

嘉南藥理科技大學 100 年度教師專題研究計畫結案報告

利用 GPS 反射信號偵測水面波形之特性

Using GPS reflective signals for Monitoring Water Wave Patterns

執行期限：100 年 1 月 1 日至 100 年 12 月 31 日止

主持人：徐博賢 單位名稱：應用空間資訊系 計畫編號：CN10021

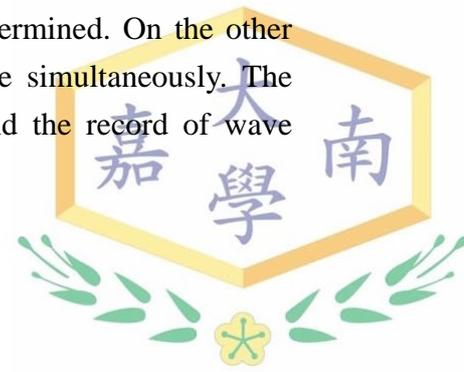
中文摘要

本研究主要是將 GPS 衛星接收儀整置於固定平台，設置於成功大學位於安南區之水工實驗所大型造波水槽上之三角鐵框架，整合右旋與左旋圓極化天線，接收將來自 GPS 之直接信號與地面或水面之微弱反射訊號，進行科學分析及應用研究。藉由微調接收天線使其可分辨來自 GPS 之直接與反射訊號，以獲取天線有效接收頻率與方位，再依此幾何方法，進一步利用各衛星與接收儀天線所在位置形成之對應投影，反推算所接收各組微弱反射訊號之地面或水面反射點位置。其中之接收處理方式，主要為應用 GPS 直接訊號與反射訊號之相位觀測量，比對其訊號強度、修正時間延遲量與大氣延遲量後，完成求解反射點位置與高程。在實驗研究與分析過程中，將妥適調整接收儀之軟、硬體，在訊號處理與測試階段，能達到有效控制直接與反射訊號之接收，以整數周波未定數求解法則，應用於求解相位觀測量之周波未定值，藉以提昇反射點之坐標位置與高程精度。另外亦設置水位計，分別以不同頻率紀錄水波之高度。

在實驗解算分析時，主要在於推求水面與天線間之距離，藉此推算水面波之高程，並比較水位計量測之結果，兩者比較相同度在 90% 以內。

Abstract

The purpose of this research is to develop a highly integrated GPS receiver with RHCP and LHCP antennas mounted on an iron-frame to receive direct and reflected GPS signals. In order to successfully acquire and track weak reflected GPS signals from ground and water-surface, there are several designs must be analyzed. First of all, both RHCP and LHCP antennas are employed and adjusted so that direct and reflected signals can be acquired. Then, the height of antennas foot print can be solved by analyzing the carrier phase of observation. During receiving GPS direct and reflected signals, by comparing intensity of signal, modifying time delay and atmospheric delay, the position and height of the reflected point of the signal can be solved. Since the locations of the reflected points are the surface of the water, the pattern of water wave can be determined. On the other hand, the heights of water wave are recorded by the wave gauge simultaneously. The differences between the reflection heights of this GPS system and the record of wave



gauge are almost identical within 90%.

壹、前言

使用 GPS 接收儀定位測量時，通常會將多路徑作用（multipath）視為無用雜訊以軟體與天線過濾掉，但近十幾年來，歐美國家學者研究發現，GPS 反射訊號可成為有用之訊號。根據 Manandhar, *etal.* 2005 強調，GPS 反射訊號所隱含之資訊包括反射物體介質本身與來自於反射訊號特性之變化與反射物體特性具密切關聯性。最近分析 GPS 反射訊號（Reflected GPS signal ,RGPS）來遙測地表資訊的技術逐漸受到重視，且由於 RGPS 具極佳的機動性、全天候且可以提供大範圍、多偵測算點、低成本之水面資訊，此項技術已應用於水體之研究。

依據相關論文文獻資料記錄、蒐集與分析(Shen, *etal.*, 2006)，已成功的擷取來自地面與水面之微弱 GPS 反射訊號，並進行科學分析及應用之研究，例如以地面多路徑 GPS 訊號處理地表反射物體，成功解算獲得高精度的座標，其模式相對數位高程模式(DEM)可達大約 20 公分解析精度(Weiss, *etal.*, 2006; Shen, *etal.*, 2007)。

目前台灣地區對於水位變化監測系統大多採用固定式水位計觀測；另外，於出海口處的潮位高程變化量測也非岸邊潮位計、波高計可以勝任，而且每一水位計均須以電纜線連接於電腦紀錄處理，致使水體之運動受到阻礙，影響真正之波浪型態，且成本較高。因此，一般對於上述在河川或近海岸某處提供點形式水位資料，其餘地區則僅能採用外插方式獲取水位資料的方法，並無法即時提供大範圍的面狀的水位資料。

由於 RGPS 之測量並不與被偵測之水體接觸，而是以遙測方式接收反射信號，因此，為驗證 RGPS 之定位精度與可被測定之波浪形態，本次實驗選在成功大學位於安南區之水工實驗所大型造波水槽(super tank)，水槽裝備有多樣造波能力之設備以及水位計，以便於研究何種之波形有助於 RGPS 之偵測，以及驗證其波形與水位計之記錄是否相符。

貳、RGPS 之理論探討與實驗

以下將對 RGPS 之定位理論與數據處理方式，作深入分析，並對大型造波水槽之實驗結果，深入探討。

一、RGPS 之原理與數據處理方法

GPS 之定位原理不外利用接收訊號中電碼(code)、載波相位(carrier phase)或是兩者都採用，組成觀測方程式，進行數據處理，即可解出觀測者位置。但是左旋天線與



右旋天線接收衛星訊號時，距離不同，必須修正衛星星曆之時間函數(Goad and Borre, 1996)，也就是重建軌道參數之函數來轉換時間與曆時，並將衛星之位置，置於地心固地(Earth-Centered, Earth-Fixed, ECEF)座標系中，同時修正天線接收直接信號與反射信號時之時間偏差，進一步以周波未定值降相關平差法(Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment, LAMBDA)，快速解出整數周波未定值，以提升座標精度(Teunissen, 1995; Teunissen, etal, 1997; Teunissen, 1998)。解算之觀測方程式可參考相關文件，在此不再贅述(Goad and Borre, 1996; Strang and Borre, 1997; Shen, 2009)。在引用公式時，必須注意直接信號與反射信號標示不同，不可混淆。為能解出整數周波未定值，必須預估大氣層對信號之遲滯模式(Zuffada and Zavorotny, 2004)，對於離子層與對流層之遲滯，可由以下公式推求：

$$\text{Ion} = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \cdot [(\Phi_{2d} - \Phi_{1d}) + (\lambda_1 N_{1d} - \lambda_2 N_{2d}) + (\varepsilon_{\Phi_{1d}} - \varepsilon_{\Phi_{2d}})] \quad (1)$$

$$\text{Trop} = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \cdot (\Phi_{2d} - \lambda_2 N_{2d} - \varepsilon_{\Phi_{2d}}) - \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \cdot (\Phi_{1d} - \lambda_1 N_{1d} - \varepsilon_{\Phi_{1d}}) - [R_d + C \cdot (dt - dT)_d] \quad (2)$$

至於為提升解算精度而求解整數周波未定值，所使用之 LAMBDA 公式 (Joosten, 1999)，可由下式表示：

$$E(l) = Ax + Nn + e \quad (3)$$

$$e_{\min} = \text{Min} \|l - Ax - Nn\|_{Q_y}^2, \quad x \in Z_m, \quad n \in R_n \quad (4)$$

式中

$E(l)$ 觀測值減計算值之向量

A, N 基線與週波未定值之設計矩陣

n 未知整數週波未定值向量

x 未知基線向量

e 未模式化誤差之向量

整個數據處理可分為以下三個步驟：第一步，使用最少4個以上衛星C/A碼，一個時段接著一個時段(epoch by epoch)的推求其位置，第二步，使用L1, L2相位與P2以



實際之周波未定值來模擬其位置與預估高程，第三步，則使用LAMBDA技術來搜求整數周波未定值，來提升高程之預估值。在整個過程中，必須仔細斟酌研判離子層與對流層遲滯模式，做出正確修正，才能確保計算之精度。

求解獲得正確之RHCP與LHCP天線座標以後，平均水面高程(反射水面)即可確定，衛星、RHCP與LHCP天線，以及反射點之相關位置，如圖1所示(Chen, etal, 2007)。

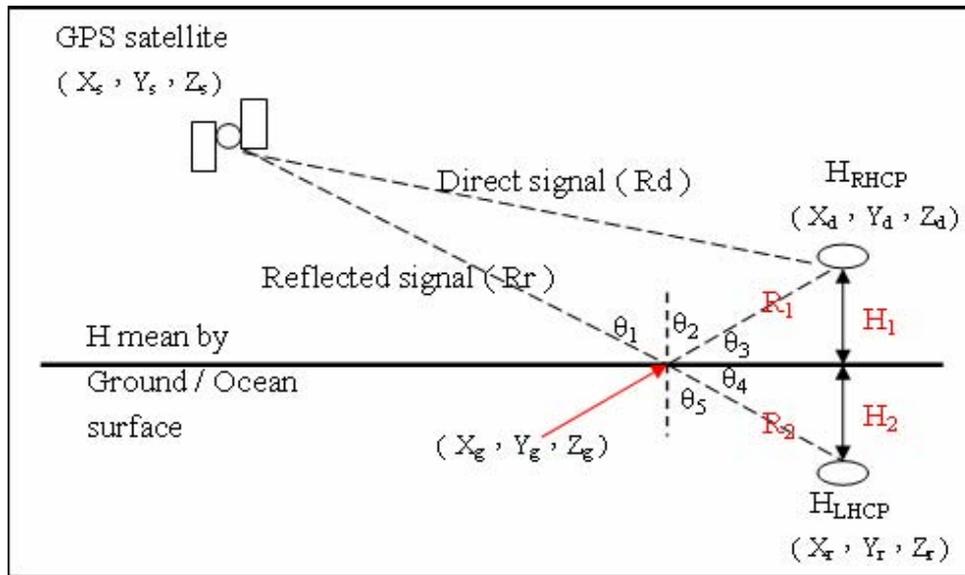


圖1. 衛星、反射點、RHCP與LHCP天線之幾何相關位置

當信號由GPS衛星發射後，經大氣層到達地球，使用者將接收到直接信號與反射信號，它們的幾何關係說明如下：它的反射角等於入射角，也就是 $\theta_1 = \theta_2$, $\theta_1 = \theta_5$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_5$, 則 $\theta_2 + \theta_3 = \theta_5 + \theta_4 = \frac{\pi}{2}$, $\theta_3 = \theta_4$, 因此, $R_1 = R_2$, $H_1 = H_2$, 平均水面(反射面) 為

$$H_{ground} = H_{RHCP} - \Delta H = H_{LHCP} + \Delta H \quad (5)$$

式中

$$\Delta H = \frac{1}{2}(H_{RHCP} - H_{LHCP})$$

H_{RHCP} RHCP 天線之橢球高

H_{LHCP} LHCP 天線之橢球高

H_{Ground} 平均水面之橢球高



接著，將解出反射點中心位置。由圖 2 可知，RHCP/LHCP 天線之地理座標與水面高為已知，地面之瞬間座標 $(\lambda, \varphi, H)_{\text{ground}}$ 可以轉換為 3D 卡氏座標 (X_g, Y_g, Z_g) ，而地心之原點座標為 $(0, 0, 0)$ 。

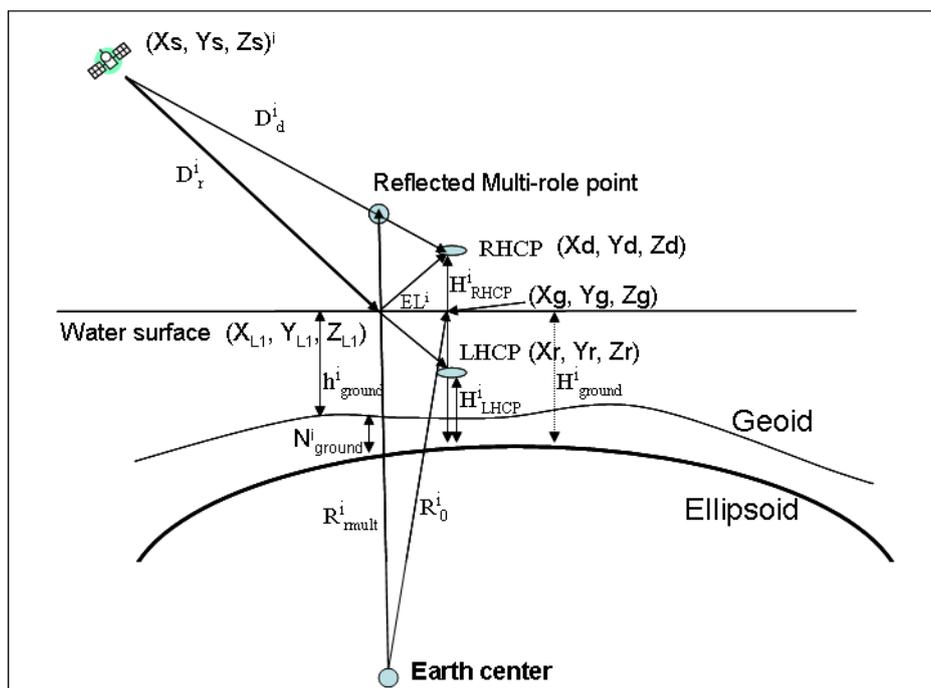


圖2 衛星、RHCP/LHCP天線、反射點與地心之相關位置

它們之間的距離 R_0^i 、 D_d^i 與 D_r^i 可由下列式子表示：

$$R_0^i = \sqrt{X_g^2 + Y_g^2 + Z_g^2} \quad (6)$$

$$D_d^i = \sqrt{(X_d - X_s)^2 + (Y_d - Y_s)^2 + (Z_d - Z_s)^2} \quad (7)$$

$$D_r^i = \sqrt{(X_r - X_s)^2 + (Y_r - Y_s)^2 + (Z_r - Z_s)^2} \quad (8)$$

式中

R_0^i 地面瞬間座標與地心之距離

D_d^i RHCP 天線與衛星之距離

D_r^i LHCP天線與衛星之距離

多角色反射點(reflected multi-role point)位於反射點投影在衛星與RHCP天線連線之直線上，其坐標可由(9)式求出，然後反射點中心可經(11)式解出，接著可由(12)式求出平均水位面之正高。

$$\begin{bmatrix} X_{mult} \\ Y_{mult} \\ Z_{mult} \end{bmatrix}^i = \frac{D_d^i - \frac{\Delta H}{\sin(EL)^i}}{D_d^i} \cdot \begin{bmatrix} X_d - X_s \\ Y_d - Y_s \\ Z_d - Z_s \end{bmatrix}^i + \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}^i \quad (9)$$



$$R_{mult}^i = \sqrt{(X_{mult})^2 + (Y_{mult})^2 + (Z_{mult})^2} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_{L1} \\ Y_{L1} \\ Z_{L1} \end{bmatrix}^i = \frac{R_0^i}{R_{mult}^i} \cdot \begin{bmatrix} X_{mult} \\ Y_{mult} \\ Z_{mult} \end{bmatrix}^i \quad (11)$$

$$h_{ground}^i = H_{ground}^i - N^i = \frac{H_{RHCP}^i + H_{LHCP}^i}{2} - N^i \quad (12)$$

式中

EL 衛星之高程角

R_{mult}^i 地心與多角色反射點之距離

h_{ground}^i 平均水面之正高

N^i 反射點之大地起伏值

二、實驗過程與結果

本次實驗地點位於成功大學安南區水工實驗室，在大型斷面水槽上架設角鋼製作之框架，裝置 RHCP/LHCP 天線，所使用之儀器、觀測狀況與結果說明如下：

(一)本次實驗所使用之儀器與性能

1. 大地測量型雙頻接收儀：SOKKIA L1/L2 雙頻 GPS 接收儀。本次使用之機型為 NovAtel DL-V3，它使用 OEMV-3 板卡，安放在耐用的鋁質封裝內。DL-V3 提供靈活的連接方式，包括串口、USB、乙太網和藍牙介面，它能夠接收 GPS 和 GLONASS 的定位信號以獲取最大的靈活性並改善在惡劣環境下的定位能力，而且 DL-V3 也支援 GPS L2C 與 L5 信號。

2. 右旋天線為接收直接訊號天線(Right Hand Circular Polarization, RHCP)，本次使用之 NovAtel 天線為 GPS-702-GG，是 GPS-700 天線系列的一部分，它提供接收 GPS L1 和 L2 頻率以及 GLONASS 頻率，也提供聯合接收 GPS 加 GLONASS 信號，並具有與單獨 GPS 天線相同的性能。為增加可靠性，天線相位中心對衛星方位角和仰角變化保持穩定。由於信號接收不受天線轉動和衛星仰角所影響，可以非常容易的放置和安裝。另外，L1 和 L2 信號的相位中心都在同一個位置，再加上獨立天線間相位中心變化最小的特性，使 GPS-702-GG 對量測任意長度基線都很理想。

3. 左旋天線為接收反射訊號天線(Left Hand Circular Polarization, LHCP)，型號為 Novatel H-601，作為接收 GPS 反射訊號之天線。

4. 接收儀相關軟體：本次試驗所採用之儀器軟體為 CDU PC Utilities 與 Convert4 version，CDU 之視窗有衛星分布視窗(Constellation Window)、頻道追蹤狀況視窗



(Channel Tracking Status Window)、位置視窗(Position Window)、速度視窗(Velocity Window)，這些視窗可自由選擇切換。Convert 4 程式是將觀測資料轉換為衛星通用格式 RINEX，以備後續之計算工作。

(二)儀器之架設與實驗

大型斷面水槽全長300m，裝備有電子水力伺服回饋控制系統，其造波器可產生1.0m之波浪。GPS接收儀架設位於造波機起算200m處，於此處設有一90cm的波高計，另造波機起算224m處亦設有5m的波高計。浮筒設置位置以5M波高計為起點後5m處，如圖3所示。

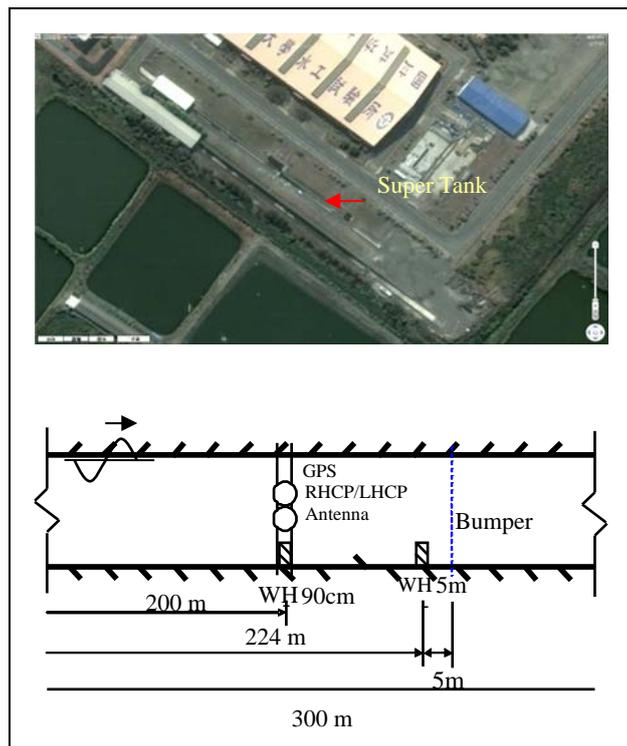


圖 3 大型斷面水槽之設備與其相關位置

波浪週期採 2sec、4sec、5sec、6sec，波高 60cm，靜止水面原先設定 3.5m，接收 10Hz 衛星信號。本次實驗所產生之規則波有 2sec/cycle, 4sec/cycle, 5sec/cycle 與 6 sec/cycle，幅度都為 60cm。水位計紀錄之接收頻率設定為 20Hz。雖然造波有四類波形，但由於衛星位置與浪高影響信號接收，以及後半部有浮筒(bumper)阻礙，經信號處理分析，最後僅選取 5sec/cycle 的波形，其餘均因接收信號遺失太多而放棄。

以 5sec/cycle 規則造波，以水位計紀錄之波形如圖 4，前面 3 個波為未成熟波，通常捨棄不用。



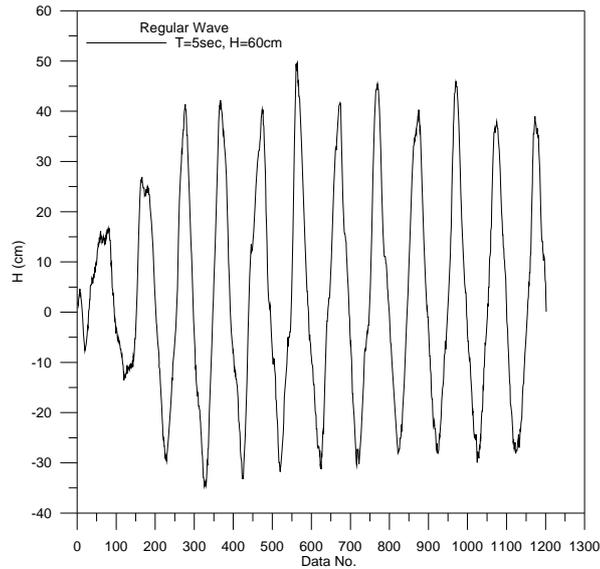


圖4 水位計紀錄之5sec/cycle規則波

造波機以 5 sec/cycle 模式產生波浪，衛星接收儀以 10Hz 時間段紀錄由 RHCP/LHCP 天線接收之信號。在分析衛星訊號時，由於左旋天線接收之訊號相當微弱，必須決定那五顆衛星之信號，最為合適可用。在檢查 L1, L2 相位觀測時，由接收儀記錄之原始數據信號強度 S1, S2 或 SNR 值，可判斷選出最適當之衛星，最後選出 PRN 9, 18, 24, 26, 27 等五顆衛星。

根據前述之資料處理程序，計算解得各顆衛星之反射點坐標高程足跡 (footprint)，圖 5 為衛星 PRN09 反射點波高與水位計記錄波高之重合情形，紅色曲線為水位計紀錄，藍色線條為衛星反射點高程分佈，雖然細節部分因碎浪等因素並不完全密合，惟整體視之，整個波形週期等配合尚稱完整，圖之下半部為衛星之 SNR 值分布情形與衛星之高程角，兩者間看不出有何關係。惟仔細分析反射點足跡，很明顯的，若能以數學模式濾波圓滑，將可獲得較具意義之波形。

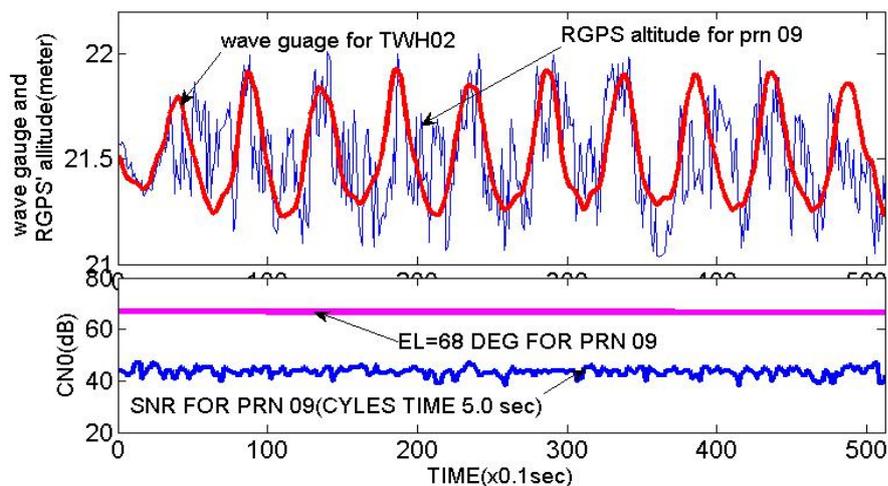


圖5 衛星PRN09反射點波高與水位計記錄波高之重合情形



圖6 為衛星PRN26反射點波高分布與水位計記錄波高之重合情形，紅色曲線為水位計紀錄，藍色線條為衛星反射點高程分佈，兩者波形週期有 Δt 的位移，主因為反射點位置與水位計位置，有前後差距，如果兩者位置作輕微調整，即可獲得較佳之重合。圖6之下半部為衛星之SNR值分布情形與衛星之高程角，由衛星之SNR值分布可發現波形與高程角有極高之相關性，也就是說衛星之高程角對偵測水波波型，具一定之相關性，因此如果能對衛星的軌跡方位與高程角，做深入研究，確認在何種狀況下相互配合，則可獲得較佳之偵測結果。

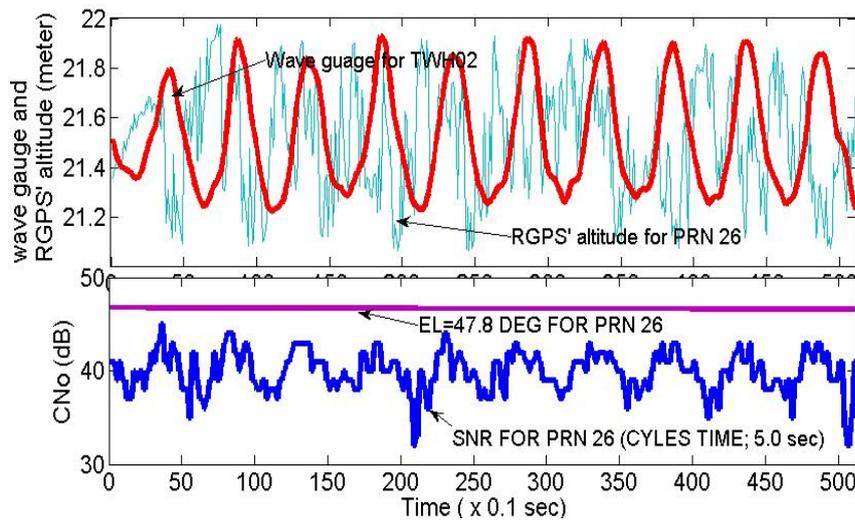


圖6 衛星PRN26反射點波高與水位計記錄波高之重合情形

叁、結果與討論

- 一、從本項研究證實RGPS技術對於偵測波浪形態是一種有用之工具。
- 二、以RGPS技術偵測水波，不需接觸水面，不會干擾水波，不像水位計需置於水中紀錄，會干擾水流運動。
- 三、從實驗證明RGPS技術可以偵測水波型態，但是對於衛星之高程角與方位角之配合，需做更進一步之研究分析，另外，對反射點之足跡(footprint)，應研究以何種濾波方式處理，方能求得較佳之成果。
- 四、衛星信號之SNR值對於偵測水波波型之影響應有一定之關係，這方面還需進一步研究。

肆、參考文獻

Chen, C.H., Hsu, P.H., Tseng, C.L.: The Research of Reflected GPS Signals Applied in Estimating Water Surface Height for LanYang River, 2007 annual meeting and symposium of Taiwan GIS Association, Tainan, 2007.

Goad, C. C. and Borre, K.: RECPOS Least-squares searching for receiver position for MATLAB. MATLAB software supply. 1996.



- Joosten, P.: Integer ambiguity estimation using LAMBDA (basic version) for MATLAB. MATLAB software supply, Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology, 1999.
- Mananlhar, D., Shibasaki, R., Torioto, H.: Prototype Software-based Receiver for Remote Sensing Using Reflected GPS Signals. ION Proceeding, GNSS 2005
- Shen, L C, C L Tseng, J C Juang and C C Chang: Design of an Integrated GPS Receiver for the Processing of Reflected GPS Signals, ION GNSS, 26-30 September, Fort Worth, US. 2006
- Shen, L C, J C Juang, C L Tseng and C C Chang: Applications of an Integrated GPS Receiver for Reflected GPS Signals L1/L2 Observation Techniques with River's Stream Flow and Water Altimetry, ION 63rd Annual Meeting, 23-25 April, , Cambridge, US. 2007
- Shen, L.C.: Research on GPS Reflected Signal Processing Technique and Applications. PhD. Dissertation, NCKU, Taiwan, 2009.
- Strang, G. and Borre, K.: Linear Algebra, Geodesy, and GPS, Wellesley-Cambridge press, 1997.
- Teunissen, P.J.G.: The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, Journal of Geodesy, Vol. 70, pp. 65-82, 1995.
- Teunissen, P.J.G., De Jonge P.J., and Tiberius C.C.J.M.: The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans, Journal of Geodesy, Vol. 71, No. 10, pp. 589-602, 1997.
- Teunissen, P.J.G.: GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing Concepts, in GPS for Geodesy, Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A. (eds.), Springer, 1998.
- Zuffada C. and Zavorotny V.: GPS reflections for Oceanography, ice and surface hydrology, UCAR Summer COSMIC colloquium, Boulder, CO, 200



