

# GPS/IMU水位及波浪觀測系統

郭重言<sup>1</sup> 施巧慧<sup>2</sup> 鄭又嘉<sup>3</sup>  
測量及空間資訊學系  
成功大學

林立青<sup>4</sup>  
國際波動力學研究中心  
成功大學

林慶仁<sup>5</sup> 解立德<sup>6</sup>  
地球科學研究所  
中央研究院

## 摘要

近年來全球或區域的海嘯預警可由即時之觀測資料與預警模式來估算海嘯波到達的時間，雖然目前有為數眾多的壓力式海嘯觀測儀遍佈於環太平洋區域，但大部分的觀測站設置於深海區域，因此淺海區的海嘯觀測儀仍有增加的必要，可用來進一步了解海嘯波傳播至不同區域及地形特性時之能量通量變化，故海嘯即時預警仍有增加諸多觀測量之需求。為了在觀測遠域外海的波、流及海嘯上能夠增進測量技術的改善，以及創造新的即時監測趨勢，本研究欲自行建置具有全球定位系統(Global Positioning System, GPS)功能之浮標，其可精確量測浮體之水平及垂直位置運動。由於GPS接收資料可藉由精密單點定位及相對差分定位等技術提高定位精度，使GPS浮標測量系統在即時監測方面能夠成為一種有效且經濟的方案，此外GPS定位測量時無需進行任何基準校正之優點，可用來率定測高衛星，進而增進海水面資料之精度。GPS量測系統具有高頻取樣(1Hz~20Hz)和高精度之能力，使其能夠量測具有寬頻特性之海面波動頻率，並藉由該測量高頻取樣訊號以探求非線性波的形成機制、波浪引致之紊流與能量消散間的關係、海嘯波源之逆推及氣象海嘯溯源與產生的機制等。

關鍵字：GPS/IMU、海水位、波浪

## 一、前言

目前海嘯預警系統中水位變動之連續觀測有美國大氣海洋總署(NOAA)的壓力式DART (Deep Ocean Assessment and Reporting for Tsunami) 深海浮標，分佈於環太平洋及美國海岸。日本NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbors) 則有13座GPS浮標分佈於日本之東太平洋海域。GPS浮標觀測系統已多次成功觀測到海嘯波及其振幅大小與周期(Hayashi et al., 2011)。台灣於2011年由中央氣象局建置「臺灣東部海域海纜觀測系統」進行地震監測及其它海洋環境科學觀測之任務，其中該計畫亦配置海嘯壓力計來進行即時海嘯觀測，此為台灣東部海域首次以壓力計作為海嘯之即時觀測。然而壓力式海嘯觀測系統之運作及維持的經費為GPS浮標的數倍之多(Kato et al., 2000)，考量建造與維持之經費以及海洋觀測之覆蓋率，GPS水位觀測系統可提供精確海嘯事件之記錄與預警，其系統觀測資料亦具有即時性與連續性。

由於GPS定位精度高(公分等級)，且可提供高頻取樣(up to 100 Hz)之水位觀測，故可觀測水位變動之頻譜範圍從短週期之風浪至海嘯、風暴潮及天文潮等長周期變動，因此除了海嘯訊號之即時觀測外，本研究之次要目標則著重於風浪、流速及長周期海水面訊號之觀測，以提供更多深海區域之狀態資訊作為大氣-海洋交互作用之研究及近岸防災之應用。另外，GPS浮標亦可作為測高衛星之率定，包含相對偏差和漂移量之校正(Cheng et al., 2010)，測高衛星主要設計來監測全球海水面變動，所觀測之海水面高度為相對於參

考橢球之絕對量，不受到地面變動之影響，然而不同衛星測高任務間，觀測之海水面高度受到偏差、漂移、距離改正等影響而無法結合使用，因此對衛星測高資料進行率定有其必要性。

關於利用GPS水位觀測資料來計算風浪上，近年已有些許成功的成果(Hauser et al. 2005)。Herbers et al. (2012) 建置經濟型之GPS觀測系統，進而利用所觀測資料推算波高及方向波譜(Directional wave spectra)特性。此外GPS水位資料亦可提供波浪傳遞過之水粒子橢圓運動及速度特性(Krogstad et al., 1999)。Thomson (2012)應用GPS資料計算浮標漂流速度，之後藉由時間平均之GPS浮標水平位置變動，並聯合超音波都卜勒流速儀(ADCP)資料來瞭解大氣-海洋交互作用之波浪碎波能量消散及紊流特性。另外，大氣壓力微量之波動可導致具有海嘯週期之長波，其振幅大小亦可達到海嘯波之等級，因此該長週期之訊號已被分類為氣象海嘯(Meteo-tsunamis)(Montserrat et al., 2006)。往昔長週期之氣象海嘯皆由驗潮站觀測得到，台灣之氣象海嘯事件大多分佈於台灣北部海域，例如竹圍漁港之氣象海嘯振幅大小可達1.5公尺，約為該地潮差之60% (Lin and Liang, 2013)。未來配合遠域之GPS浮標與大氣壓力之觀測數據，將有助於了解氣象海嘯形成之來源區域及該長波之演變過程。

傳統之波浪浮標系統由慣性測量元件 (Inertial Measurement Unit, IMU)之加速度計、傾斜儀及羅盤(accelerometers - tilt - compass)等建構，因各構造原件觀測具漂移性，因此觀測前需進行校正。相較傳統之IMU浮標，GPS/IMU系統之優勢為較具有經濟性

(建造成本較低)及可藉由差分(Differential Global Positioning System, DGPS)定位或精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)進行直接量測相對於一參考橢球之高度觀測量。若整合GPS/IMU系統可彌補GPS衛星顆數不足或受到訊號遮蔽時無法提供精確定位解和IMU誤差會隨著時間而大幅累積的缺點,故可提供更可靠、更精確的定位定向成果。但GPS浮標系統可能之缺點為衛星接收中斷(例如因波浪過大導致浮標翻覆,使得觀測之天頂指向與通訊方向相反),而無法取得任何觀測資料。

由於目前GPS套件已模組化,資料儲存、傳輸以及電池之供應等零組件都可輕易套用商用模組於GPS觀測系統中,因此本研究將自行組置GPS/IMU模組,並整合相關電子系統以完成GPS浮標觀測系統之核心,並應用其高頻取樣之功能獲得空間三維精確位置變動之優點,以量測風浪、流速、海嘯及其他長週期海面變動訊號,進而藉由該資料進一步分析大氣-海洋間之交互作用,以了解非線性波浪動力、群波之演變及極值波高之統計特性等。此外衛星測高任務間,其觀測之海面高度受到偏差、漂移等影響,多功能GPS浮標可對衛星測高提供更精確的率定與改正。

## 二、全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)

GPS為美國國防部自1973年5月開始發展的定位系統,初期是為了提供美軍高精度和全天候且不受天候影響的導航定位訊息。自從西元2000年開放Selective Availability(SA)效應後,定位精度明顯提升,不論軍方或民用應用都非常廣泛。近年來許多國家致力於發展衛星定位技術,例如歐盟的Galileo、俄羅斯的Global Navigation Satellite System(GLONASS)與中國大陸的北斗衛星(Beidou/Compass)系統,一般將上述不同系統合稱為全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)。

DGPS定位為利用雙台或多台接收儀同時接收GPS衛星所發送之訊號,其中一台放置在已知坐標值之參考主站,其它接收儀皆視為相對於參考主站,若接收儀彼此距離不遠,衛星訊號傳播路徑上之物理條件相似,則會有相同之系統誤差,例如衛星時錶差、衛星軌道誤差、對流層延遲誤差及電離層延遲誤差等,藉由觀測量之相對差分,可以大幅降低系統誤差之影響,計算出相對於參考主站之點位向量,也就是基線。由於DGPS已將誤差影響降至最低,故在高精度與準確度之測量上,DGPS定位是目前最廣泛使用的方法。DGPS定位精度與參考主站之坐標精度以及

基線長度有關,此種定位方式可應用於靜態定位與動態定位。DGPS方法可分為一次差、二次差以及三次差,分別用來消除不同誤差。本研究將使用其中的二次差分定位。

DGPS是同時利用多台接收儀觀測,藉由差分大幅降低大氣層(對流層和電離層)延遲誤差之影響,但當GPS浮標距離參考主站太遠時,大氣層影響量不能視為相同,無法利用差分消除,故定位精度會隨著基線距離增長而下降,因此GPS浮標定位精度將受限於與參考主站的基線長度。Kuo等人(2012)提出利用PPP進行GPS浮標近即時精密定位,分析International GNSS Service(IGS)不同星曆產品之解算成果,解決了基線距離限制之問題。傳統單點定位(Single Point Positioning, SPP)受到未經模式化的系統誤差而產生定位誤差,例如衛星軌道誤差、衛星時錶誤差、對流層及電離層延遲誤差與多路徑效應等(El-Rabbany, 2002),定位精度為公尺等級,對於高精度的定位需求而言,傳統SPP還無法滿足此需求。因此Zumberge等人(1997)提出一個新的定位方法,利用SPP為基礎,加入精密星曆產品和衛星時錶改正,並組成無電離層觀測方程進行解算,此即為PPP。PPP是利用單台接收儀的雙頻載波相位觀測量來進行定位,並加入IGS所提供的精密星曆產品,靜態定位精度與動態定位精度分別可達到公分等級。

一般而言,IGS所提供精密星曆資料根據發佈時間不同可分為五種,分別為廣播星曆(Broadcast)、超快速星曆預測部分(Ultra-Rapid (predicted half))、超快速星曆觀測部分(Ultra-Rapid (observed half))、快速星曆(Rapid)以及最終星曆(Final)。目前不只有IGS提供精密星曆及衛星時錶改正資料,也有其他組織提供資料給使用者免費使用,如歐洲的Center for Orbit Determination in Europe(CODE)、美國的Jet Propulsion Laboratory(JPL)、加拿大的Natural Resources Canada(NRCan)。

PPP為利用無差分觀測量來組成觀測方程式,因此無法使用差分方法來消去系統誤差,所以同時使用載波相位觀測量及電碼虛擬距離觀測量來提高PPP的精度。除了衛星軌道誤差改正之外,還有其他未模式化的誤差也要改正,如對流層與電離層的延遲誤差、接收儀天線相位中心偏移以及固體潮改正等(Héroux and Kouba, 2001)。對雙頻觀測量而言,電碼虛擬距離觀測量與載波相位觀測量可組成無電離層線性組合,即是傳統精密單點定位數學模型(Zumberge et al., 1997; Héroux et al., 2001)

使用上述觀測模型,即可利用最小二乘法來進行非差分PPP解算。在靜態解算時,位置參數可當成未知數處理,在沒有週波脫落的情形下,週波未定值可

當成常數處理，而有週波脫落的情形時，週波未定值當成一個參數處理。對流層影響可先使用氣象模式改正，再利用隨機遊走(Random Walk)模型估計殘餘影響。PPP處理流程如圖1所示，其中衛星觀測資料包含電碼虛擬距離觀測量及載波相位觀測量，精密星曆產品包含精密衛星軌道資料及精密衛星時錶資料，精密單點定位計算包含各項誤差改正、對流層延遲估算、無電離層線性組合，參數估計包含接收儀三維坐標、接收儀時錶差、濕對流層延遲量等。

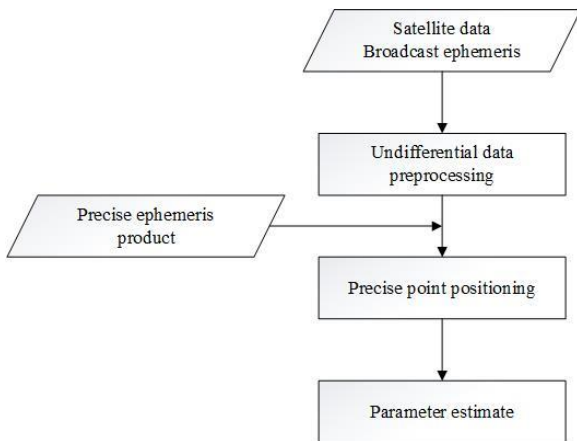


圖 1 精密單點定位處理流程

### 三、慣性導航系統 (Inertial Navigation System, INS)

慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)包含IMU和計算系統。INS遵守牛頓第一與第二定律的自主性(Self-contained)相對定位技術，基本原理為透過IMU(包含加速度計與陀螺儀)量測在感測器坐標框架(Sensor frame)三軸上之加速度及角速度資料，將此兩種觀測量(加速度與角速度)經一次積分與二次積分後，可獲得感測器之速度、位置及姿態角，以提供後續導航應用，故INS不需要接收或發射訊號，可以依照自身的感測器提供的觀測量，經積分等相關運算後，即可獲得導航資訊，表示INS可在任何環境下進行連續三維定位與定向。除了上述特性外，INS還具有高取樣頻率(50Hz-200Hz)與短時間內高精度之特性。但隨著時間增加，定位誤差將快速累積，誤差的累積約與時間平方成正比(Chiang, 2004)。

一般而言，民用INS可分為導航系統、戰術系統與微機電系統(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)等三種類型，其中以導航型的INS精度最佳，MEMS的精度最差。由於高精度的INS受限於高成本、體積大與政府法令等限制，而戰術系統與MEMS

有低成本、低耗能與體積小等優點，因此戰術系統與MEMS為目前較廣泛應用的INS系統，可搭載於浮標、無人飛行載具(Unmanned aerial vehicle)與移動式測繪系統(Mobile mapping system)上。然而戰術與MEMS等級之觀測量的雜訊與低穩定性導致定位誤差較大，若使用單獨的戰術系統或MEMS，將無法達到長時間導航的精度需求。因此必須整合其他系統，如GPS，以達到導航精度需求。

GPS觀測時，當衛星顆數低於4顆，將造成無法定位。由此可知，當GPS接收儀於訊號易遮蔽區域(如都市地區)時，常會因為訊號遮蔽導致GPS導航解不連續。由上述可知，INS具有高取樣率與短時間內高精度之特性，因此可彌補當GPS訊號受到遮蔽無法定位與低取樣頻率等限制。而GPS具有長期觀測穩定性與高精度之特性，亦可以解決INS隨時間快速累積的定位誤差問題，因此整合INS與GPS兩系統，藉由擷取彼此的優點可彌補各自系統的不足，避免使用單一系統之缺點(Chiang et al., 2012)。整合系統可以提供高頻率且穩定的導航資訊，尤其當GPS訊號不足時，整合系統可以持續使用GPS的原始觀測量進行整合運算，將可大幅降低INS隨時間累積的誤差。

一般而言，系統誤差與雜訊(noise)影響整合系統(INS/GPS)成果。INS主要的系統性誤差包含偏心量(Bias)與尺度因子(Scale factor)。儀器率定為改善系統誤差的方法之一，但是密集的率定將增加成本，因此結合GPS或其他感測系統可以協助估計與移除INS感測器的系統性誤差。GPS誤差包含電離層延遲誤差、對流層延遲誤差、衛星時錶差、接收儀錶差、多路徑效應(Seeber, 2003)。GPS與INS中的非系統性誤差則直接歸類於感測器雜訊，有關雜訊的部分，一般常以統計方式模式化。

### 四、GPS之觀測結果分析

本研究之GPS/IMU整合系統(如圖2所示)分別在成功大學水工試驗所斷面造波水槽及安平港內進行初步觀測與驗證。施測時GPS和IMU取樣頻率皆設定為1 Hz，而造波水槽之波高計取樣頻率則為25 Hz。造波試驗之波高分別為20、30、40及50公分，周期為3秒。造波機依不同波高每次運作5分鐘，GPS/IMU浮標與波高計則為連續紀錄。4種波高測試結果都顯示GPS所量測之水位變化與波高計觀測一致。於本文中僅顯示波高50公分之結果(圖3)，結果顯示，GPS之觀測精度與波高計之差異甚小，且兩者之能量譜在主頻(1/3 Hz)約略一致，次要之其他高頻能量則為該水槽之共振項，由於GPS之取樣頻率為1 Hz，因此可解析之奈奎斯特頻率(Nyquist frequency)為0.5 Hz。由

上述之造波定量試驗中，顯示GPS之觀測精度是可以達到觀測波浪等級(公分等級)。

除此之外，本研究於安平港內之現地試驗，將測試長周期波、氣象海嘯與潮位等觀測項目。本研究於2014年5月9日和7月17日在安平港內進行GPS浮標觀測試驗。圖4顯示GPS/IMU系統於5月9日觀測到氣象海嘯紀錄(Meteo-tsunamis)，觀測期間之最大水位變化約為0.14公尺，其結果與安平港潮位觀測一致。因此，GPS浮標對於長周期波(如氣象海嘯或海嘯波等)之觀測亦是相當精確。

除此之外，本研究亦針對氣象海嘯進行分析，另外蒐集安平港附近海域之潮位資料，包含澎湖與箔子寮漁港，以佐證當時於該海域確有氣象海嘯之發生。結果示如圖5，其中顯示氣象海嘯可能由澎湖與箔子寮漁港附近產生，最大之水位變化約為0.2公尺。該氣象海嘯之發生通常可以觀測到微小且具長周期連續振盪的大氣壓力變化，但是目前還未搜集氣壓資料以分析兩者間之關係(Monserrat et al., 2006)。因此後續將持續分析大氣與海洋間的交互作用。

另外，於7月17日之觀測則因當時雷瑪遜(RAMMASUN)颱風經過菲律賓並行經南海，GPS浮標之水位觀測記錄到颱風湧浪傳遞至安平港內之結果，示如圖6。其中當日下午至傍晚時段之主要水位震盪來源可能為雷瑪遜颱風所產生之湧浪，其主要頻率約為0.05-0.07 Hz，而該湧浪能量隨著時間增加而變強，安平港外之壓力式波浪觀測儀觀測之波浪於14:00時波高0.77公尺增加至20:00時1.31公尺，相同時間之波浪周期則由7.8秒增加至12.1秒，顯示該時段確有颱風湧浪傳遞至安平港海域。因此GPS浮標於造波試驗及安平港區之颱風湧浪與氣象海嘯等長週期波之觀測結果說明自主研发之GPS/IMU系統可以觀測寬頻之水位震盪，且其精度可達公分等級。

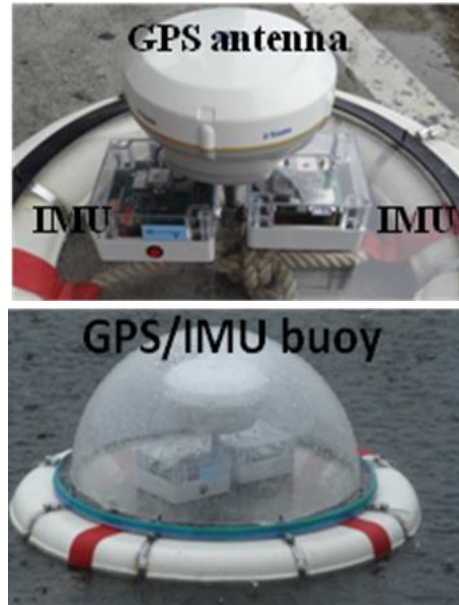


圖 2 自行建置與組裝之GPS/IMU套件、聯合資料之儲存與傳輸等模組

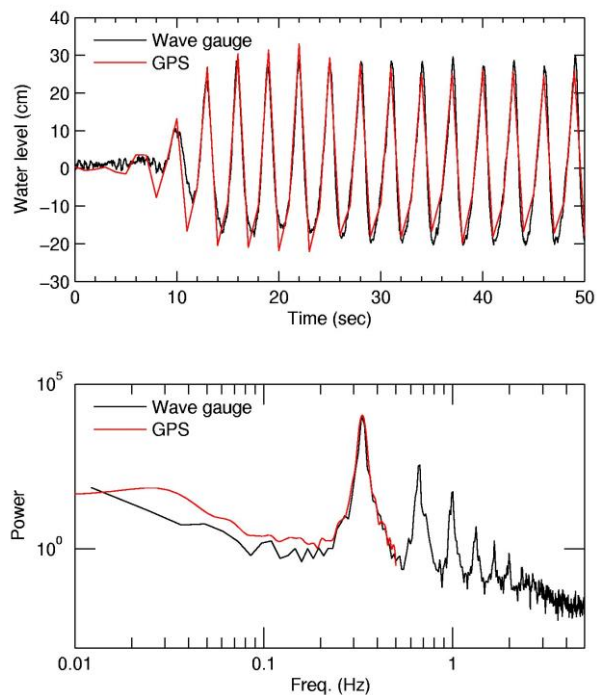


圖 3 造波試驗中GPS浮標及波高計之觀測水位比較，上圖為時序圖；下圖為能量譜

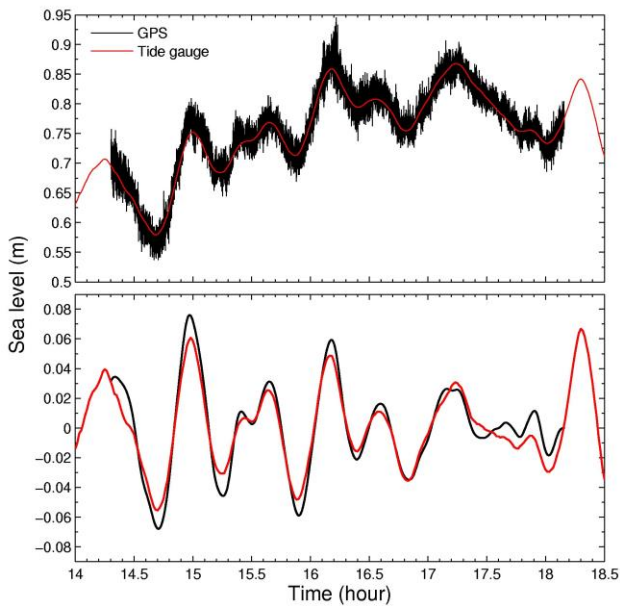


圖 4 5月9日GPS浮標所觀測到之氣象海嘯。上圖為GPS浮標與安平港潮位數據之比較；下圖為兩種數據之帶通濾波(bandpass filter)，濾波頻率為0.01-0.1 (1/min)。

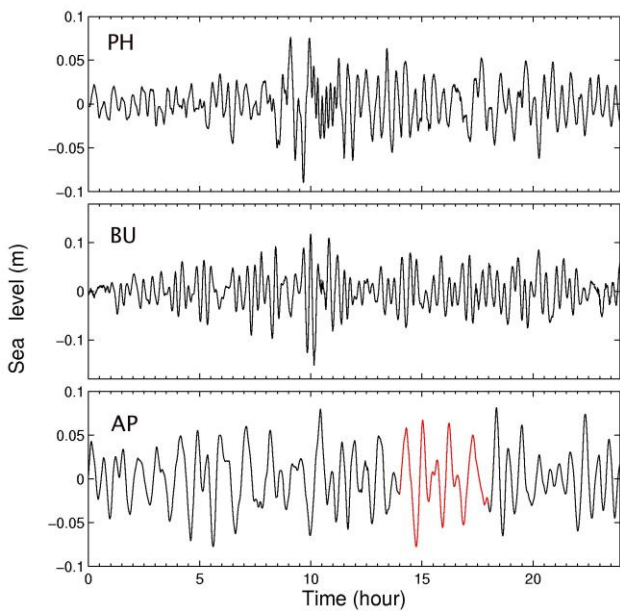


圖 5 澎湖馬公港(PH)、箔子寮漁港(BU)及安平港(AP)之帶通濾波(bandpass filter)，濾波頻率為0.01-0.1 (1/min)。其中安平港紅色線段為GPS浮標觀測結果。

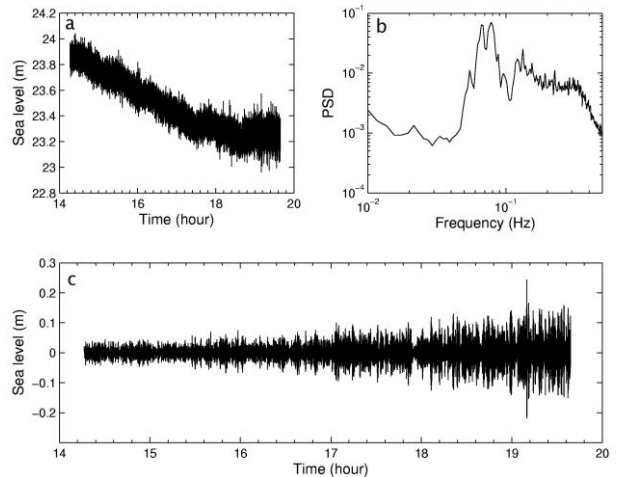


圖 6 a為GPS浮標觀測之水位訊號；b為GPS浮標水位訊號之能量譜；c為水位訊號之帶通濾波(bandpass filter)，濾波頻率為0.03-0.1 (Hz)。

## 五、結論

本研究所自主研發並設計組裝之GPS/IMU系統，經由定量之測試試驗顯示為一種有效且經濟的方案。對定量波浪的測試上，GPS垂直運動之水位訊號與波高計的觀測一致；在水位振盪變化之量測精度可達公分等級，並且已成功觀測到颱風湧浪及氣象海嘯等長週期波，因此以GPS浮標取得高頻取樣空間(三軸)位置精確變動之優點，以量測風浪、流速、海嘯及其他長週期海水面變動訊號。藉由該資料可進一步分析大氣-海洋間之交互作用，以了解非線性波浪動力、群波之演變及極值波高之統計特性等。另外衛星測高任務間，其觀測之海水面高度受到偏差、漂移、距離改正等影響而無法結合使用，GPS浮標可提供衛星測高更精確的率定與改正。綜合以上論述，由於GPS浮標之精確定位測量將可改善目前海洋狀態(sea state)之觀測，使得觀測波動之頻率具有寬頻的特性，其頻率之分佈由短週期之風浪、海嘯長週期波至天文潮汐等海水面變動，其連續性和即時之觀測可進一步提供觀測波動之時變特性與達到防災預警之目的。

## 謝誌

本研究相關數據由港灣技術研究中心及成功大學水工試驗所提供，使本研究得以順利完成，謹誌謝忱。經費由國立成功大學頂尖計畫、科技部計畫與國際波動力學研究中心支持。

## 參考文獻

1. Cheng, K., C. Y. Kuo, H. Z. Tseng, Y. Yi, and C. K. Shum (2010), Lake surface height calibration of Jason-1 and Jason-2 over the Great Lakes, *Marine Geodesy*, 33(S1):186-203, DOI: 10.1080/01490419.2010.487802.
2. Chiang, K.W. (2004), INS/GPS Integration Using Neural Networks for Land Vehicular Navigation Applications, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Calgary, Canada.
3. Chiang, K.W., T.T. Duong, J.K. Liao, Y.C. Lai, C.C. Chang, J.M. Cai, and S.C. Huang (2012), On-Line Smoothing for an Integrated Navigation System with Low-Cost MEMS Inertial Sensors, *Sensors*, 12(12), 17372-17389.
4. El-Sheimy, N., W. Abdel-Hamid, and G. Lachapelle (2004), An Adaptive Neuro-Fuzzy Model for Bridging GPS Outages in MEMS-IMU/GPS Land Vehicle Navigation, Proceedings of ION GNSS 2004, Long Beach, California, September 21-24.
5. Hauser, D., K. Kahma, H. E. Krogstad, S. Lehner, J.A. J. Monbaliu, and L. R. Wyatt, Eds., 2005: Measuring and analyzing the directional spectra of ocean waves. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 21367 COST Action 714, Luxembourg, 465 pp
6. Hayashi, Y., H. Tsushima, K. Hirata, K. Kimura, and K. Maeda (2011), Tsunami source area of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake determined from tsunami arrival times at offshore observation stations, *Earth Planets Space*, 63 (7), 809-813.
7. Herbers, T. H. C., P. F. Jessen, T. T. Janssen, D. B. Colbert, and J. H. MacMahan (2012), Observing ocean surface waves with GPS-tracked buoys, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 944-959.
8. Héroux, P. and J. Kouba (2001), GPS precise point positioning using IGS orbit products. *Phys. Chem. Earth A*, 26, 573-578, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00103-X.
9. Kato, T., T. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno (2000), Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, 52, 841-845.
10. Krogstad, H. E., S. F. Barstow, S. E. Aasen, and I. Rodriguez (1999), Some recent developments in wave buoy measurement technology, *Coastal Eng.*, 37 (3-4), 309-329.
11. Kuo, C. Y., K. W. Chiu, K. W. Chiang, K. Cheng, L. Lin, H. Z. Tseng, F. Y. Chu, W. H. Lan, and H. T. Lin, High-Frequency Sea Level Variations Observed by GPS Buoys Using Precise Point Positioning Technique (2012), *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 2 209-218.
12. Lin, L. C., and M. Liang (2013), Periods of 10-30 minutes of sea level variation observed in the coastal regions of Taiwan. (submitted to JGR).
13. Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
14. Thomson, J. (2012), Wave Breaking Dissipation Observed with "SWIFT" Drifters. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 29, 1866-1882
15. Monserrat, S., I. Vilibic', and A. B. Rabinovich (2006), Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1035-1051.
16. Zumberge, J. F., M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, 102, 5005-5017, doi: 10.1029/96JB03860.