

## 即時連續水位浮標研發

林演斌<sup>1</sup> 施孟憲<sup>1</sup> 陳聖學<sup>1</sup> 王得根<sup>1</sup> 黃清哲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學近海水文中心  
<sup>2</sup> 國立成功大學水利及海洋工程學系

### 摘要

本研究目的為開發水位浮標，並驗證運用即時精密單點定位(real-time precise point positioning, RT-PPP)量測潮位與波浪之效果，本研究完成開發輕量化的新材質水位浮標，並證實能在外海即時、全時且連續觀測。此外，證實 RT-PPP 能觀測潮位，均方根誤差(root mean square error, RMSE)為 0.09 m，平均絕對誤差(mean absolute error, MAE)為 0.07 m。RT-PPP 所觀測全球衛星導航系統(global navigation satellite system, GNSS)天線高度原始時序資料曲線形狀與 VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics)一致，但需注意有時基準漂移。另外，初步驗證水位浮標 RT-PPP 亦能量測波浪且量測示性波高與尖峰週期均為正確。建議未來在 4G 訊號良好之處，水位浮標可優先選用 VBS-RTK 定位技術觀測水位，反之，可採用 RT-PPP，但需濾除漂移的雜訊。

關鍵詞：即時精密單點定位、全球衛星導航系統、水位

## Development of a water level data buoy for real-time full-time and continuous observation

Yen-Pin Lin\* Mon-Shen Shi Sheng-Hsueh Chen Te Ken Wang Ching-Jer Huang

\* Head, R&D department, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

### ABSTRACT

This research aims to develop a water level data buoy and to validate tide and ocean waves data obtained by using the real-time precise point positioning (RT-PPP) technology. The lightweight water level data buoy had been developed. It was proved to be capable of conducting real-time, full-time, and continuous observation in offshore area. Besides, we found that by using the RT-PPP technology on the water level data buoy, the tide data were obtained. The root mean square error was 0.09 m and the mean absolute error was 0.07 m. We also found that the shape of curve of time-series raw data of the GNSS (global navigation satellite system) antenna heights by using the RT-PPP technology were consistent with that by utilizing the VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics) positioning technology. However, sometimes the time-series raw data of heights from the RT-PPP technology were drifting. Furthermore, the data of significant wave heights and peak wave periods by utilizing the RT-PPP technology on the water level data buoy were validated to be correct. According to our studies, whenever the 4G signal is well enough, we suggest that the VBS-RTK positioning technology is the first priority to be utilized on a water level buoy. On the other hand, the RT-PPP technology is feasible if the drifting of time-series raw data of heights is filtered.

Keywords: Real-time precise point positioning; Global navigation satellite system; Water level

### 一、前言

外海實測潮位與波浪資料是海洋工程設計之重要依據，其中潮位資料也為外海地形水深測量修正

所需要。此外，諸如熱浪的氣候異常現象加速海平面上升，顯示海平面高度變化資料的收集日益重要，尤其在外海更加缺乏。而海嘯除發生當下造成許多人命財產損失之外，亦引起許多後遺症，例如日本 311 海嘯造成福島核電廠核廢水排放問題，從外海到岸邊的海嘯水位監測資料有助於驗證海嘯模擬模式，提升預測準確度。以上種種皆顯示在外海觀測水位原始資料的重要性，因為能據以分析而獲得外海的潮位、波浪、海嘯與海平面高度資料。若能進一步收集在外海連續的水位原始資料，則可擴增應用層面。

唯目前缺乏外海潮位資料，而外海波浪資料也幾乎未連續觀測，此外，全球平均海水面資料主要來自於衛星高度計與海岸潮位站的量測資料，然而衛星高度計之時間解析度卻受限於衛星運行軌道，而岸邊潮位站大多位於港內或海岸邊，資料也無法代表外海。

基於上述理由，加上以往本中心已將高精度 VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics) GNSS (global navigation satellite system) 掛載於標準型海氣象浮標，證實能在近岸觀測水位原始數據且獲得正確的潮位與波浪資料，唯僅能逐時觀測，並且應用範圍受限。由此，本研究目的有二：其一為開發具有即時、全時且連續觀測每秒鐘水位原始數據功能的水位浮標，其二為突破在外海觀測水位的距離限制，為達此目的，本研究水位浮標導入 RT-PPP (real-time precise point positioning) 定位技術，利用所觀測之水位原始數據分析潮位與波浪，並驗證之。

## 二、研究方法

本研究開發水位浮標並驗證運用 RT-PPP 量測之潮位與波浪，在開發專用水位浮標方面，本研究以掛載 GNSS 天線接收訊號與輕量化為主要設計考量，並提昇水位浮標的充、蓄電功能，以便能進行全時且連續的水位觀測。為減輕重量，水位浮標採用有別於本中心研發標準型海氣象浮標的新材質，外觀如圖 1。

在驗證方面，本研究在布放水位浮標之前，先行在南灣海域的標準型海氣象浮標上，利用 RT-PPP 技術與 VBS-RTK 定位技術同時量測潮位，運用

VBS-RTK 作為驗證 RT-PPP 潮位資料之用，以便在同一位置探討 RT-PPP 量測潮位之差異，南灣浮標上的 PPP 與 RTK GNSS 天線盤安裝外觀如圖 2，兩天線盤安裝高度略有差距。之後，配置 RT-PPP 技術的水位浮標試驗地點在安平商港北堤外水深 14.6 m 處，與水利署安平潮位站(以下簡稱安平潮位站)距離 2.8 km，與港研中心安平港南堤波浪站(以下簡稱南堤波浪站)距離 1.8 km，相關測站位置如圖 3，安平潮位站位於安平漁港內，而南堤波浪站位於安平商港南堤外。



圖 1 水位浮標外觀圖



圖 2 南灣浮標 PPP 與 RTK 天線盤安裝外觀圖



圖 3 水位浮標試驗位置圖

以下為本研究在定位與分析所運用的方法說明：

## 2.1 RT-PPP

由於 VBS-RTK GNSS 浮標需上網始能傳輸即時修正訊號，使得其布設位置受限於基地台網路訊號涵蓋範圍，此外，RTK 為一種差分的解算方法，所以定位精度也受基線距離的限制，在範圍外的即時定位，需利用其他技術，例如 RT-PPP。

本節說明本研究採用之 RT-PPP 服務 - TerraStar-C Pro，該服務已發展為全球的多星系定位服務，支援星系包含 GPS, GLONASS, Galileo 與 BeiDou，提供給使用者的修正資料是基於布建在全球超過 100 座的 GNSS 參考站網資料進行運算，包含電碼與載波偏差量(code and phase biases)，以及軌道與時表修正量(orbit and clock corrections)，這些資料透過地球靜止軌道衛星(geostationary satellites)直接廣播給使用者的 GNSS 接收器接收，以進行 PPP 定位解算(Sheridan et al., 2015)。依據規格，在水平與垂直向的定位精度，以均方根而言，分別為 2.5 cm 與 5 cm，可達與 VBS-RTK 服務相同，唯實際運用於外海觀測水位之精度仍有待檢驗，此外，TerraStar-C Pro 定位達到收斂以及定位收斂結果達到穩定均需較久時間(Sheridan et al., 2015)。

## 2.2 Doppler 量測速度原理

GNSS 量測運動速度與定位的原理不同，GNSS 以 Doppler 原理量測自身的運動速度，精度能達數個 cm/s 等級，基本原理可參考 He (2015)以及林等(2021)。水位浮標擷取 GNSS 速度原始資料乃是為了分析方向波譜，分析方法詳見 Lin et al. (2017)。

## 2.3 反移動平均高通濾波器

待處理的資料時序序列經過移動平均(moving average)，能消除高頻訊號，具有低通濾波器(low pass filter)效果，反之，將資料時序序列減去其移動平均，即具有高通濾波器(high pass filter)效果，稱之為反移動平均高通濾波器。本研究在以 RT-PPP 觀測原始時序資料分析波浪時，即將反移動平均高通濾波器運用水位高度原始時序資料，再分析波浪，Herbers et al. (2012)在 GPS 測波研究上運用此方法濾除低頻雜訊。

## 三、結果與討論

### 3.1 潮位

為探索 RT-PPP 觀測潮位誤差以及瞭解 RT-PPP 觀測水位資料特性，本研究先行在既有本中心南灣浮標上掛載 PPP 與 RTK GNSS 進行高精度定位，將 RT-PPP 與 VBS-RTK 所觀測潮位資料比對，圖 4 為 RT-PPP 與 VBS-RTK 潮位在各減平均值後之比對圖，從綠色菱形點線可知 RT-PPP 潮位最大誤差為 RT-PPP 較 VBS-RTK 高 0.38 m，均方根誤差(root mean square error, RMSE)為 0.11 m，平均絕對誤差(mean absolute error, MAE)為 0.08 m。此外從圖 4 亦可看出 RT-PPP 潮位資料較不連續，其原因為 RT-PPP 之解算成功率較低，亦即為解算標準偏差不符標準的資料被剔除所造成，極可能是採用逐時觀測不利於 RT-PPP 解算成果收斂所造成。以上結果顯示 RT-PPP 量測潮位尚無法達到與 VBS-RTK 一樣的精度，且解算成功率亦待加強，仍需進一步研究。

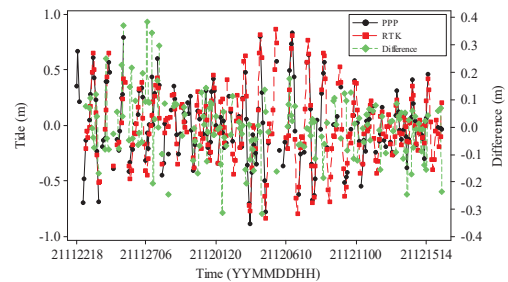


圖 4 RT-PPP 與 VBS-RTK 潮位比對圖(各減平均值)

針對南灣浮標 RT-PPP 收斂不理想之情況，本研究開發的專用水位浮標，能連續觀測水位，使 RT-PPP 在解算收斂時間充足的情況下運作，可評估提昇解算成功率與降低觀測潮位誤差之效果。本研究先從水位浮標 6 min 間距的潮位資料中選取整點潮位資料進行探討，圖 5 為 2022 年 9 月 4~13 日水位浮標與安平潮位，資料點間隔分別為 1 hr 與 6 min，兩站潮位基準均為 TWVD 2001，可看出在外海的水位浮標潮位高程略低於在港內的安平潮位站潮位高程，此與 Guillaume et al. (2019)所指出，在外海碎波帶外較碎波後岸邊的平均水位較低之現象一致。Guillaume et al. (2019)指出，外海波浪向岸傳播至碎波帶，波高迅速變小，所造成的波浪輻射應



力(wave radiation stress)梯度形成向岸作用的波力(wave force)，此作用力由向岸傾斜逐步升高的水位所形成的壓力(pressure force)平衡，此向岸傾斜逐步升高的水位即為波揚(wave setup)。未來可收集更多其他地點的港內外潮位資料印證。

從圖 5 亦可發現安平潮位站潮位變化曲線存在明顯週期較潮位週期短的擾動，而鄰近其他岸邊潮位站資料並無此現象，可再另外探討造成此現象的原因。

為在同一基準探討圖 5 兩站潮位資料的誤差，將兩站潮位資料各減平均值並重繪比對圖，如圖 6。本研究利用圖 6 資料分析水位浮標之觀測成功率與誤差，以探討相對於南灣試驗之改善情形。經分析在此期間 RT-PPP 水位浮標觀測潮位之觀測成功率為 95.3%，RT-PPP 水位浮標觀測潮位最大誤差為 RT-PPP 較安平潮位站高 0.32 m，RMSE 為 0.09 m，MAE 為 0.07 m，顯示水位浮標在連續觀測下，確實能提昇 RT-PPP 觀測成功率與精度。

從圖 6 可看出誤差較大時，通常水位浮標同時間的潮位突然變得稍微過高或過低，潮位曲線變得不平滑。為進一步探討造成 RT-PPP 潮位誤差的原因，需有同時同地的其他潮位資料作為比對的標準，水位浮標無布放處的比對資料，因此本研究利用前述南灣浮標上同時觀測 RT-PPP 與 VBS-RTK 的 GNSS 天線高度原始時序資料作為探討之用，為方便比對，RT-PPP 與 VBS-RTK 的 GNSS 天線高度原始時序資料均各減平均值。以 2021 年 12 月 3 日 4 時資料為例，圖 7 為 2021 年 12 月 3 日 3 時 50 分 0 ~ 134 秒的原始時序資料，圖中 VBS-RTK 資料於第 11 秒以前皆未達 RTK fixed，因此未顯示，而於第 12 秒以後皆達 RTK fixed，足以作為比對的標準，圖 7 中的曲線形狀變化是由波浪所引起，可知 RT-PPP 與 VBS-RTK 的曲線形狀幾乎一樣，但 RT-PPP 的高度較 VBS-RTK 為高。再觀察圖 8 為接續圖 7，2021 年 12 月 3 日 3 時 50 分 135 ~ 309 秒的原始時序資料，圖中 VBS-RTK 資料全部達 RTK fixed，足以作為比對的標準，從圖 8 可知 RT-PPP 與 VBS-RTK 不但曲線形狀幾乎一樣，而且高度也幾乎一樣，從圖 7 到 8 之間 RT-PPP 的高度變化趨勢，可發現 RT-PPP 原始時序資料存在漂移(drifting)情形。綜觀圖 7 ~ 8 可知 RT-PPP 的 GNSS

天線高度原始時序資料除了含有波浪週期的能量之外，尚含有其他週期較波浪長的能量，在分析潮位時，係選取 6-min 原始時序資料進行算術平均，僅能將其中的波浪能量濾除，但由於漂移所造成的較長週期能量無法被 6-min 算術平均濾除，此應為造成圖 6 水位浮標潮位突然變得稍微過高或過低，潮位曲線變得不平滑之原因。未來可繼續研究將 RT-PPP GNSS 天線高度原始時序資料的漂移能量濾除，以獲得更加準確的潮位資料，此外，亦可朝向研究其他的解算原理與服務，以避免 RT-PPP 技術的漂移誤差。

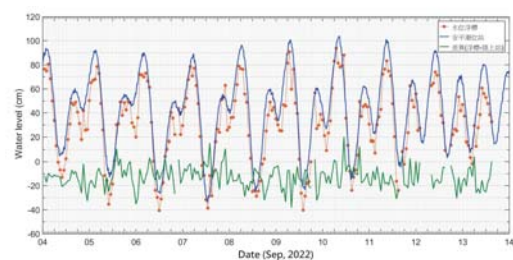


圖 5 水位浮標與安平潮位站潮位比對圖

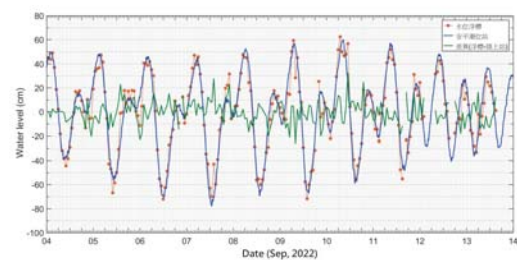


圖 6 水位浮標與安平潮位站潮位比對圖(各減平均值)

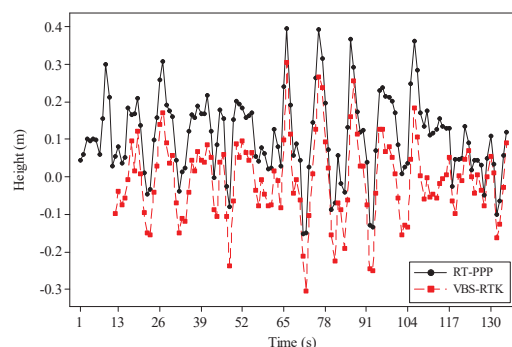


圖 7 2021 年 12 月 3 日 3 時 50 分 0 ~ 134 秒南灣浮標 GNSS 天線高度原始時序資料(各減平均值)

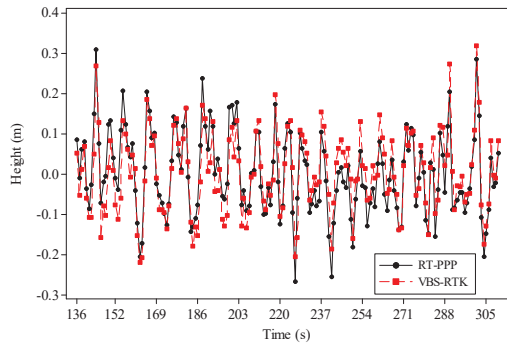


圖 8 2021 年 12 月 3 日 3 時 50 分 135 ~ 309 秒南灣浮標 GNSS 天線高度原始時序列(各減平均值)

### 3.2 波浪

Lin et al. (2017)運用 VBS-RTK 觀測由波浪運動所造成的水位高度、東西向運動速度與南北向運動速度共三個原始時序列資料，分析獲得波高、週期與波向等資料，從圖 7~8 可知 RT-PPP 的 GNSS 天線高度原始時序列資料含有波浪週期的能量以及較波浪週期更長的能量，從 GNSS 天線高度能換算為水位高度，並能濾除較波浪週期更長的能量，濾波方法如 2.3 節所述，此外，RT-PPP 亦觀測東西向與南北向運動速度原始時序列資料，原理詳見 2.2 節，因此本研究將根據 RT-PPP 所觀測的三個原始時序列資料分析波浪並驗證。

驗證資料來自於政府資料開放平台上，由交通部運輸研究所港灣技術研究中心提供的安平港波浪資料，目前從該平台內僅可取得示性波高與尖峰週期兩資料，因此本研究初步僅比對水位浮標的示性波高與尖峰週期兩資料，圖 9~10 分別為 2022 年 9 月 27 ~ 30 日水位浮標與南堤波浪站的示性波高與尖峰週期比對圖，圖 9 顯示兩站示性波高趨勢一致且數值差異小，圖 10 顯示兩站尖峰週期趨勢一致且數值差異不大，以上結果初步驗證水位浮標 RT-PPP 亦能量測波浪且量測示性波高與尖峰週期均為正確。本研究將持續蒐集南堤波浪站更完整與更長時間的波浪資料，進行更完整的比對與分析，使 RT-PPP 觀測波浪的驗證完整。

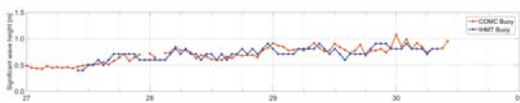


圖 9 水位浮標與安平港南堤波浪站示性波高比對圖

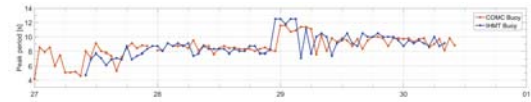


圖 10 水位浮標與安平港南堤波浪站尖峰週期比對圖

## 四、結論與建議

本研究目的為開發水位浮標並驗證運用 RT-PPP 量測潮位與波浪之效果，獲致結論與建議如下：

1. 完成開發輕量化的新材質浮標體，證實能作為承載水位浮標所需儀器之用，並證實水位浮標能在外海即時、全時且連續觀測水位，並需再持續驗證長期使用的性能。
2. 證實 RT-PPP 能觀測潮位，觀測成功率達 95.3%，RT-PPP 水位浮標觀測潮位最大誤差為 RT-PPP 較安平潮位站高 0.32 m，RMSE 為 0.09 m，MAE 為 0.07 m。
3. RT-PPP 所觀測 GNSS 天線高度原始時序列資料曲線形狀與 VBS-RTK 一致，但存在基準的漂移，此極可能為 RT-PPP 水位浮標發生較大觀測潮位誤差的原因。未來需持續研究以提升量測潮位準確度。
4. 初步驗證水位浮標 RT-PPP 亦能量測波浪且量測示性波高與尖峰週期均為正確，未來將持續蒐集更完整與更長時間的比對資料，以進行更完整的分析。
5. 建議未來在 4G 訊號良好之處，水位浮標可優先選用 VBS-RTK 定位技術觀測水位，反之，可採用 RT-PPP，但需濾除漂移的雜訊。

## 謝誌

本論文承蒙交通部中央氣象局委託執行「海氣象資料浮標新功能評估與測試」計畫，謹致謝忱，亦感謝經濟部水利署以及交通部運輸研究所港灣技術研究中心在安平海域所設置的測站，使本研究得以順利進行。

## 參考文獻

1. 林演斌、施孟憲、黃清哲(2021)「GNSS 浮標應用於離岸與近岸觀測之最新發展」，*第四十三屆海洋工程研討會論文集*，第 101-106 頁。
2. Guillaume, D., Angélique, M, Fabrice, A., Xavier,

- B., Déborah, I., and Rafael, A. (2019) The contribution of wind-generated waves to coastal sea-level changes, *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1563-1601.
3. He, K. (2015) *GNSS kinematic position and velocity determination for airborne gravimetry*, Technische Universitaet Berlin (Germany), Potsdam, Germany, ISSN 2190-7110.
  4. Herbers, T., Jessen, P., Janssen, T., Colbert, D., and MacMahan, J. (2012) Observing Ocean Surface Waves with GPS-tracked Buoys, *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 29, 944-959.
  5. Lin, Y.-P., Huang, C.-J., Chen, S.-H., Doong, D.-J., and Kao, C.C. (2017) Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas, *Sensors*, 17, 172, doi:10.3390/s17010172.
  6. Sheridan, K., Toor, P., Russell, D., Rocken, C., and Mervart, L. (2015) TerraStar-C: A Global GNSS Service for cm Level Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution, European Navigation Conference.