

河口 GPS 浮標觀測潮位波浪之探討

林演斌¹ 黃清哲² 陳聖學³

¹ 國立成功大學近海水文中心計畫經理

² 國立成功大學水利及海洋工程學系教授/國立成功大學近海水文中心主任

³ 國立成功大學近海水文中心品保工程師

摘要

河口地區之實測潮位資料可作為河川洪水演算之臨海邊界條件，然而部分河口地區因為缺乏構造物，難以架設作業化潮位計，在這些河口需要不受構造物條件限制之潮位觀測系統，此為本研究主要目的。以往學者研究動態(kinematic)GPS 在浮標上可達 cm 級定位，並能量測長週期、小加速度之水位波動，本文結合動態 GPS 與資料浮標技術成為河口 GPS 浮標，以觀測潮位，同時由直接量測的水位原始數據亦能分析波浪，並進一步驗證作業化波浪儀(稱之為 SHR(Strap-down attitude and Heading Reference system))觀測結果。經在蘇澳外海測試驗證，證實 GPS 浮標已具備即時觀測潮位與波浪能力，潮位與蘇澳潮位站之均方根誤差小於 5.2cm。作業化波浪儀所觀測波浪資料經過動態 GPS 分析比較，證實一維波譜、方向波譜、示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向皆極為一致。

關鍵詞：VBS-RTK、GPS 浮標、即時、潮位、波譜

Development of the GPS Buoy for Monitoring Tides and Waves at Estuaries

Yen-Pin Lin* Ching-Jer Huang Sheng-Hsueh Chen

* Project Manager, COMC(Coastal Ocean Monitoring Center), National Cheng Kung University

ABSTRACT

This research aims to develop a GPS buoy for monitoring tides and waves at the estuary and coastal areas. Because wave data can be derived from the raw data of GPS receiver and the operational wave sensor called SHR(Strap-down attitude and Heading Reference system), this research also intends to compare the wave data from both sensors. We demonstrate that the developed GPS buoy is able to measure both real-time tides and waves in the coastal area. The tide data obtained from the GPS buoy agree well with those recorded by the Suao tide station. The RMSE is 5.2cm. One-dimensional wave spectra, directional wave spectra, significant wave heights, zero-crossing periods, peak periods, and peak wave directions obtained from GPS agree very well with those obtained from SHR.

Keywords: VBS-RTK; GPS buoy; Real-time; Tide; Wave spectrum

一、前言

河口附近之潮位，為河川洪水演算之重要參考依據，為防災決策不可或缺資料。另外，海岸的波浪、潮位、海流為研究漂沙所需的基本資料。部分

河口及海岸缺乏既有構造物作為架設儀器之基礎，不易進行觀測，於河口及海岸同時觀測潮位與波浪的觀測技術有待突破。Harigae et al.(2005)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 5degrees。其研究將低頻訊號濾除，因此無法觀測潮位。Doong et al.(2011)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。Joodaki et al.(2013)使用單一 GPS 接收器於浮標上量測波浪，該研究亦尚未量測潮位。Kato et al.(2010)使用 RTK (Real Time Kinematic)GPS 接收器觀測海嘯，為獲得海嘯資料，其 GPS 浮標將原始數據進行低通濾波並扣除天文潮。隨後繼續發展 GPS 浮標觀測波浪，但未同時觀測潮位，其 GPS 浮標布設範圍為水深 100~300m，離岸 10~20km。綜合以上文獻之研究成果可知既有研究尚未發展能同時觀測潮位與波浪之 GPS 浮標。有鑑於此，本研究目的為結合 RTK GPS 接收器、資料浮標技術及虛擬基準站即時動態定位技術等，研發 GPS 潮位波浪浮標。

二、研究方法

2.1 即時動態定位技術與精度

隨著資訊技術進步，GPS 之應用領域已由靜態演變為即時動態定位。即時動態定位是目前最為廣泛使用的高精度定位技術，該技術使用載波相位觀測量等求解，並透過差分方式消除移動站觀測量大部分的誤差，以實現公分級定位。

服務端利用多個 GPS 基準站連續接收衛星資料，使用端僅須透過網際網路進行 RTCM 網路傳輸協議 - NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)將移動站 GPS 定位成果傳達控制及運算中心，經服務端軟體同步解算移動站所在位置的虛擬基準站觀測量後，回傳至移動站 GPS 接收器進行「超短距離基線解算」，即時獲得 VBS-RTK 定位座標成果，此技術稱為虛擬基準站即時動態定位技術，簡稱為 VBS-RTK 定位。

依據內政部國土測繪中心於 1994 年 4 月至 1995 年 12 月進行靜態 VBS-RTK 定位內插測試結果，平均定位精度(以 RMS 表示)分別為南北向：1.44 cm、東西向：1.48 cm、橢球高：3.87 cm。

2.2 潮位分析方法

取得每小時 600 個、取樣頻率為 1Hz 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。

2.3 一維波譜分析

SHR 一維波譜係來自於作業化資料浮標的產出結果，本研究不再敘述其分析過程。GPS 浮標一維波譜分析過程可參見 Lin et al.(2014)。

2.4 方向波譜分析流程

SHR 方向波譜係來自於作業化資料浮標的產出結果，本研究亦不再說明其分析過程。GPS 浮標從動態 GPS 接收器擷取高度與東西、南北方向的運動速度，因此採用 ηuv 方法分析方向波譜。由於動態 GPS 接收器觀測單一質點的運動量，依據方向波譜定義簡化方向波譜如式(1)~(2)，

$$\Phi_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} I_m(f, \theta) I_n^*(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \quad (1)$$

$$I_m(f, \theta) = h_m(f) \cos^{\alpha} \theta \sin^{\beta} \theta \quad (2)$$

其中 α, β 隨觀測量而變， k 為波數(wave number)。

ηuv 分別代表垂直方向高度與東西、南北方向的運動速度，利用式(1)~(2)可得式(3)~(7)，

$$\int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) h_u(f) \cos \theta d\theta = C_{\eta u}(f) \quad (3)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) h_v(f) \sin \theta d\theta = C_{\eta v}(f) \quad (4)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) h_u^2(f) \cos^2 \theta d\theta = C_{uu}(f) \quad (5)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) h_u(f) h_v(f) \sin \theta \cos \theta d\theta = C_{uv}(f) \quad (6)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) h_v^2(f) \sin^2 \theta d\theta = C_{vv}(f) \quad (7)$$

其中 $S(f, \theta) = D(f, \theta) C_{\eta \eta}(f)$ ， $D(f, \theta)$ 為方向分布函數， $C_{mn}(f)$ 為第 m 及第 n 個波浪性質之交錯譜。

將方向分布以二階傅立葉級數表示，可得傅立葉係數與方向分布函數關係式，再利用速度與水位交錯譜關係式，可將一、二階傅立葉係數以式(8)~(11)表示，

$$a_1'(f) = \frac{C_{\eta u}(f)}{\sqrt{C_{\eta \eta}(f)[C_{uu}(f) + C_{vv}(f)]}} \quad (8)$$

$$b_1'(f) = \frac{C_{\eta v}(f)}{\sqrt{C_{\eta \eta}(f)[C_{uu}(f) + C_{vv}(f)]}} \quad (9)$$

$$a_2'(f) = \frac{C_{uu}(f) - C_{vv}(f)}{C_{uu}(f) + C_{vv}(f)} \quad (10)$$

$$b_2^i(f) = \frac{2C_{uv}(f)}{C_{uu}(f) + C_{vv}(f)} \quad (11)$$

三、結果與討論

3.1 潮位

GPS 浮標於 2013 年 8 月於蘇澳港北邊外海布放，與港內的蘇澳潮位站直線距離約 4km，位置圖如圖 1。圖 2 為 2013 年 8 月 29 至 31 日之潮位比較圖，於繪圖前調整 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 2 中 GPS 浮標觀測即時潮位之 RMSE 為 5.2cm，其中小部分 GPS 浮標觀測潮位有遺漏之原因為解算不成功。圖 2 中特別的是 8 月 30 日 14~22 時的潮位，兩潮位之差異量約有 10cm，較之橢球高精度所造成誤差更大，顯示尚有其他因素影響，可能的原因除 GPS 浮標為外差解算之外，另一可能原因為潮汐波受到蘇澳港附近地形影響，造成港內外潮位與潮時差異，值得進一步探討。

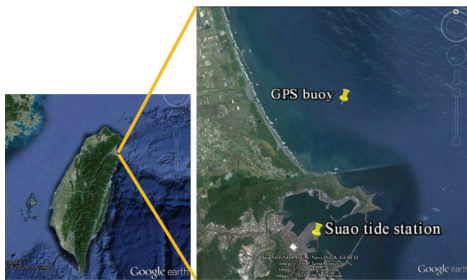


圖 1 GPS 浮標與潮位站位置

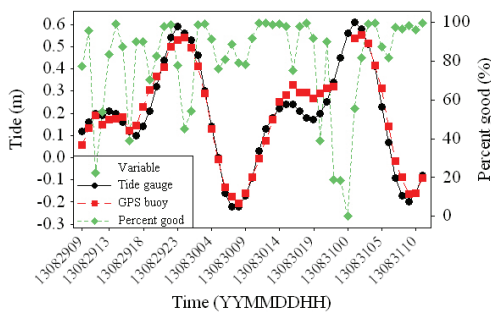


圖 2 2013 年 8 月 29 - 31 日 GPS 浮標與潮位站潮位比較(紅色方點為 GPS，黑色圓點為蘇澳潮位站，綠色菱形點為解算成功率)

3.2 波浪

由於 GPS 浮標直接觀測波浪水位時序列，本節

以 GPS 浮標波浪觀測結果，驗證蘇澳資料浮標在當時作業化產出的波浪觀測結果。驗證的項目有一維波譜、方向波譜、示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向。作業化產出的波浪不含波浪水位時序列，因此本研究未將其納入比較。

圖 3 為 2013 年 8 月 21 日 09 時之一維波譜，波譜形狀與尖峰週期均一致，但作業化波浪儀之尖峰能量密度較 GPS 大，此為波譜平滑作法差異所造成。

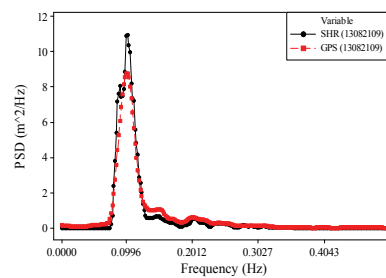


圖 3 2013 年 8 月 21 日 09:00 一維波譜(紅色方點為 GPS，黑色圓點為 SHR)

圖 4,5 分別為 2013 年 8 月 21 日 09 時作業化波浪儀產出的方向波譜與以 GPS 分析之方向波譜，兩圖尖峰能量密度對應之頻率相等，且波向一致，但作業化波浪儀產出方向波譜的能量分布範圍較 GPS 分析方向波譜之能量分布範圍寬，其原因為前者採用加權方向分布函數，使得能量分布範圍較未加權時變寬，且尖峰能量密度亦較未加權時變小。以作業化波浪儀原始數據重新分析方向波譜，並採用未加權之方向分布函數，結果如圖 6，可發現其能量分布範圍與尖峰能量密度均變得與 GPS 之數值一致。

圖 7~9 分別為示性波高、平均週期與主波向之散布圖及迴歸線，圖 10 左上、右上、右下分別為其迴歸分析殘差組體圖，式(12)~(14)分別為其迴歸線公式。依據圖 10，可知示性波高、平均週期與主波向殘差之機率分布與常態分布皆近似，說明式(12)~(14)成立。以 $Hs_{SHR} = 10$ m 代入式(12)，可得作業化波浪儀產出的示性波高與以 GPS 分析之示性波高誤差為 2.8%。依據式(13)可知兩平均週期相等。以 $WVD_{SHR} = 360$ degrees 代入式(14)，可得作業化波浪儀產出的主波向與以 GPS 分析之主波向誤差為 0.7%。

$$Hs_{GPS} = 0.969Hs_{SHR} + 4(cm) \quad (12)$$

$$Tz_{GPS} = Tz_{SHR} \quad (13)$$

$$WVD_{GPS} = 0.993WVD_{SHR} \quad (14)$$

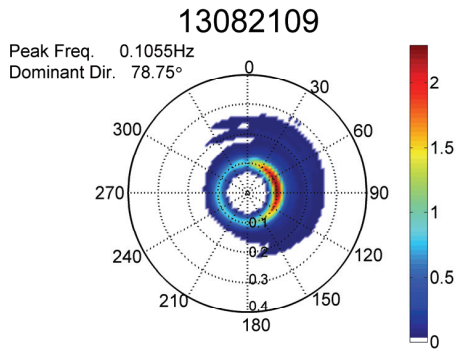


圖 4 2013 年 8 月 21 日 09:00 作業化波浪儀產出的方向波譜

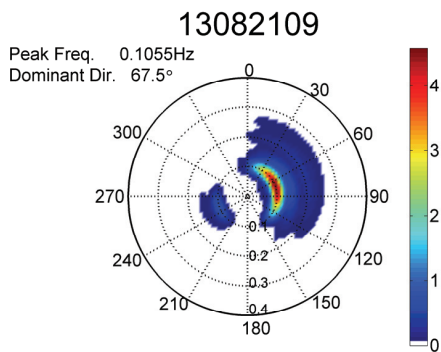


圖 5 2013 年 8 月 21 日 09:00 以 GPS 分析之方向波譜

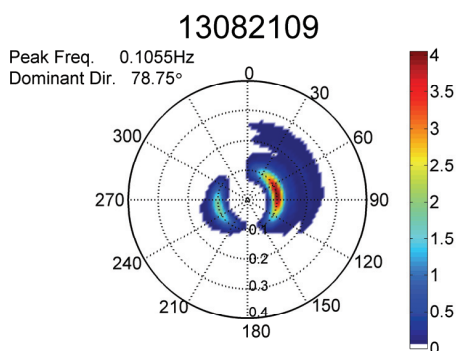


圖 6 2013 年 8 月 21 日 09:00 以作業化波浪儀分析之方向波譜

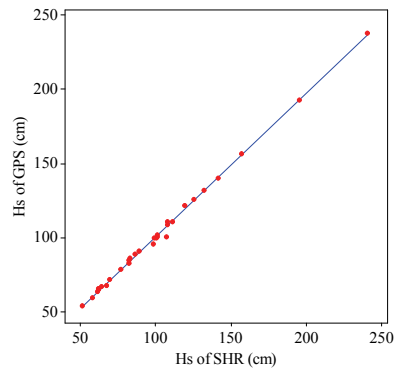


圖 7 示性波高散布圖及迴歸線

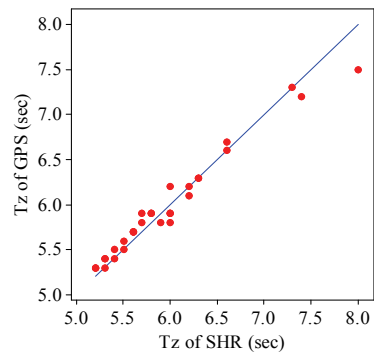


圖 8 平均週期散布圖及迴歸線

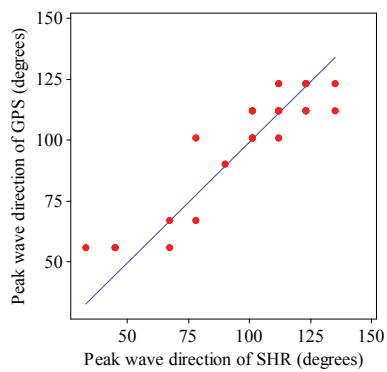


圖 9 主波向散布圖及迴歸線

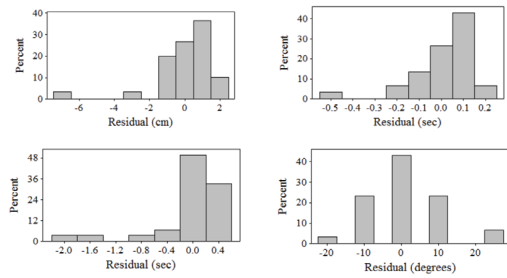


圖 10 示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向之迴歸分析殘差組體圖

圖 11 為尖峰週期散布圖及迴歸線，圖 10 左下為其迴歸分析殘差組體圖。圖 11 中有兩點偏離迴歸線較大，此兩點之一維波譜分別如圖 12 ~ 13。觀察此二圖可發現當一維波譜為雙峰波譜，且兩個尖峰能量密度相當之情形下，以 GPS 分析一維波譜之高頻尖峰能量密度較低頻者稍大，使得以 GPS 分析之尖峰週期較小，反之，作業化波浪儀產出的低頻尖峰能量密度較高頻者稍大，使得作業化波浪儀產出的尖峰週期較大。

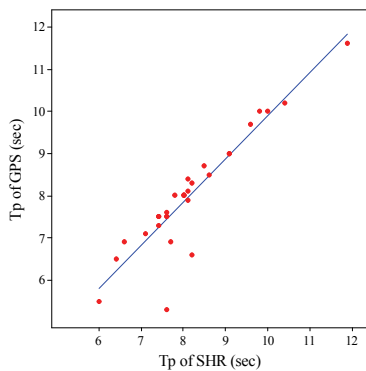


圖 11 尖峰週期散布圖及迴歸線

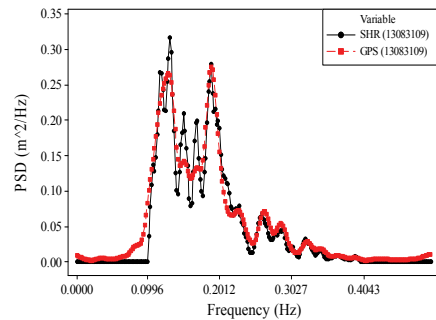


圖 13 2013 年 8 月 31 日 09:00 一維波譜(紅色方點為 GPS，黑色圓點為 SHR)

將圖 11 中偏離迴歸線最大之兩點捨棄後，尖峰週期之散布圖及迴歸線如圖 14 左，圖 14 右為其迴歸分析殘差組體圖，式(15)為其迴歸線公式。圖 14 右較圖 10 左下更接近常態分布，足以支持式(15)能夠成立。以 $Tp_{SHR} = 15 \text{ sec}$ 代入式(15)，可得作業化波浪儀產出的尖峰週期與以 GPS 分析之尖峰週期誤差為 0.3%。

$$Tp_{GPS} = 0.99Tp_{SHR} + 0.1(\text{sec}) \quad (15)$$

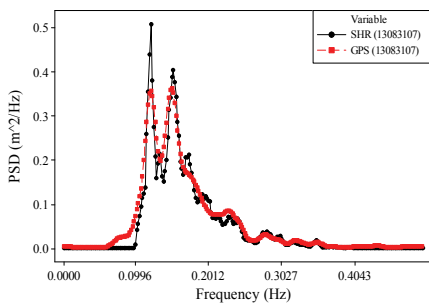
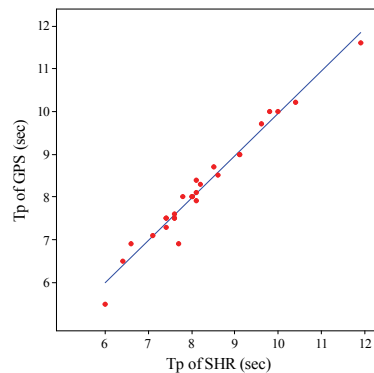


圖 12 2013 年 8 月 31 日 07:00 一維波譜(紅色方點為 GPS，黑色圓點為 SHR)



圖 14 尖峰週期散布圖及迴歸分析殘差組體圖

四、結論

本研究開發之河口 GPS 浮標具備即時潮位與波浪觀測能力，潮位與蘇澳潮位站之均方根誤差小於 5.2cm。以 GPS 直接觀測波浪水位原始數據所獲得的波浪資料驗證作業化波浪儀於觀測當時所產出之波浪資料，證實兩尖峰週期差異較大之原因為一維波譜為雙峰波譜且兩尖峰能量密度相當，捨棄差異最大的兩點數據後，證實一維波譜、方向波譜、示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向皆一致。依迴歸線公式分別估計示性波高為 10m、尖峰週期為 15sec、主波向為 360degrees 情況下作業化波浪儀觀測波浪誤差，可知誤差皆小於 3%。

謝誌

本論文使用的蘇澳資料浮標與蘇澳潮位站資料分屬經濟部水利署與交通部中央氣象局，特此致謝。

參考文獻

1. Doong, D. J., Lee, B. C., Kao, C. C. (2011) Wave measurements using GPS velocity signals, *Sensors*, 11, 1, 1043-1058.
2. Harigae, M., Yamaguchi, I., Kasai, T., Igawa, H., Nakanishi, H., Murayama, T., Iwanaka, Y., Suko, H. (2005) Abreast of the waves: Open-sea sensor to measure height and direction, *GPS World*, 16, 5, 16-26.
3. Joodaki, G., Nahavandchi, H., Cheng, K. (2013) Ocean wave measurement using GPS buoys, *Journal of Geodetic Science*, 3, 3, 163-172.
4. Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T., Koshimura, S. I. (2011) Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, *Earth Planets Space*, 63, 6, E5-E8.
5. Lin, Y. P., Huang, C. J., Chen, S. H. (2014) Development of a GPS-buoy for monitoring water surface elevations at estuaries, *OCEANS 2014-TAIPEI*, IEEE, 1-6.