

# 東沙環礁淺海水深遙感測繪之研究

黃世任 溫耀宗  
國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系

## 摘要

本研究以 SPOT 衛星影像資料測繪東沙環礁淺海水深，配合現場實測水深，建立輻射值與水深的關係式，以推估該海域之淺水水深。研究結果顯示，在未分類情況下，推算水深的誤差為實測水深的 $\pm 20\%$  內的資料點佔所有實測點數的 90%以上，標準誤差值為 0.88m。在透過監督式分類將不同深度水深予以分類後，各類誤差在 $\pm 20\%$  時更高達 95% 以上，且標準誤差值降至 0.57m 以下。顯示以分類方式推算水深可得到較高的準確性，並計算出各深度海域面積，進而提供未來「海上國家公園」規劃之參考。

關鍵字：SPOT、東沙環礁、水深、監督式分類

## 一、前言

當地面上的物質受到太陽輻射能照射時，會對某一波段的電磁波產生反射(reflection)、散射(scattering)與吸收(absorption)等現象(曾, 1988)。而遙測技術即藉由衛星上的感測器接收來自目標物的電磁波訊號，透過這些資料的分析，可以得知目標物的性質及類別等資訊。然而，大多數的電磁波經過水面時即被吸收或反射，只有可見光可穿透水體(Blyth, 1981)。一般在淺水區域，太陽光穿過水體，經底床反射後，再穿過水面而被感應器接收。由於太陽光在水中行進過程會因散射、吸收而衰減，而且會隨著水體深度的增加而衰減情形更明顯。所以可以利用太陽光的衰減特性來計算水深。

在清澈的大洋中，可見光在 0.4~0.6  $\mu\text{m}$  波長的傳輸率可達約 60% (Gross, 1992)，而在 0.6  $\mu\text{m}$  波長的傳輸率則明顯降低至 10%，至 0.7  $\mu\text{m}$  後傳輸率已趨 0.1%以下，其中又以藍光在水體中有著最好的穿透力(Jerlov, 1951)。所以在水深遙測應用上，藍光是最常被用推算水深的波段。

在傳統的水深深度測量，船隻常以回音探測儀(Echo sounder)來測量水深並繪製成圖。但是，在近岸淺水區的水深測繪(Bathymetric mapping)，因該水區較少船隻航行，且測量時有觸礁危險，再加上測量時需花費大量金錢及時間，故對近岸淺水區域較少有完整的測量。而透過衛星遙測技術來測繪水深，在影像可解析範圍內之淺水區域，其調查的面積、花費的時間、金錢及測量時的危險性，均較船測有明顯的優勢。

我國政府近年來大力推動海洋政策，並希望在 2020 年之前，於專屬經濟區內至少有 20% 的海域劃設為「海洋保護區」(Marine Protected Area, MPA)。東沙群島位於南中國海北邊之大陸斜坡的東沙台階上，為台灣海峽南方門戶，由一系列礁盤所組成。東沙群島，這個距高雄有 400 浬由珊瑚形成的天然環礁島嶼，政府即將設為「海洋保護區」或「海上國家公園」。然而，在這大部份的環礁在低潮位時方露出水面外，其常年露水面之陸地只有東沙島一小部份。在這

大面積的水域上，由於長年為軍事要地與其他陸地相隔甚遠，且人煙稀少，故此區域海水仍保持原有清澈，但也因此較少有水文調查資料。

本研究以東沙群島之東沙環礁為主要研究區域，該環礁長約 46000 公尺，寬約 2000 公尺，其環礁內水深最深約 20 公尺，最淺處僅有 0.5 公尺，底質為珊瑚與貝殼所形成之細沙，環礁北、東、南於潮位較低時會露出水面。東沙島位於環礁西部，為長年露出水面之島嶼，也是南海所有島嶼中最大及最北的島嶼，地理中心位置為東經 116 度 43 分、北緯 20 度 42 分。

因此，本研究嘗試以 SPOT 衛星遙測資料，以單譜模式從穿透性最佳之可見光藍光波段影像資料，進行東沙海域淺水水深研究。再配合船測水深、潮汐修正等資料來推算水深，利用船測水深資料及監督式分類法分類，依分類結果分別推算出水深。並將推算水深所得結果與實測驗證點比較，探討本研究之精確度及誤差。

## 二、資料來源

### (一) 衛星資料

SPOT 5 衛星為太陽同步衛星，飛行高度為 822 公里，通過台灣上空約為 10 點 45 分，軌道與赤道傾斜角 98.77 度，繞地球一圈週期約 101.4 分，一天可轉 14.2 圈，每 26 天通過同一地區，涵蓋範圍為 60 X 60 $\text{km}^2$ ，是目前中高解析度衛星中，幅寬最廣之衛星資料。

此外，在定位精度方面，SPOT 5 衛星利用 Start Tracker 與 DORIS(Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)系統進行姿態與軌道位置之定位，在未使用地面控制點且為平坦地形之絕對定位精度已可提高到 50 公尺(太, 2005)。

本研究利用國立中央大學太空及遙測中心所提供經幾何校正之 SPOT 5 衛星影像，其影像 ID 為 I0008831，拍攝時間為格林威治時間 2005 年 5 月 23 日 02 時 41 分 13.055 秒。其影像中心位置 (20.6820382°N, 116.8031718°E)。在影像大小部份，其南北寬 2200

Line、東西長 3000 Samples，影像面積為 660km<sup>2</sup>，地面解析度為 10m。

## (二) 船測資料

本研究所取得之實測水深資料，係以 20 噸之小艇於 2006 年 5 月間測得，該小艇裝置有日本 FURUNO 公司所製造之三合一雷達 (Color Video Plotter GD-1900C)，該儀器主要功能有雷達、水深探測及航跡等三項功能，透過該儀器所量測之經、緯度及深度而紀錄。

量測範圍以東沙島南方環礁內海域為主，東經由 116 度 42 分向東，北緯由 20 度 42 分向南。每次量測時，採以緯度為固定航向，由西向東航行，每 15 秒經度為一測點，共計八條航線，及一些零星共近千個測點。在晴空的條件下，與衛星影像相對應的測點共計 868 個。

## 三、研究方法

### (一) 潮汐修正

海面水位的高程會受到潮起潮落的影響，所以在進行現場水深測量或衛星遙測推估淺海水深時，也會受到潮汐的變化的干擾。潮汐除受太陽與月球影響外，也隨著地理位置的不同而有所差異。潮汐可分為全日潮、半日潮及兩者皆有的混合潮，而東沙海域潮汐形態則為混合潮形態。因該地區不易由其他量測單位取得潮汐資料，為取得此方面相關資料，於 2005 年 7-10 月間於東沙島碼頭外放置一波浪儀 (S700 壓力式波浪儀)，每日記錄波浪及潮汐資料並持續數月之久。取得資料經讀出後，再予數值模擬方式推估 2005 年 5 月潮汐情形。

為使衛星資料所推算的水深與船測資料所得的水深在相同的參考基準面。在資料處理過程中，先推算出各船測時間的潮位及衛星影像拍攝時間的潮位，並分別將潮位扣除。再將扣除潮位影響後的遙測水深資料與船測水深資料進行比較。

### (二) 遙測水深

衛星遙測技術推估水深方法很多，有可見光法 (Lafon et al., 2002, Islam et al., 2004, 呂, 2004)、波譜法 (Leu et al. 1999) 及空載光達測深 (Irish and Lillycrop, 1999)。然而，可見光法因受到穿透力的影響，水深深度超過 20 公尺即不易測得。而波譜法因測量波浪變化進而推估深度，只限應用於近岸，對較深深度水域無法測量。Tripathi and Rao (2002) 利用可見光波段測繪印度的 Kakinada 海灣的水深。東沙環礁水域，其環礁內水域最深亦約為 20 公尺，且底質多為珊瑚貝殼細沙，又不受污染及海流影響，海水水質清澈，故本研究採用可見光法來推估水深。

可見光法有單波段演算法及多波段旋轉變換 (Rotational Transformation) 等。後者係以未有現場實測資料下以多波段求算出相對水深後再推估水深，因本研究有實際於東沙海域以船測現場實測資料，且測點資料多達千點，故採單波段水深演算法，再配合統計迴歸方式來進行東沙淺海海域水深推估研究。

假設遙測過程中該區域的大氣狀態為均勻狀態，波浪、水質條件相同，且海床底質均勻等。當可見光穿透水體後，被海底底部反射，再穿出水面抵達感測器。因此，藉由衛星感測器所接收訊號強弱變化，便可推估出淺海海底之深度變化。而衛星觀測值與水深的關係模式 (Doak et al., 1979) 如下：

$$P_{SN} = P_{AN} + P_{DN} \exp(-GKZ) \quad (1)$$

其中

$P_{SN}$ ：衛星觀測值

$P_{AN}$ ：大氣校正值

$P_{DN}$ ：參考訊號值

$Z$ ：水深

$K$ ：衰減係數

$G$ ：幾何係數

由上公式可推算出

$$Z = -\frac{1}{2K} \ln\left(\frac{P_{SN} - P_{AN}}{P_{DN}}\right) \quad (2)$$

方程式中之  $P_{AN}$  為大氣反射校正值，可由衛星偵測深水區無海底反射訊號之平均值得之。 $P_{DN}$  為參考訊號深度值，於近岸水深趨近於零之反射訊號平均值和大氣反射校正值之差。由 (2) 式得知水深  $Z$  與  $\ln\left(\frac{P_{SN} - P_{AN}}{P_{DN}}\right)$  成正比關係，故可利用實測水深  $Z$  與

衛星遙測所得之  $\ln\left(\frac{P_{SN} - P_{AN}}{P_{DN}}\right)$  得到一個線性迴歸式

$$Y = aX + b \quad (3)$$

其中  $Y$  代表水深， $X$  代表  $\ln\left(\frac{P_{SN} - P_{AN}}{P_{DN}}\right)$  值， $a$ 、 $b$  分別為迴歸係數。

本研究以實測水深資料與衛星資料的迴歸關係結果，推算整個研究區域的水深資訊。並利用地球資源資料分析系統 (Earth resource data analysis system, ERDAS) 以監督式分類法將研究區域分為 6 類 (圖 1)。再依各分類實測資料與衛星資料透過統計學之迴歸分析將各水深分別迴歸分析，以取得各類最佳淺海水深遙測推估關係式。



第一類	第二類	第三類	第四類	第五類	第六類
-----	-----	-----	-----	-----	-----

圖 1：監督式分類圖

將推估出之水深與實測水深加以比較，以分析其準確率和誤差量。同時，對各推估水深與實測水深之誤差以標準誤差值來討論，其公式如下：

$$STEy_x = \sqrt{\left[ \frac{1}{n(n-2)} \left[ n \sum y^2 - (\sum y)^2 \right] \right]} \times \frac{\left[ n \sum xy - (\sum x)(\sum y) \right]}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2}} \quad (4)$$

其中

n 為資料筆數，x 是計算水深，y 為實測水深。

透過標準誤差值大小的比較及遙測水深與實測水深誤差的分布，來瞭解未分類與分類遙測推估水深的誤差情形。

迴歸點遙測與實測比較

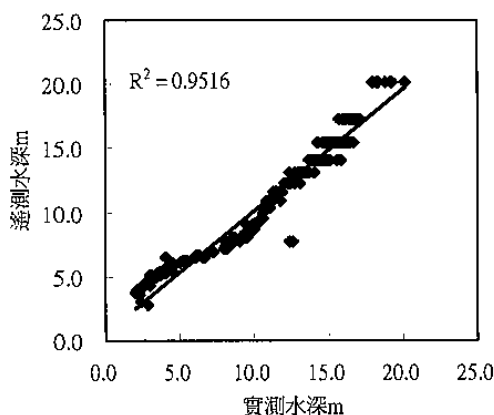


圖 2：遙測推估及迴歸點與驗證點比較

#### 四、結果與討論

本研究係以衛星遙測推估水深，故研究範圍以影像中東沙環礁內之淺海水深為主。影像中部份受到雲的遮蓋，光譜反射率較強，與陸地同屬高光譜值。在水深計算前，須先濾除陸地和雲所覆蓋區域。本研究以晴空海域進行遙測水深計算，再與實測資料驗證其準確性。

##### (一) 實測與遙測推估比較

###### 1. 未分類之推估結果

根據第(3)式，在未分類中 445 個經過潮汐修正後的迴歸點所迴歸出的迴歸式為：

$$Y = -4.7394X + 6.2397$$

利用該公式所推估計算出之絕對水深與實測深度比較，發現其相關決定係數 $R^2$ 值達 0.9516，有相當高的關係。而將該迴歸式計算 423 個驗證點，其 $R^2$ 值仍有 0.9486(圖 2)。

由表 1 可得知，未分類時其迴歸點與驗證點誤差量在實測水深的 $\pm 20\%$ 時已包涵 90.8% 以上的資料點，在實測水深的 $\pm 30\%$ 時其驗證點包涵點數已達 92.7%，而在實測水深的 $\pm 50\%$ 時驗證點已達 98.1%。在標準誤差部分，迴歸點的標準誤差值為 0.88m，驗證點的標準誤差值為 0.90m(表 2)。

表 1：各類遙測推估準確率

測點 準確率 誤差	迴歸點				
	未分類	第一類 (0~5m)	第二類 (5~10m)	第三類 (10~15m)	第四類 (15m以上)
	445	43	54	194	148
$\pm 10\%$	88.1%	76.7%	94.4%	99.0%	100%
$\pm 20\%$	90.8%	97.7%	100%	100%	100%
$\pm 30\%$	91.7%	100%	100%	100%	100%
$\pm 40\%$	93.7%	100%	100%	100%	100%
$\pm 50\%$	95.5%	100%	100%	100%	100%

測點 準確率 誤差	驗證點				
	未分類	第一類 (0~5m)	第二類 (5~10m)	第三類 (10~15m)	第四類 (15m以上)
	423	38	51	193	147
$\pm 10\%$	84.9%	89.5%	96.1%	98.4%	100%
$\pm 20\%$	90.8%	94.7%	100%	100%	100%
$\pm 30\%$	92.7%	97.4%	100%	100%	100%
$\pm 40\%$	96.0%	97.4%	100%	100%	100%
$\pm 50\%$	98.1%	100%	100%	100%	100%

表 2：各類遙測水深之標準誤差值

水深 標準誤差	迴歸點(m)	驗證點(m)
未分類	0.88	0.90
第一類(0~5m)	0.34	0.36
第二類(5~10m)	0.38	0.46
第三類(10~15m)	0.57	0.47
第四類(15m以上)	0.47	0.51

##### 2. 分類之推估結果

本研究係以東沙環礁淺海水深為主，故以第一類至第四類的分類水深為探討範圍。將潮汐修正後的每一類別均採隨機選出迴歸點與驗證點，先迴歸出迴歸式，將各迴歸式於驗證點中推估演算出水深並與實測水深比較。

在第一類 0~5m 水深中，根據第(3)式於 43 點實測資料與遙測資料所迴歸出迴歸式為：

$$Y = -4.6146X + 4.6635$$

$$R^2 = 0.8515$$

將上述迴歸式於 38 個驗證點計算出遙測水深，並

與實測水深加以分析，其 $R^2 = 0.7907$ (圖 3)。水深在誤差量為實測水深的 $\pm 10\%$ 內的測點時，迴歸點所涵的資料點只有 76.7%，而驗證點為 89.5%，但在誤差量為實測水深的 $\pm 20\%$ 內的測點時，迴歸點所包涵的資料點已達到 97.7%，驗證點亦有 94.7%。這表示當實測水深 5m 時，遙測推估水深在 4~6m 範圍內迴歸點所涵資料點可達 97.7%，驗證點中可達 94.7%。迴歸點誤差量在實測水深的 $\pm 30\%$ 內的測點時包涵的資料點高達 100%，而驗證點誤差量在 $\pm 50\%$ 時亦達 100%(表 1)。

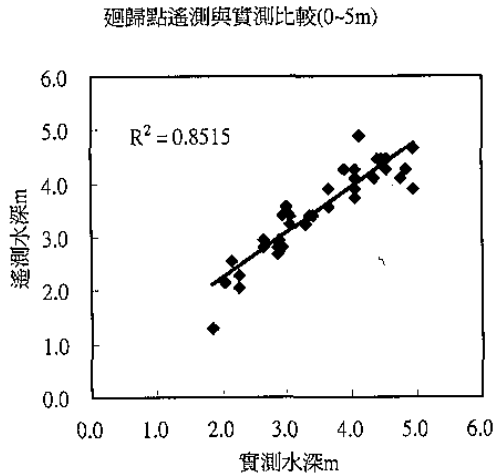


圖 3：第一類(0~5m)遙測水深推估及比較

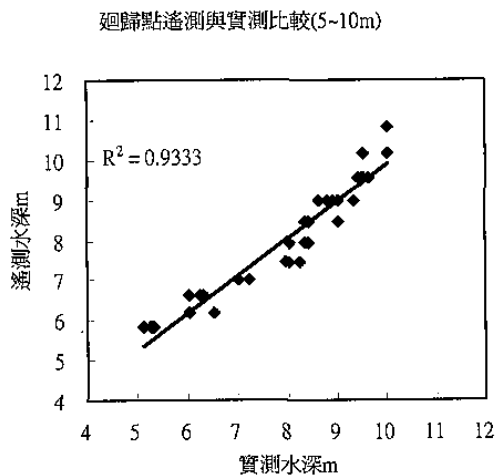


圖 4：第二類(5~10m)遙測水深推估及比較

在第二類 5~10m 水深，根據第(3)式於 54 點實測資料與遙測資料所迴歸出迴歸式為：

$$Y = -8.311X + 5.8257$$

$$R^2 = 0.9333$$

於 51 個驗證點計算出遙測水深後與實測水深加以分析，其 $R^2 = 0.8866$ (圖 4)。水深在誤差量在實測水深的 $\pm 10\%$ 內的測點時，迴歸點包涵高達 94.4%的資料點，驗證點亦有 96.1%的資料點。兩者於實測水深的 $\pm 20\%$ 內的測點時所包涵的資料點均已達 100%(表 1)。

第三類 10~15m 水深，為本研究實測資料裡佔最多部份，根據第(3)式於 194 點實測資料與遙測資料所迴

歸出迴歸式為：

$$Y = -3.8143X + 7.8374$$

$$R^2 = 0.8742$$

於 193 個驗證點計算出遙測水深後與實測水深加以分析，其 $R^2 = 0.9109$ (圖 5)。水深在誤差量在實測水深的 $\pm 10\%$ 內的測點時，包涵的資料點已達至 99.0%，驗證點亦有 98.4%，而兩者誤差量於實測水深的 $\pm 20\%$ 內的測點時均已達 100%(表 1)。

迴歸點遙測與實測比較(10~15m)

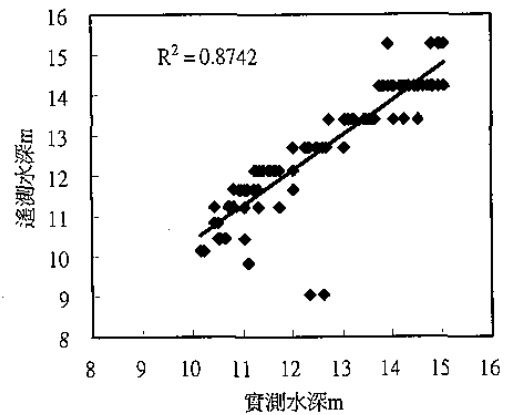


圖 5：第三類(10~15m)遙測水深推估及比較

迴歸點遙測與實測比較(15m以上)

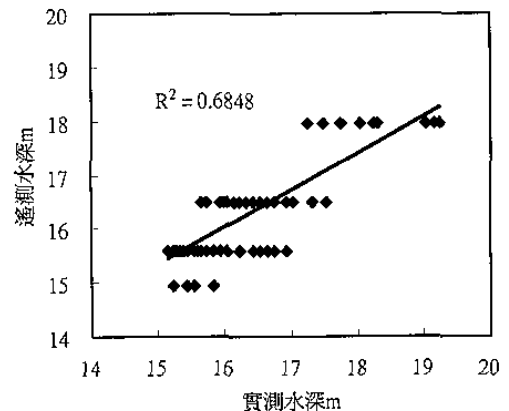


圖 6：第四類(15m 以上)遙測水深推估及比較

第四類 15m 以上水深，最深不超過 25m，根據第(3)式於 148 點實測資料與遙測資料所迴歸出迴歸式為：

$$Y = -2.3556X + 11.02$$

$$R^2 = 0.6848$$

於 147 個驗證點中計算出遙測水深後與實測水深加以分析其相關性 $R^2 = 0.7176$ (圖 6)。在誤差量為實測水深的 $\pm 10\%$ 內的測點時迴歸點所包涵的資料點已達 100%，而驗證點亦相同。第四類準確率之所以達 100%，係因該類水深誤差量於實測水深的 $\pm 10\%$ 內的測點時，其範圍較大，故包涵的資料點會較高。

各分類所推算之水深的與實測值的誤差範圍，除第一類分布於 $\pm 10\% \sim \pm 40\%$ 間外，其他三類的推算水深與

實測值的誤差範圍均在 10% 以內。而未分類的推算水深誤差分布範圍較大，雖然有部份誤差超過  $\pm 50\%$ ，但誤差範圍在實測值的  $\pm 20\%$  內的點數已達 90.8%。分類後之誤差分布則較為集中；在第一類中，誤差於  $\pm 20\%$  組界內達 97.7%，在驗證點中為 94.7%。第二、三、四類又更為集中，不論是迴歸點或是驗證點誤差在  $\pm 20\%$  組界內均達 100%。

標準誤差值未分類與分類均介於 1m 之內，以未分類偏差較大（迴歸點 0.88m、驗證點 0.90m），分類後則明顯變小，第一類（迴歸點 0.34m、驗證點 0.36m）、第二類較第一類高（迴歸點 0.38m、驗證點 0.46m）、第三類又較第二類高（迴歸點 0.57m、驗證點 0.47m）、第四類只有驗證點較第三類高（迴歸點 0.47m、驗證點 0.51m）（表 2）。

本研究利用光學特性以監督式分類法將影像分為 6 類，其中第五類為超深水域及第六類為雲與陸地。將分類後的影像，以各類迴歸式來推估該衛星整張影像水深深度。如圖 7 所示，其環礁內水深仍以 10~20m 為多數，環礁外外圍水深較深。在東沙島西方與西南方海域，其深度顯示亦與 2001 年 10 月海軍測量局所發行之圖號 61303（東沙島附近）海圖相近。

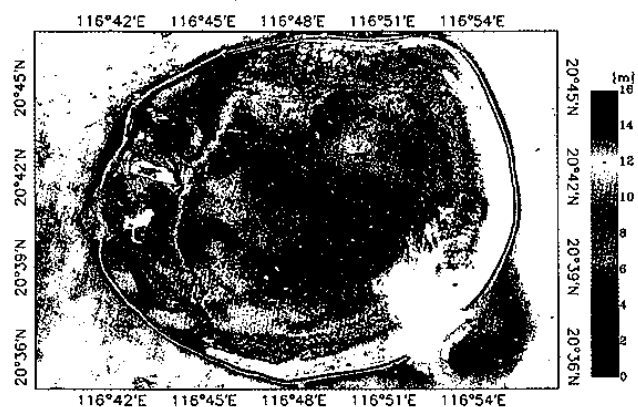


圖 7：全影像分類之遙測水深

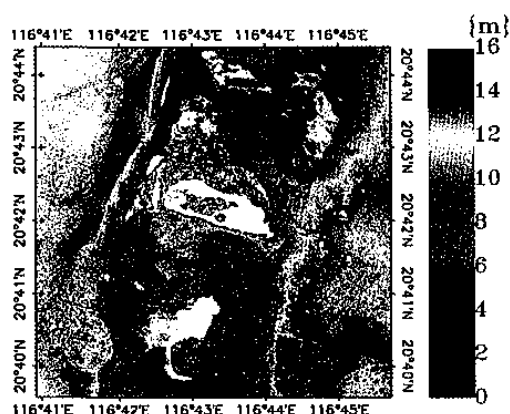


圖 8：東沙島附近水深分布

在環礁東、北及南側部分，亦可明確得知該部分與陸地相似，應為陸地或極淺水深區，水深趨近於零之淺灘區，在潮位較低時可能會露出水面，但在本研究所採用的衛星資料的近紅外波段 band 4 影像顯示該區域為水體所覆蓋。本研究結果顯示，在東沙環礁北、

東、南方，其水深極淺不利船隻航行，且有擱淺危險。由圖 8 所示，在東沙島北方水域與陸地相同顏色部分，為水深深度極淺區域，該海域同樣也不利船隻航行。在島的南方水深則可達 10m 以上，船隻可於該海域航行。

## 五、結論

本研究結果顯示，在未分類條件下，由衛星資料所推估的水深與實測水深間相關決定係數  $R^2$  達 0.94 以上。而誤差在實測水深  $\pm 20\%$  時，已包涵了 90% 以上的資料點，其標準誤差值小於 0.90m。表示使用單波段水深演算法，可以得到的良好的準確度。

經分類後所推估的水深，在誤差方面，除第一類在  $\pm 10\%$  的水深誤差量，佔所有迴歸點的 76%，但在  $\pm 20\%$  時則可達 95% 以上，其他類水深，在  $\pm 10\%$  的水深誤差量，佔所有迴歸點的 94% 以上，而誤差在  $\pm 20\%$  均都已達 100%。各類的標準誤差值均小於 0.57m，各類不論在迴歸點或驗證點的標準誤差值都遠較未分類時的標準偏差值小，故可推定，利用分類方式推估水深，其準確度較未分類所推估的結果高。

未來以衛星遙測方式來推估淺海水深有其必要性，在不利傳統船測方式之海域或船隻無法到達之處，更顯其重要性。在本研究以 SPOT 5 衛星來遙測東沙環礁內水深推估，雖然該衛星的空間解析度並非最高，但考量其便利性下嘗試予以研究，其研究結果具有相當高的準確度。遙測感測器接收來自水面、水中及水底的後向輻射時所受干擾因素很多，舉凡浪、流的影響、水質清澈度及水中懸浮物或底質都是影響遙測的因素。而衛星本身的空間的解析度亦也是影響遙測的另一重要因素，許多研究已發現，高解析度的衛星影像有助於遙測水深的準確度，尤其近年已有解析度在 1m 下的商業衛星，其在水深遙測應用上亦有不錯的表現，期望將來能有機會使用更高解析度的衛星來針對該海域予以研究。另外，本研究中也發現底質不同也會造成遙測水深的誤差，如能將底質予以分類後再推估水深，或許在提高遙測準確度上會有所幫助，畢竟「東沙」將在近年成為我國第一座「國家海洋公園」，而任何對該水域之研究及探討均有其重要性與必要性。

## 誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會專題研究計畫 (NSC94-2611-M019-14 及 NSC 95-2611-M-019 -011) 支持得以順利完成。另外，國立中央大學太空及遙測研究中心提供的 SPOT 衛星資料，在此一併誌謝。

## 參考文獻

- 太空及遙測研究中心資源衛星接收站，2005：使用者手冊(第四版)，共 95 頁。
- 呂黎光，2004：捷鳥衛星影像應用於墾丁淺海水深之測繪分析，航測及遙測學刊，第 9 卷，第 2 期，23-42。
- 曾忠一，1988：太氣衛星遙測學，台北市：渤海堂，共 630 頁。

- Blyth, K, 1981: Remote Sensing in Hydrology. Report No. 74, Institute of Hydrology, Wallingford, pp. 170.
- Doak, E, J. Livisay, D. Lyzenga, J. Ott, and F.C. Polcyn, 1979: Landsat offshore studies along the western coast of Libya, ERIM report No. 30700-1-F.
- Gross, M. Grant, 1992: Oceanography, 6<sup>th</sup> ed., Prentice-Hall, pp446.
- Irish, J. L. and W. J. Lillycrop, 1999: Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, 123 - 129.
- Islam, A., J. Gao, W. Ahmad, D. Neil, and P. Bell, 2004: A composite DOP approach to excluding bottom reflectance in mapping water parameters of shallow coastal zones from TM imagery, Remote Sensing of Environment, 92, 40-51.
- Jerlov, N. G, 1951: Optical Studies of Ocean Waters, Reports of the Swedish Deep sea Expedition, 3, 1, 3-57.
- Lafon, V., J.M. Froidefond, F. Lahet, and P. Castaing, 2002: SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid inlet based on field measurements, Remote Sensing of Environment, 81, 136-148.
- Leu, L. G., Y. Y. Kou, and C.T. Liu, 1999: Costal Bathymetry from the Wave Spectrum of SPOT Images, coastal Engineering Journal, 41, 1, 21-41.
- Tripathi, N. K. and A. M. Rao, 2002: Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using IRS-1D LISS-III data, Int. J. Remote Sensing, Vol.23, 6, 1013-1025.