

潮位與波浪觀測GPS浮標之研發

林演斌¹ 陳聖學¹ 黃清哲^{1,2} 高家俊^{1,2}

¹國立成功大學近海水文中心

²國立成功大學水利及海洋工程學系

摘要

交通部從美國引進新一代潮位計，研發完成新一代潮位觀測系統，並推廣利用，成為中央氣象局、水利署與內政部等單位作業化潮位觀測站之標準。由於潮位計與靜水井需附掛在碼頭構造物架設，絕大部分設置在港內，僅有極少數潮位站利用海上觀測樁觀測。由於漲退潮時，海水流動受港口構造物影響，港內與港外之潮高與潮時，皆可能產生差異，其差異仍有待探討。此外，進行地形水深測量時，常採用鄰近岸邊之潮位修正水深，由於港內外之潮位差異，仍可能導致誤差。綜合所述，發展港外潮位觀測技術，對於港內外潮位特性差異，能提供佐證資料，在地形水深測量時，亦能提供港外潮位資料作修正。本研究結合資料浮標與RTK (Real-Time Kinematic) GPS技術，發展出GPS浮標，以進行即時的潮位觀測，其中潮位資料與蘇澳潮位站資料比較，均方根誤差小於10 cm。此外，亦應用GPS浮標所直接地量測的水位原始數據，從時間與頻率領域，驗證了以加速度計間接地計算波浪之正確性。

關鍵字：資料浮標，即時，GPS，VBS-RTK，水位原始數據

一、前言

潮位之高低變化對於海岸及港灣地區的活動與安全有很大影響，例如船舶進出港灣需將潮位資料納入作為進出港口操船決策依據。另外，將潮位資料依照學理分析，可以準確地預測天文潮變化，為海岸地區防災決策所需的基本資訊。設置在海岸之潮位站依據天文潮位變化，可分析颱風警報期間之暴潮偏差與海嘯警報期間之異常水位變化。可見潮位即時觀測之重要性。

國內各單位基於業務職掌需要而進行潮位觀測，為能維持長期運作，大多於港內穩固的結構物處架設儀器，所使用之儀器技術有壓力式、新一代音波式等。然而由於各種外海活動需要正確的潮位資料，以作為預測或修正之依據，而在港內觀測潮位，無法完全代表外海之潮位，而在港外觀測，又不易覓得固定結構物，以建置既有潮位感應器。綜合以上說明，可知實有必要研發能夠長期且即時地在海外觀測潮位之技術。有鑑於此，本研究目的為利用資料浮標作為外海平台，結合即時運動GPS接收器、即時通訊等技術，發展出GPS浮標，並能利用基準站即時修正GPS訊號，直接獲得外海即時的高精度的潮位高度資料。

另外，由於異常波浪常危害人民生命安全，為減低災害，異常波浪之分析為其中重要工作，其分析需要先取得水位原始數據，而國內作業中資料浮標所

使用之加速度計數據，經過一連串分析流程，可獲得間接的水位時序列資料。若能收集另外儀器所直接觀測資料，加以驗證由加速度所獲得水位時序列資料之正確性，則能掌握異常波浪資訊之可靠度。本研究研發的GPS浮標能直接觀測水位原始數據，能驗證利用加速度所獲得之間接數據，此外，本研究亦針對波譜驗證進行探討。

二、文獻探討

Harigae et al. [1]利用低成本之汽車導航等級GPS接收器，研發高通濾波器及波浪分析方法，以觀測波高、週期與波向，其波高準確度為公分等級，波向準確度為5 degrees。其研究將低頻訊號濾除，因此無法觀測潮位。

Doong et al. [2]安裝GPS接收器於資料浮標上，擷取GPS接收器於三軸向之運動速度分析波浪，並以傳統的加速度計、傾角計、電羅經計算的結果驗證，波高與週期之相關係數達0.95。以GPS接收器之運動速度為一種適當的波浪觀測替代方案，但其GPS系統尚未具備觀測潮位功能。

Herbers et al. [3]使用GPS浮標、GPS漂流浮標與傳統的加速度計、傾角計、電羅經浮標互相比較波浪觀測結果，發現在估計一維波譜與方向波譜有良好的一致性，但其GPS浮標亦尚未具備觀測潮位功能。

Kuo et al. [4]使用PPP (Precise Point Positioning) 技術之GPS浮標，以觀測高頻的海水位變動，其觀測資料並非即時，且其均方根誤差僅為十公分等級 (decimeter level)。其研究亦量測潮位，但尚無法獲得即時的資料。

Joodaki et al. [5]使用單一GPS接收器於浮標上，以量測波浪，該研究尚未使用GPS接收器量測潮位。而Waseda et al. [6]之研究採用Harigae et al. [1]所發展之GPS系統，設置在其浮標上，依研究結果顯示，其浮標能正確量測波高，但尚未進行潮位觀測研究。

Kato et al. [7]使用RTK (Real Time Kinematic) GPS接收器，以觀測即時海嘯。Falck et al. [8]使用GPS接收器於浮標上，並建置RTR (Real-Time Reference station)，以觀測即時海嘯，並能分析潮位。Nagai et al. [9]使用RTK GPS接收器於浮標上，可觀測即時的海嘯、波浪與潮位，但此三研究皆建置實體基準站，從中獲得修正訊號，以達到足夠精度，且其所使用之GPS浮標直徑達4.5m，高度達17m，在應用時運送不易。

綜合以上文獻之研究成果可知，使用GPS技術以觀測海嘯、波浪與潮位，仍需進一步研究，能進行即時傳輸、避免設置基準站，與降低運送困難度，以符合國內防災之需求，因此有必要研發自主GPS浮標技術。

三、研究方法

為得到即時且準確的潮位與波浪資料，本研究整合相關技術發展出GPS浮標。GPS浮標的構件包含：資料浮標、傳輸裝置、資料擷取裝置、VBS-RTK (Virtual Base Station Real-Time Kinematic)定位技術、RTK GPS接收器、資料品管與分析技術、與AHRS (Attitude Heading Reference System)。本研究發展GPS浮標之系統流程圖、資料擷取裝置與軟體。此外，為驗證水位時序資料，本研究建立一套分析程序，可從加速度原始數據求得水位時序資料。

本研究使用雙頻雙星GPS接收器作為直接感應水位高度之感應器，結合相關技術而研發出GPS系統，並安裝於經濟部水利署蘇澳浮標，以進行驗證。

(一) 即時運動定位技術

即時運動 (RTK) 定位技術為基於GPS, GLONASS, Galileo等定位系統訊號中的載波相位 (carrier phase)技術，利用一參考站提供即時的修正訊號，以達到cm等級之準確度，此精度足以作為觀測水位原始數據之用。即時運動定位技術使用衛星載波本身作為量測訊號，而非取用包含於載波內之訊息。例如GPS L1載波內含的C/A碼 (coarse-acquisition code)改變相位之頻率為1.023 MHz，而L1載波頻率為1575.42 MHz，其波長為19 cm。若L1載波相位量測誤差為1%，則相當於基線長度之量測誤差為1.9 mm。

實務上一個RTK基準站可提供多個移動站修正訊號。移動站比較其接收之相位觀測量與從基準站收到的相位觀測量，而進行即時解算。使得移動站得以計算與基準站之相對位置達到公釐 (millimeters)等級之準確度。一般而言，雙頻系統之準確度在水平向為 $1\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$ (parts-per-million)，而在垂直向為 $2\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$ 。

虛擬參考站 (Virtual Reference Station, VRS) 擴展RTK技術之應用至參考站網之整個範圍，其可靠度與準確度是由參考站網之密度與性能決定。本研究係使用內政部國土測繪中心提供之即時定位服務，透過網路即時取得虛擬基準站 (Virtual Base Station, VBS) 之修正訊號，再將即時解算後之資料傳輸至成大近海水文中心而得。

(二) 水位時序資料分析流程

GPS浮標所使用之AHRS內含之感應器量測加速度、角度變化率與磁場強度，其被固定於儀器艙內，且其中一座標軸垂直於GPS浮標甲板面，以每小時512個、取樣頻率為1 Hz之加速度數據進行分析，從加速度產出水位時序資料之分析流程如圖1所示。

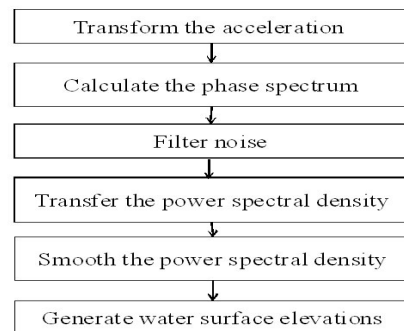


圖1 水位時序資料分析流程

(三) 潮位分析方法

取得每小時600個、取樣頻率為1 Hz之高度數據後，先應用解算品質指標濾除雜訊，再以算術平均計算該小時潮位。本研究引用均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 分析GPS浮標即時觀測潮位誤差。RMSE由下式計算：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (1)$$

其中 y_t 為潮位站之觀測值， \hat{y}_t 為GPS浮標觀測值， N 為全部樣本數， t 為下標，代表不同時刻。

四、結果與討論

(一) 實驗室測試

為檢驗GPS接收器之精度，於成大學生宿舍頂樓進行靜態測試。另外，本研究目標為研發具有觀測潮

位功能之資料浮標，由於使用環境為動態，本研究亦進行初步的動態測試。

1. 靜態測試

成大學生宿舍頂樓相當於13樓之高度，其四個方向之天空景觀如圖2。靜態測試期間之解算、傳輸頻率皆為1 Hz，擷取正高資料統計其樣本之標準偏差 (Standard Deviation, SD)，所擷取之正高資料即為以大地水準面 (geoid) 為基準之高度 (altitude above geoid)。



圖2 靜態測試時之天空情形

靜態測試、分析結果如圖3，依據GPS接收器技術規格 (specification)，垂向之RMSE為 $1.5 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$ ，而分析圖3資料之敘述性統計量，結果顯示，於2012年8月24日13時至25日8時測試期間，共取得68,400個樣本，其中包含3,843個未解算成功樣本，濾除這些樣本後分析，得高度平均值為67.226 m，SD為1.2 cm，最大值為67.291 m，最小值為67.042 m，全距為0.249 m，顯示實測結果符合技術規格，所量測之高度資料可達cm級精度。

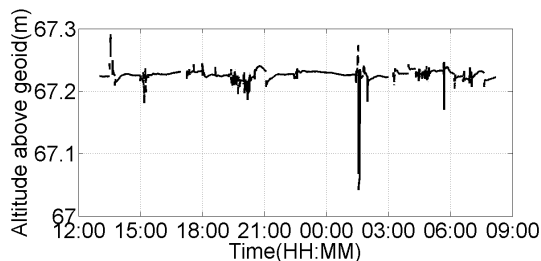


圖3 靜態測試高度資料變化圖

2. 動態測試

為取得高精度之解算成果，GPS接收器之衛星訊號須符合一定之條件，因此研擬於天空遮蔽較少之處以手持GPS天線模擬圓周運動，測試GPS儀器之動態反應。測試時將捲尺固定於直立桿件，由上往下拉直，當天線旋轉至上方時，捲尺讀數為2.04 m，當天線旋轉至下方時捲尺讀數約為0.9 m，可知旋轉軌跡直徑約1.14 m。旋轉週期以碼錶估計約為9.0~10.0 sec。動態測試正高資料變化如圖4所示，圖4中資料之取樣頻率為1 Hz，以該圖估計波高約0.92 m，而圖中於3 min內有近16個波動，計算平均週期約為11.2 sec。從以上結果可知，以正高資料估計之運動軌跡波高

與捲尺量測值相當，而實測週期與碼錶估計週期亦約略相當。

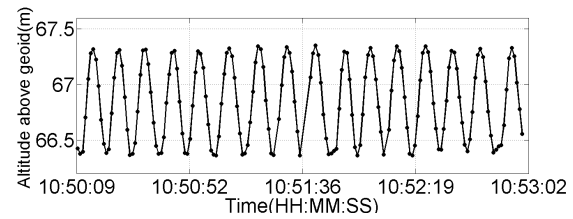


圖4 動態測試高度資料變化圖

(二) 現場測試

本研究目標為研發具有觀測潮位功能之資料浮標。由於使用環境為動態，本研究亦進行海洋現場動態測試。

1. 現場測試地點

GPS浮標測試位置在蘇澳港外海以北，其外觀如圖5。GPS浮標係於經濟部水利署蘇澳浮標上附掛GPS系統而成，浮標形狀為碟型，直徑為2.5 m。測試位置如圖6，該位置水深約20 m，離岸邊之最近距離為2.1 km。圖6中之蘇澳潮位站為交通部中央氣象局所有，位於蘇澳港內，與GPS浮標距離為4 km，其資料可作為驗證GPS浮標潮位資料用途。現場測試期間為2013年8月下旬，期間有TRAMI、KONG-REY颱風經過台灣東部外海。



圖5 GPS浮標外觀

2. 資料擷取

圖7為現場測試時GPS浮標資料流程圖，其中RTK GPS接收器輸出高度資料與品質指標資料，AHRS輸出加速度資料。資料擷取裝置每小時進行一次觀測，觀測時間為10 min。取樣頻率為1 Hz。取樣完成後，透過傳輸裝置將樣本資料傳送至接收系統，濾除雜訊後再分析潮位與波浪。



圖6 GPS浮標現場測試位置

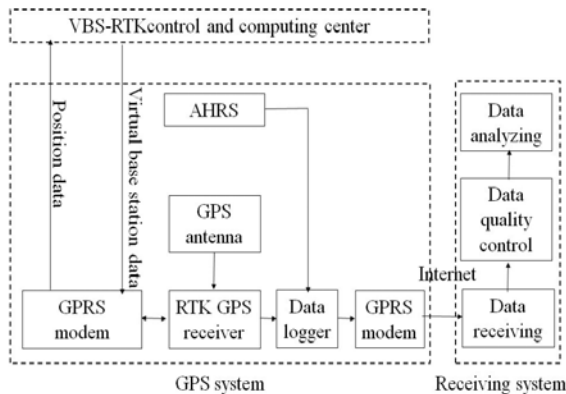


圖7 GPS浮標資料流程圖

3. 潮位分析

圖8、9分別為2013年8月20至22日與8月29至31日之潮位比較圖，圖中GPS浮標與蘇澳潮位站資料分別以紅色方形點線及黑色圓形點線表示，而RTK解算成功百分比資料以綠色菱形點線表示，為了比較，於繪圖前已先調整GPS浮標觀測資料之基準，使其與蘇澳潮位資料之基準一致。

圖8、9中，GPS浮標觀測即時潮位之RMSE分別為9.5 cm與5.2 cm，其中小部分之GPS浮標觀測潮位有遺漏，其原因為該次觀測未能獲得解算成功資料。此外，可發現大部分GPS浮標觀測資料，在高潮位期間，較蘇澳潮位低，僅於8月30日發生一次GPS浮標觀測資料，較蘇澳潮位高之情形，其原因可能與GPS浮標晃動有關。此外，蘇澳潮位站位於蘇澳港內，而GPS浮標位於港外，造成潮位誤差之原因，亦可能與地形有關。

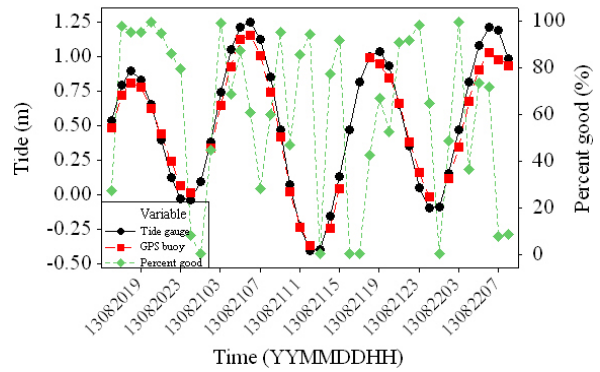


圖8 GPS浮標與潮位站潮位比較 (8月20-22日)

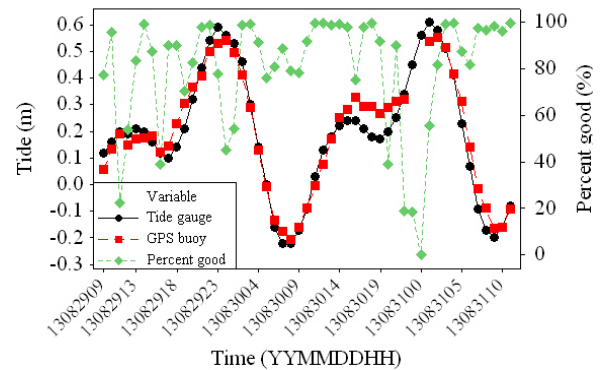


圖9 GPS浮標與潮位站潮位比較 (8月29-31日)

4. 波浪分析

GPS浮標即時觀測10 min之海面高度，直接獲得水位原始數據，由此水位可求得波高。透過AHRS加速度原始數據及分析流程，亦可間接獲得水位時序列資料。因此，由GPS所獲得的水位資料可用來驗證AHRS加速度計所產出之水位之正確性。

圖10及11所示為示性波高分別為1.47 m及2.81 m時，GPS接收器與AHRS加速度計所得到的水位原始數據與時序列資料的比較圖，圖11中亦繪出GPS接收器每秒鐘之解算品質指標，以供探討雜訊原因。AHRS加速度計之水位時序列資料、GPS接收器之水位原始數據與解算品質指標，分別以黑色圓形、紅色方形與綠色菱形點線繪於圖上。由圖10及11的結果可知，從AHRS加速度計所獲得之水位時序列資料與GPS接收器直接觀測之水位原始數據一致。此結果也間接驗證了圖1所示分析流程之正確性。

為驗證加速度計所得水位頻譜之正確性，將GPS接收器、AHRS與Watson加速度等三種儀器所得一維波譜繪圖比較，如圖12及13所示。圖中縱軸為水位之能量密度譜(Power Spectral Density, PSD)，圖12及13中的時間分別與圖10及11的時間相同。兩圖中三種感應器之波譜形狀曲線均一致。圖12中三種感應器之尖峰週期均完全相同，而圖13中三種感應器之尖峰週期亦非常接近。上述結果可證實加速度計算一維波譜之正確性。

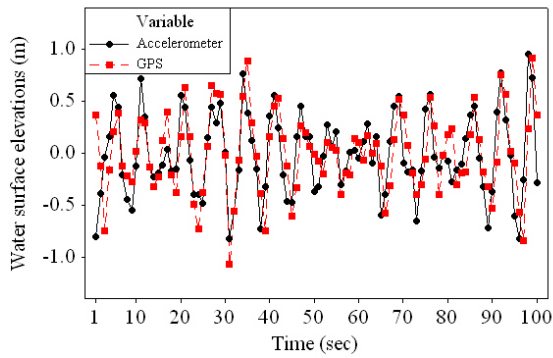


圖10 水位原始數據與時序列資料比較圖 (示性波高為1.47 m, 8月20日17時)

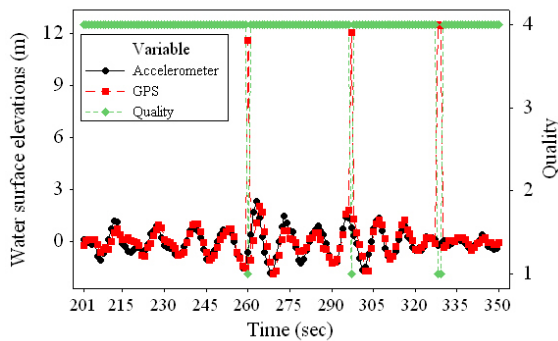


圖11 水位原始數據與時序列資料比較圖 (示性波高為2.81 m, 8月21日15時)

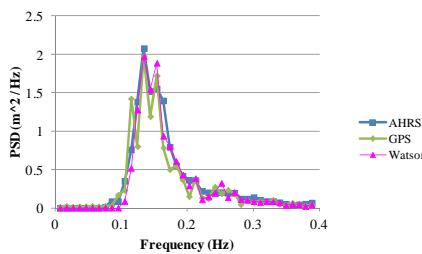


圖12 波浪頻譜比較圖 (示性波高為1.47 m, 8月20日17時)

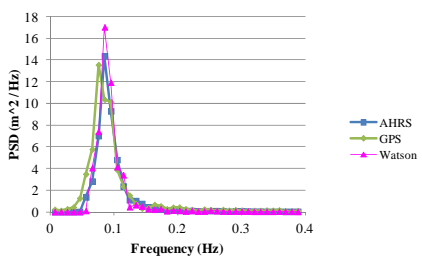


圖13 波浪頻譜比較圖 (示性波高為2.81 m, 8月21日15時)

五、結論

從以上之實驗與分析、討論，可證實本研究之目的皆已達成。首先，在從VBS-RTK控制及運算中心獲得修正訊號之條件下，GPS浮標能即時地觀測潮位，準確度小於10 cm。其次，GPS浮標亦能即時地直接觀測水位原始數據。另外，本研究亦驗證從加速度所產出的水位時序列資料與一維波譜之正確性，這也間接驗證了本文從加速度分析波浪流程之正確性。

謝誌

感謝經濟部水利署委託成功大學近海水文中心操作近海水文觀測網，使本研究利用其中之蘇澳浮標作為平台，架設GPS浮標系統。

參考文獻

1. Harigae, M., Yamaguchi, I., Kasai, T., Igawa, H., Nakanishi, H., Murayama, T., Iwanaka, Y., Suko, H., Abreast of the waves: Open-sea sensor to measure height and direction. *GPS World* **2005**, 16(5), 16-26.
2. Doong, D. J., Lee, B. C., Kao, C. C., Wave measurements using GPS velocity signals. *Sensors* **2011**, 11(1), 1043-1058.
3. Herbers, T., Jessen, P., Janssen, T., Colbert, D., MacMahan, J., Observing ocean surface waves with GPS-tracked buoys. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology* **2012**, 29(7), DOI: 10.1175/JTECH-D-11-00128.1.
4. Kuo, C. Y., Chiu, K. W., Chiang, K. W., Cheng, K. C., Lin, L. C., Tseng, H. Z., Chu, F. Y., Lan, W. H., Lin, H. T., High-frequency sea level variations observed by GPS buoys using precise point positioning technique. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences* **2012**, 23(2), 209-218.
5. Joodaki, G., Nahavandchi, H., Cheng, K., Ocean wave measurement using GPS buoys. *Journal of Geodetic Science* **2013**, 3(3), 163-172.
6. Waseda, T., Shinchi, M., Nishida, T., Tamura, H., Miyazawa, Y., Kawai, Y., Ichikawa, H., Tomita, H., Nagano, A., Taniguchi, K., In *GPS-based wave observation using a moored oceanographic buoy in the deep ocean*, The 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., 2011; International Society of Offshore and Polar Engineers: 2011.
7. Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T., Koshimura, S. I., Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan. *Earth Planets Space* **2011**, 63 (6), E5-E8.
8. Falck, C., Ramatschi, M., Subarya, C., Bartsch, M., Merx, A., Hoeberechts, J., Schmidt, G., Near real-time GPS applications for tsunami early warning systems. *Natural Hazards and Earth System Science* **2010**, 10(2), 181-189.
9. Nagai, T., Kato, T., Moritani, N., Izumi, H., Terada, Y., Mitsui, M., Proposal of hybrid tsunami monitoring network system consisted of offshore, coastal and on-site wave sensors. *Coastal Engineering Journal*

