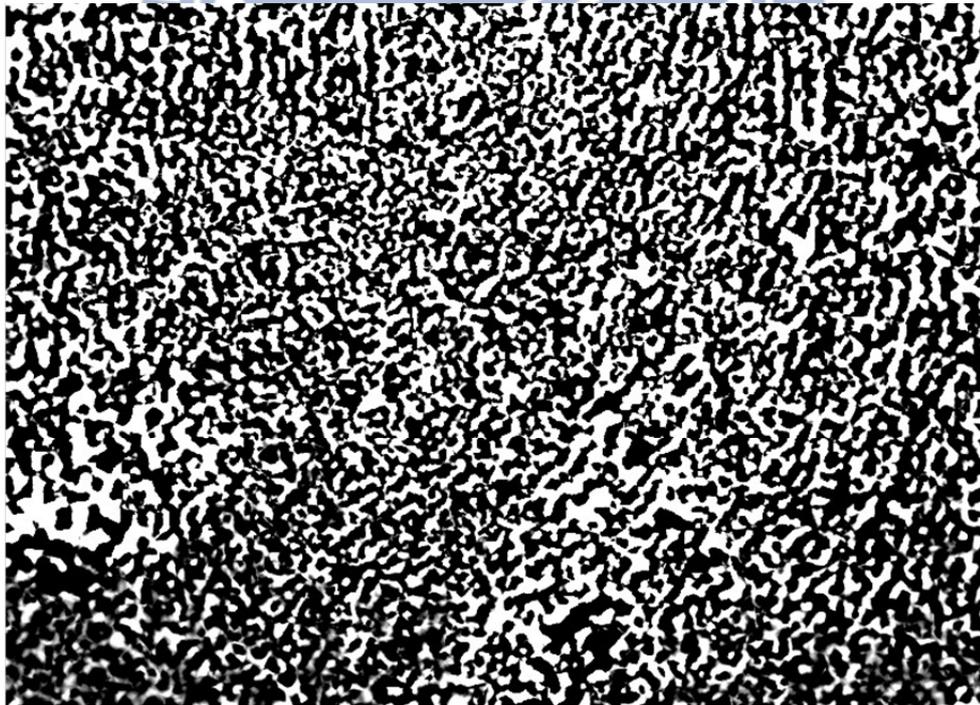


圖 4.30、測試影像 C 之 IMF3

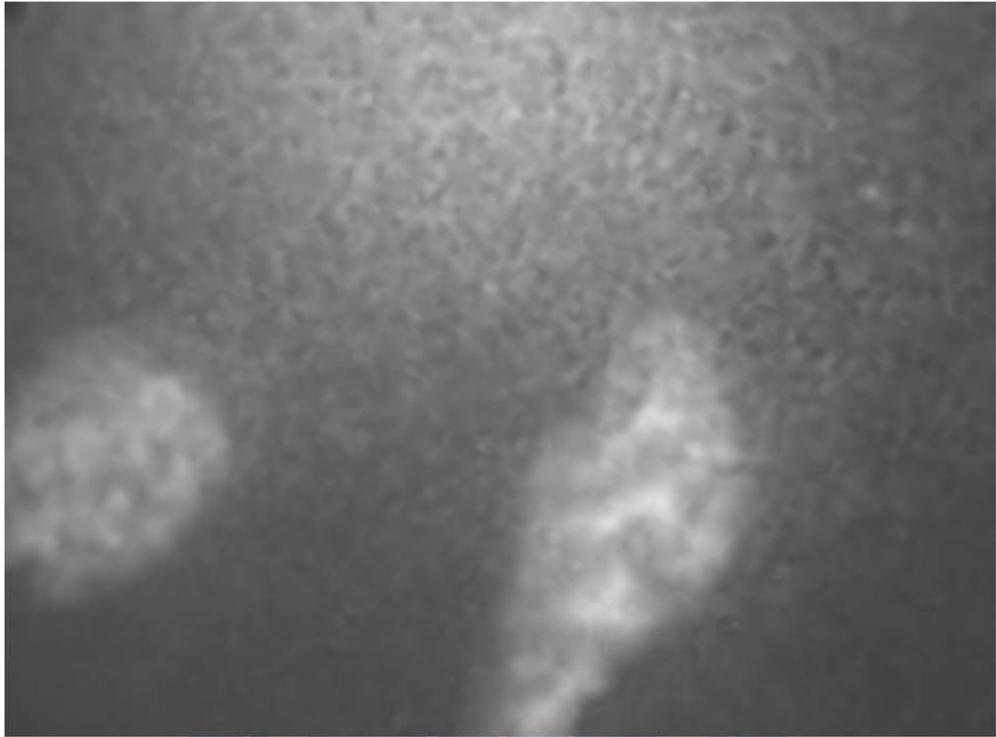


圖 4.31、測試影像 C 之殘餘項

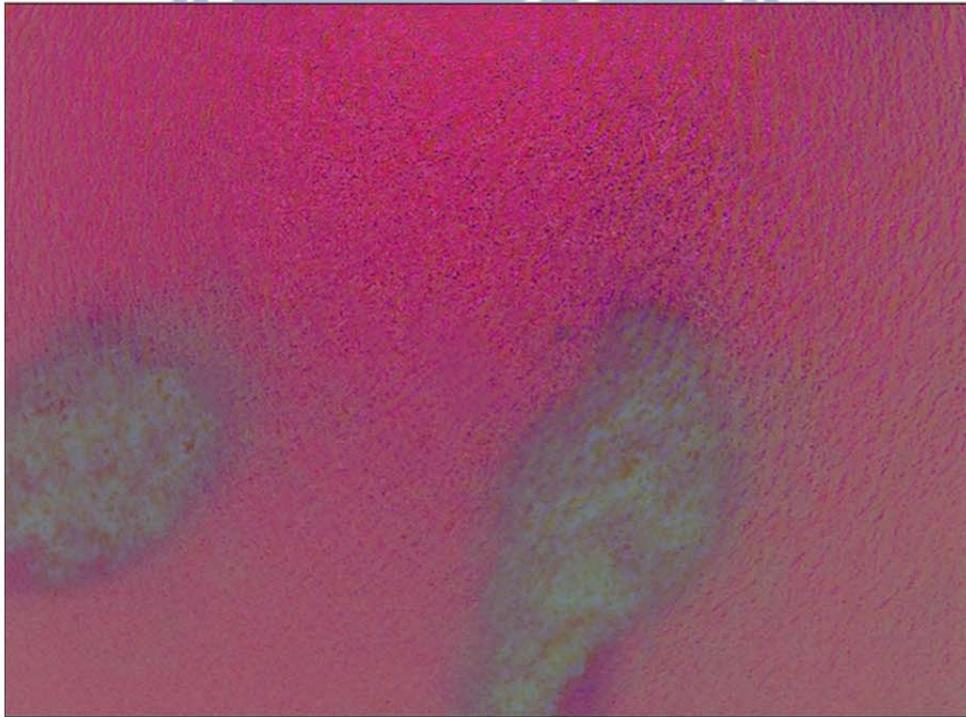


圖 4.32、測試影像 C 影像結果(HSV 色彩空間)



圖 4.33、測試影像 C 二維經驗模態分解結果

測試影像 D 為 19 航帶影像編號 62096010164、62096010165 及 62096010166 三張影像使用 PTGui 軟體所拼接而成，圖 4.34 為原始影像拼接結果，圖 4.35 為三張影像分別經由二維經驗模態分解後，扣掉殘餘項再進行影像拼接後之結果。可以發現在影像處理後拼接效果良好，且右半部返照區域與礁塊亮度皆有明顯的改善效果，但礁塊之紋理被平滑化。

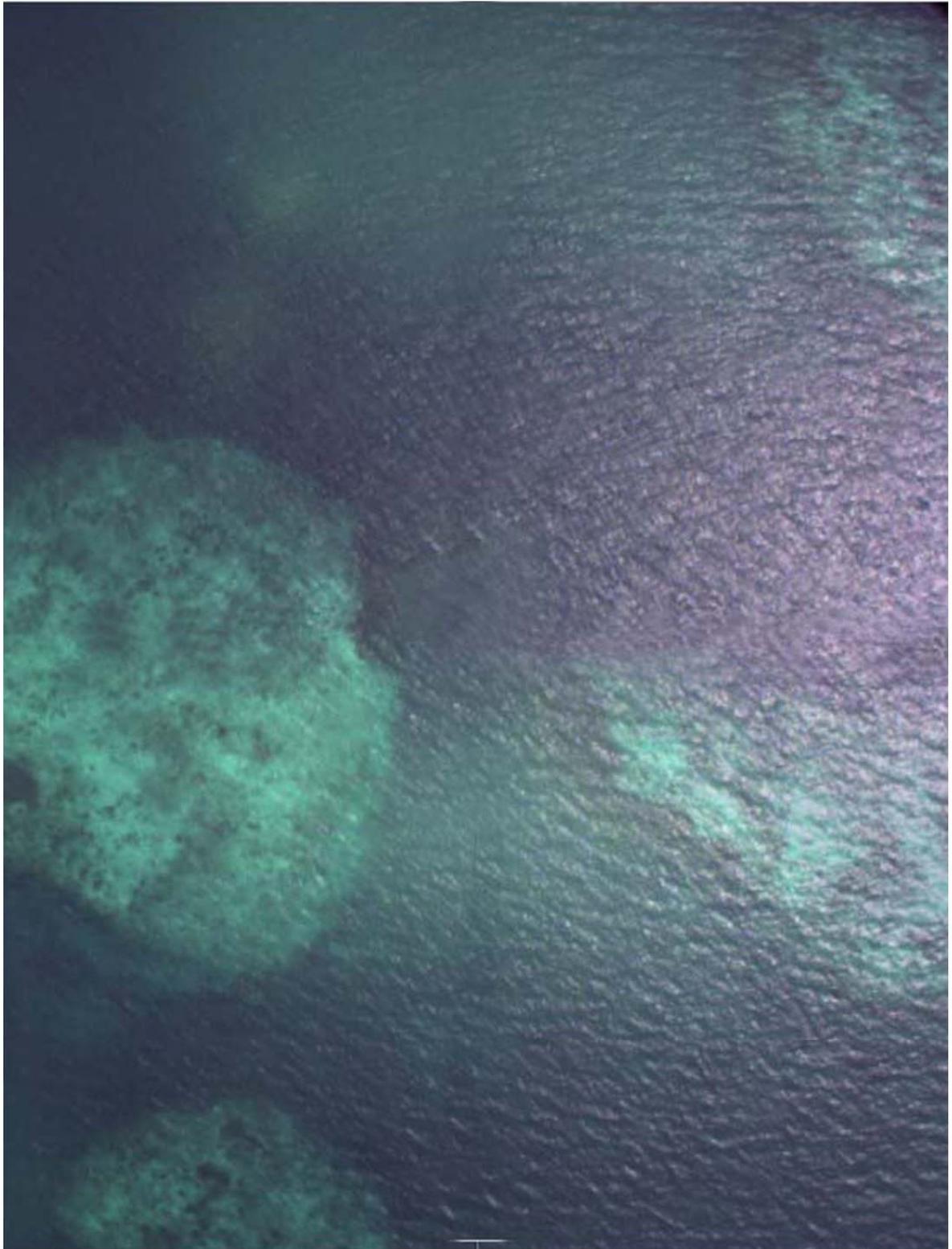


圖 4.34、測試影像 D 原始影像

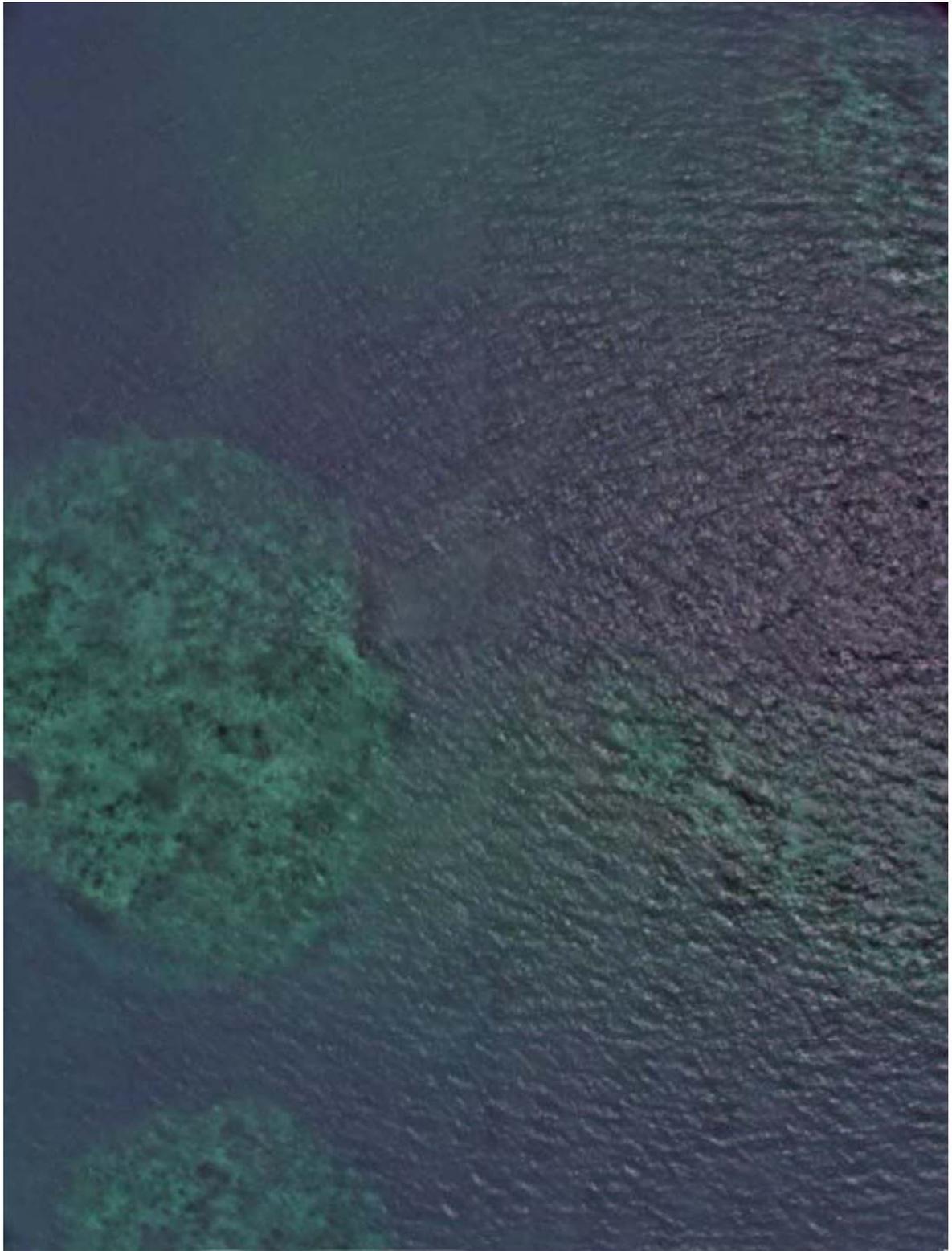


圖 4.35、測試影像 D 二維經驗模態分解影像結果

4.3.2 第二組測試影像

圖 4.36 為測試影像 E 原始影像，涵蓋區域為東沙島環礁的一部分，經過二維經驗模態分解扣除殘餘項後，得到如圖 4.37 之結果，右下角日光返照區域與附近色調相近，改善了亮度過亮的情況，但是殘餘項內可能含有部分環礁紋理，扣除後雖然改善日光返照影響，卻也讓紋理辨識程度下降。

圖 4.38 為測試影像 F 原始影像，涵蓋整個島嶼，經過二維經驗模態分解扣除殘餘項後，得到如圖 4.39 之結果，影像處理後日光返照區域與周圍顏色較為接近，但是島嶼邊界以及海域特徵都有模糊之情形。

圖 4.40 為 15 張原始影像鑲嵌結果，在日光返照區域有光暈情形，使得接合處有不連續的情況，經過二維經驗模態分解扣除殘餘項後(圖 4.41)，色彩較為均化，但日光返照區域無法完全消除，並且每張影像單獨進行處理時，因為海底底質不同造成單張影像主要組成色彩不同，在影像處理過後顏色略有深淺之差異。

比起第一組影像，因為影像解析度較差，經過二維經驗模態分解之訊號無法單獨分出影響日光返照之亮度，因此在移除殘餘項後模糊情況較第一組嚴重，顯示使用此方法進行亮度分解時會受到影像解析度之限制。

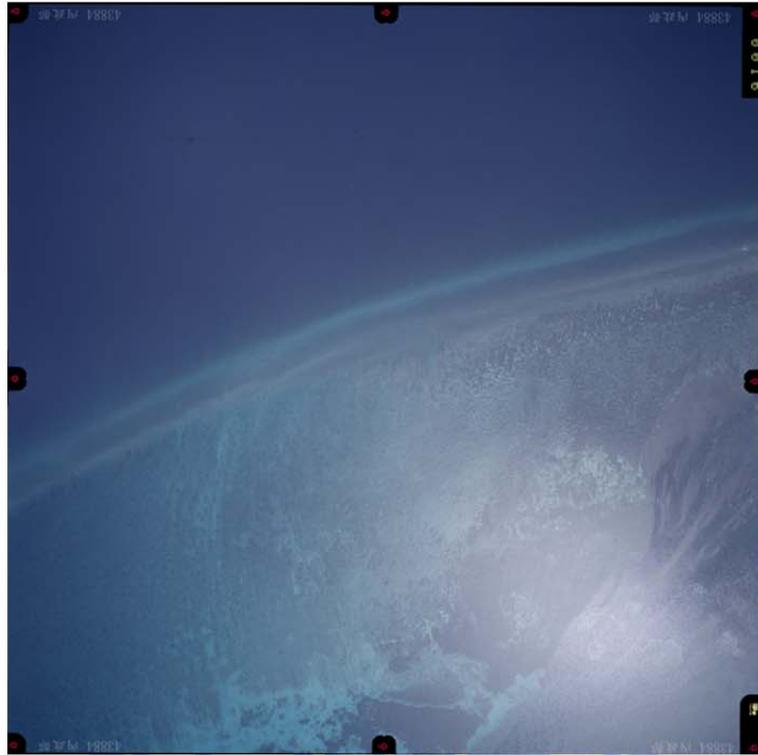


圖 4.36、測試影像 E 原始影像

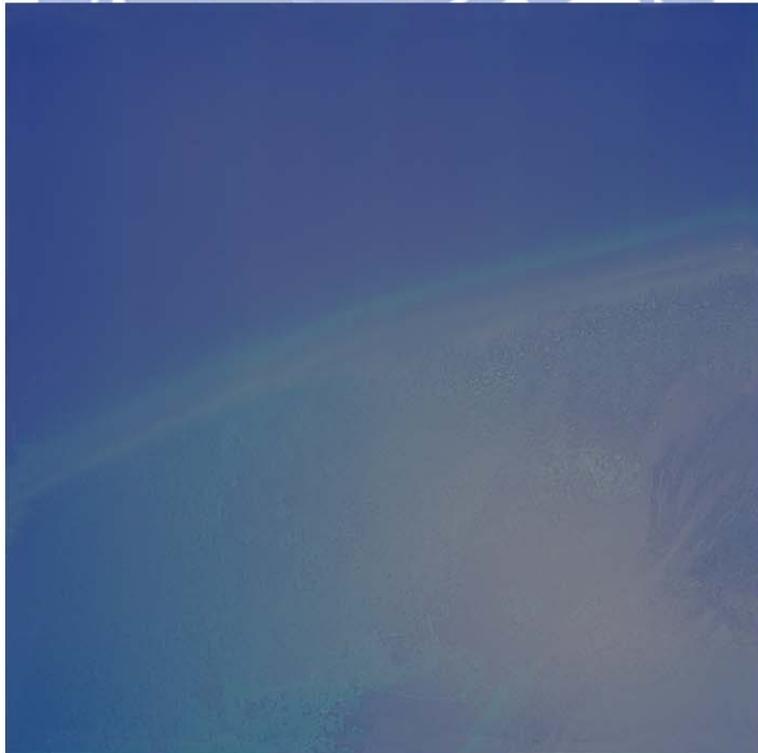


圖 4.37、測試影像 E 二維經驗模態分解結果



圖 4.38、測試影像 F 原始影像

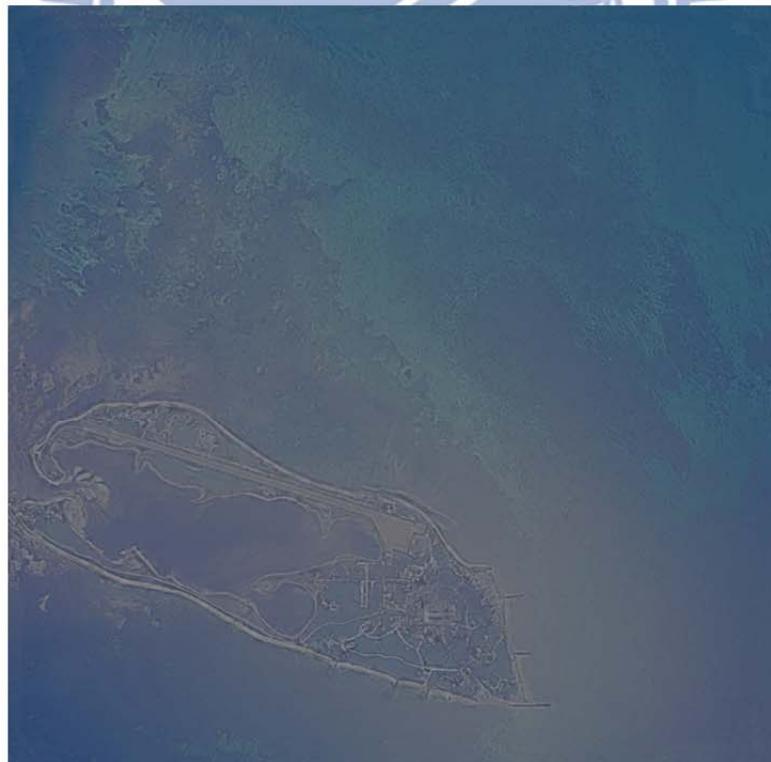


圖 4.39、測試影像 F 二維經驗模態分解結果

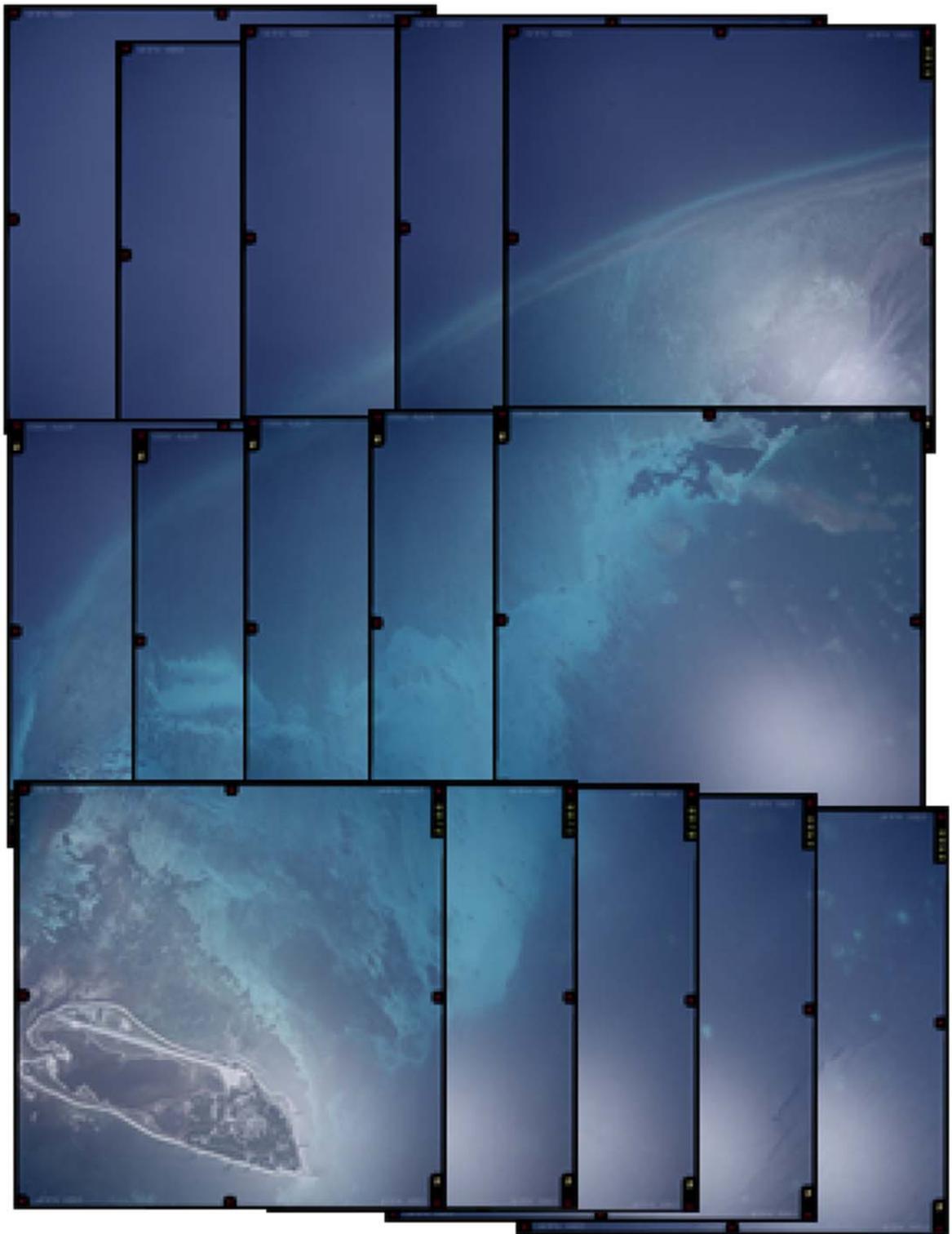


圖 4.40、15 張原始影像鑲嵌結果

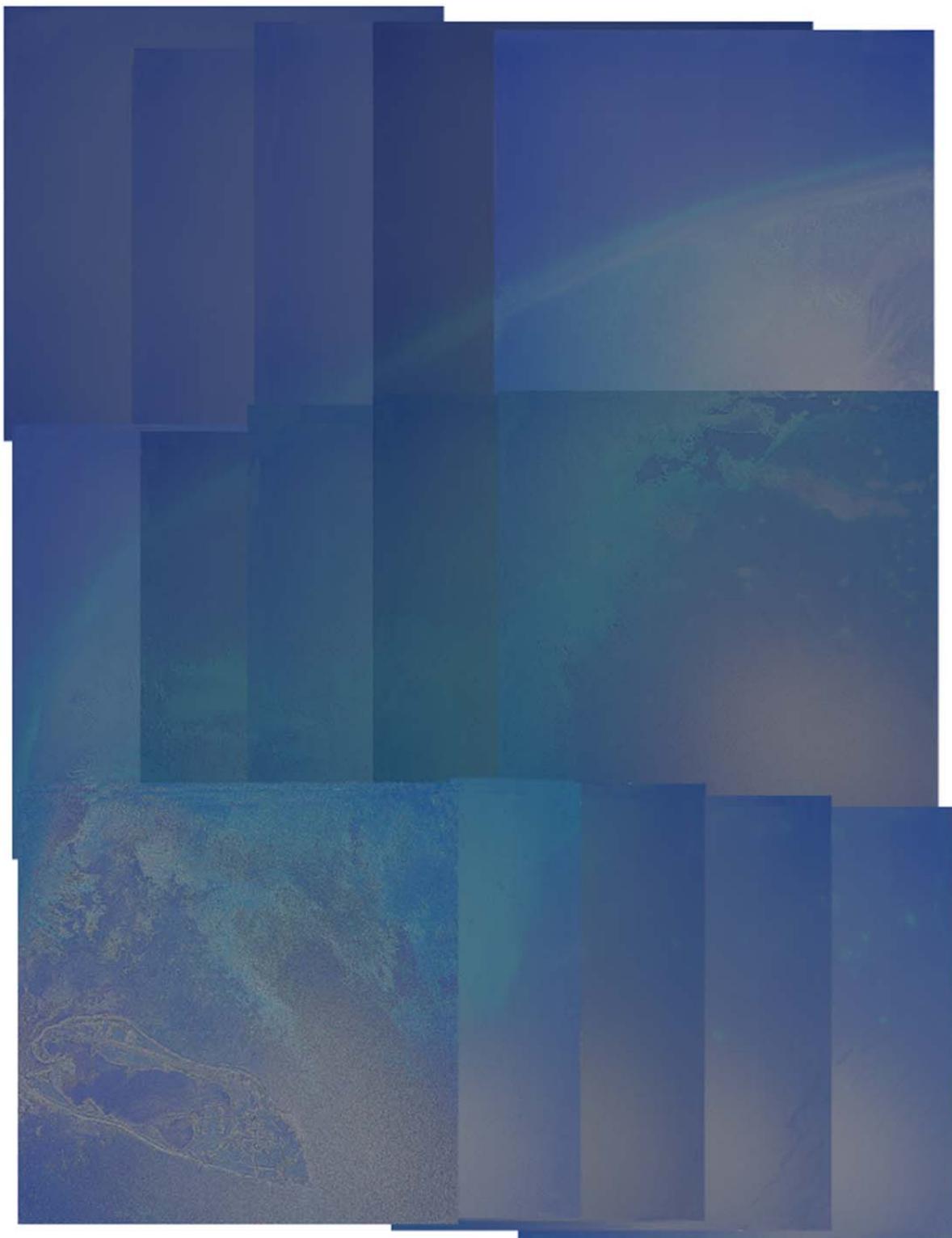


圖 4.41、15 張測試影像二維經驗模態分解結果之鑲嵌

4.4 影像品質分析

除了人眼判識外，以指標值對於去霧處理、白平衡及 BEMD 之結果進行指標品質分析，分析對象為影像灰度值，主要分析項目有平均值(Mean)、標準差(STD)、均方根誤差(RMSE)、標準化互相關法(NCC)、峰值訊號雜訊比(PSNR)及結構相似性指標，由統計指標值探討影像處理前後之灰度值變化情形。

均調區域影像 A、B 經過白平衡處理後，R、G、B 平均值皆增加；礁塊區域影像 C 原始色彩為藍綠色調為主，因此在白平衡後 G、B 值降低，而 R 值增加。由 RMSE、PSNR 及 SSIM 值皆可看出影像 C 因為有礁塊特徵，因此結構與原始影像較為接近。加上人眼判識後，白平衡處理雖然可以使影像色調均勻，但無法改正日光返照之影響。

影像 A、B、C 經過去霧處理後，對於日光返照區域過度增顯，因此 R、G、B 平均值皆誇張化，由 PSNR 與 SSIM 值亦可看出其視覺效果與結構已被破壞，可知整張影像進行去霧處理產生的增顯效果對於日光返照影響無法去除。

影像 A 及 B 為日光返照影響區域較小之影像，經過 BEMD 處理後，因為返照區外亮度增加，因此整體灰度平均值反而有增加的情形；影像 C 及 D 為日光返照影響幾乎整個範圍之影像，在改正日光返照區域之亮度後，灰度平均值皆有降低之情形。以均方根誤差(RMSE)來看，測試影像 D 與原始影像之灰度值偏差較小，測試影像 C 次之，與肉眼觀察結果符合；測試影像 B 之灰度值偏差最高，以肉眼觀察影像色偏情形，的確有一定的色偏情形。

BEMD 處理後之影像，PSNR 值皆 40 以上，較無法提供視覺判斷；以結構相似性指標(SSIM)來看，測試影像 C 與 D 保留原始影像灰度值結構的情況較好，測試影像 A 與 B 在影像灰度值結構有較多的差異，可能會有色彩失真，與肉眼觀察結果相符。但是礁塊區域之細節在 BEMD 處理後有平滑趨勢，表示對於特徵特徵可能會有資訊損失之情形。

表 4.1、影像 A 指標值

(A)處理方法	R _{Mean} (前/後)	G _{Mean} (前/後)	B _{Mean} (前/後)	RMSE	PSNR(dB)	SSIM
白平衡	43.122/68.875	59.503/88.615	79.914/107.936	22.128	28.775	0.632
去霧化	43.122/161.909	59.503/206.382	79.914/242.150	122.015	19.554	0.462
BEMD	43.122/53.822	59.503/76.792	79.914/104.308	17.320	49.449	0.752

表 4.2、影像 B 指標值

(B)處理方法	R _{Mean} (前/後)	G _{Mean} (前/後)	B _{Mean} (前/後)	RMSE	PSNR(dB)	SSIM
白平衡	29.855/70.500	40.535/91.187	69.961/130.354	62.764	21.632	0.588
去霧化	29.855/92.118	40.535/142.43	69.961/228.577	75.939	17.331	0.377
BEMD	29.855/39.560	40.535/55.322	69.961/100.820	24.778	50.855	0.774

表 4.3、影像 C 指標值

(C)處理方法	R _{Mean} (前/後)	G _{Mean} (前/後)	B _{Mean} (前/後)	RMSE	PSNR(dB)	SSIM
白平衡	80.699/104.458	95.495/90.645	108.855/107.479	7.201	45.311	0.833
去霧化	80.699/238.381	95.495/252.323	108.855/254.106	147.377	11.232	0.293
BEMD	80.699/74.696	95.495/88.237	108.855/102.577	28.230	50.560	0.697

表 4.4、影像 D 指標值

(C)處理方法	R _{Mean} (前/後)	G _{Mean} (前/後)	B _{Mean} (前/後)	RMSE	PSNR(dB)	SSIM
BEMD	84.610/63.220	102.329/77.008	113.777/86.698	1.874	43.882	0.922

5. 結論與建議

能量傳輸模式可由太陽幾何模式計算入射輻射量，再大氣相關參數計算傳輸量，此傳輸量即為日光返照影響量，將影像讀取得到之傳輸量扣除影響量得到改正後影像。但是測試影像沒有拍攝當時反射表面模型，計算之傳輸量無法反映表面起伏；另外傳輸量轉為灰度值時，因為缺乏乘常數與加常數，無法轉成灰度值對影像進行改正。

影像有色偏或資訊損失時，為了使色調均勻或增顯，使用了白平衡與去霧處理兩種方法。由測試影像結果可以發現白平衡改善了色偏情形，去霧處理對於不明顯之特徵有增顯之效果，但對於日光返照之影響無益。

由第一組測試影像結果發現殘餘項之特徵和範圍與原始影像日光反影之影響相當，將原始影像扣除殘餘項後即為改正影像。影像結果發現在海面灰度均質區域可改善日光反影之影響，但在礁塊區域對於礁塊會有資訊損失。鑲嵌之影像在邊界區域拼接良好，無日光反影造成之光影不均情形。

由第二組測試影像結果發現，此組影像可能受解析度影響，相較於第一組測試影像清晰度較低，因此較難細分訊號，殘餘項含有部分日光返照區域外之亮度，導致扣除殘餘項後的影像結果過於模糊，顯示二維經驗模態分解用在日光返照之改正亦受到解析度的限制。

使用平均值(Mean)、均方根誤差(RMSE)、峰值訊號雜訊比(PSNR)及結構相似性指標(SSIM)對於影像結果進行統計指標計算。白平衡可以改善色調不均，RMSE 相對較小，SSIM 值亦顯現其保留原始結構程度較高，但對於日光反影之改正以視覺而言無益；去霧化對於影像過度增顯，可以看出灰度值平均及 RMSE 都相當高，PSNR 值在 30 以下，為人眼無法接受，SSIM 值極低，表示其結構已被破壞。

均質海域影像經由 BEMD 處理，影像品質指標可幫助判斷影像品質。BEMD 在礁塊區域有資訊損失，導致影像處理後灰度值平均降低，並且 SSIM 值較海域均質區域為低，建議在均質區域可以使用 BEMD 方法，若有礁塊則需要進行遮罩。

參考文獻

- 李暢游、孫標、高占義、張生，2011，呼倫湖多波段遙感水深反演模型研究，水利學報 42(12)：1423-1431。
- 施伶蓓、史天元、陳雅信、陳杰宗、陳佳勳，2011，以白平衡及去霧處理增顯東沙航空影像，測量及空間資訊研討會。
- 胡琿婷，2012，二維經驗模態分解應用於航遙測影像增強之研究，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所。
- 陳炳旭，2002，數位相機自動白平衡：結合灰界理論與色域對應之研究，私立世新大學平面傳播科技學系碩士論文。
- 陳雅信、史天元、陳杰宗、陳佳勳，2010，海域空照影像鑲嵌：東沙環礁案例探討，測量及空間資訊研討會。
- Cox, C. and W. Munk, 1954. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter. *Journal of the Optical Society of America*, 44(11): 838-850.
- Centennial, N., 2001. Bidirectional Reflection Distribution Function, <http://math.nist.gov/~FHunt/appearance/brdf.html>. (last access:2012/06/20)
- Chiou, T.S. and C.S. Fuh, 2001. Automatic White Balance for Digital still Camera, MSC thesis, National Taiwan University.
- Delaunay, B., 1934. Sur la sphere vide . *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh Estestvennykh Nauk*, 7:793-800.
- Damerval, C., Sylvain and Valérie Perrier, 2005. A Fast Algorithm for Bidimensional EMD. *IEEE Processing Letters*, 12(10): 701-704.
- Huang, N. E., Z. Shen, and S. R. Long et al, 1998. The Empirical Mode Decomposition Method and The Hilbert Spectrum for Non-stationary Time Series Analysis. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 454:903-995.
- Hochberg, E. J., Serge Andréfouët and M. R.Tyler, 2003. Sea Surface Correction of High Spatial Resolution Ikonos Images to Improve Bottom Mapping in Near-Shore Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1724-1729.
- Hedley, J.D., A. R. Harborne and P.J. Mumby, 2005. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10): 2107-2112.
- He, K., J. Sun and X. Tang, 2009. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1957-1963.
- Kay, S., J. D. Hedley, and S. Lavender, 2009. Sun Glint Correction of High and Low Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 1: 697-730.
- Matlab central, 2011. SSIM code, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/9217-ne>

ed-ssim-m- code. (last access: 2012/06/20)

Pei, S.C. and Mary Tzeng, 2007. Uneven Illumination Removal and Image Enhancement Using Empirical Mode Decomposition. 20th Conference in Computer Vision, Graphics and Image Processing(CVGIP).

Rosa, M. C., P. Stefano, and Z. Elisabetta, 2006. Correction of Sun Glint Effect on MIVIS Data of the Sicily Campaign in July 2000. Annals of Geophysics, 49(1): 277-286.

ReSe, 2010. MODO, <http://www.rese.ch/products/modo/index.html>. (last access: 2012/09/17)

Schläpfer, D., Dr. sc. Nat. and D. Odermatt, 2010. MODO User Manual. Rese Application Schläpfer under support of the Remote Sensing Laboratories(RSL) of the University of Zurich.

Wikipedia, 2012a. Peak signal to noise ratio, http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio. (last access: 2012 /06/20)

Wikipedia, 2012b. Delaunay triangulation, <http://en.wikipedia.org/wiki/Delaunaytriangulation>. (last access: 2012/06/20)

Wikipedia, 2012c. Sun glint, <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunglint>. (last access: 2012/09/17)

Wikipedia, 2012d. 色溫, <http://zh.wikipedia.org/wiki/色溫>(last access: 2012/09/17)

