

GNSS 浮標應用於離岸與近岸觀測之最新發展

林演斌^{1*} 施孟憲² 黃清哲³

^{1*}國立成功大學近海水文中心研發組長

²國立成功大學近海水文中心研發工程師

³國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心顧問

摘要

本團隊已開發全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標能夠即時觀測潮位與波浪，為突破布放位置限制，故測試即時精密單點定位(real-time precise point positioning, RT-PPP)定位效果，以發展離岸 GNSS 浮標，實驗結果顯示 RT-PPP 定位成果能量測波浪。同時，為強化海岸保護所需基礎資料，本研究亦開發並布設小型近岸 GNSS 浮標，於 2021 年 7 月下旬烟花颱風與西南風期間在西南部近岸測得碎波與其引起的流速變化，效果良好。

關鍵詞：全球衛星導航系統浮標、潮位、波浪、碎波

Up to date development of the GNSS buoy for monitoring in offshore and nearshore areas

Yen-Pin Lin^{*}, Mon-Shen Shi, Ching-Jer Huang

^{*} Head, R&D department, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

We have developed the Global Navigation Satellite System (GNSS) for monitoring real-time tides and ocean waves in coastal areas. However, the range from land of a GNSS buoy is limited because of lack of network signals. To enlarge this range, we are developing the offshore GNSS buoy and the experimental results are illustrated. Meanwhile, we also developed the small-size nearshore GNSS buoy in order to enhance the database for coastal protection. The breakers and currents induced by breakers were identified by using the data observed by the small-size nearshore GNSS buoy in July 2021 and the south-west coast of Taiwan, R.O.C.. The results demonstrate that the performances of the small-size nearshore GNSS buoy for measuring nearshore ocean waves are excellent.

Keywords: GNSS buoy; Tide; Wave; Breaker

一、前言

外海實測潮位資料是海洋工程設計之重要依據，也能驗證潮位模式，提高預測準確度。此外，海平面上升威脅日益增高，在外海觀測能直接獲得平均海水面資料，亦能作為驗證衛星高度計遙測的資料。然而，外海缺乏構造物，不易設置觀測站，而資料浮標已被國內外廣泛採用作為長期觀測平台，為合

適的發展方向。另一方面，近岸碎波帶實測資料相當重要，因為潮位與波浪是影響漂砂濃度之重要因子，而漂砂活動造成海岸變遷，對於海岸保護很重要。然而，在碎波帶長期間觀測，儀器非常不易生存，例如底碇式常常在大浪後遺失而失掉觀測資料。由於以上原因，使得碎波帶的實測資料極度缺乏，而資料浮標具即時傳輸優勢，能減少資料遺失，為合適的發展方向。

在觀測外海潮位方面，Dawidowicz (2014)指出衛星高度計(satellite altimetry)在近岸海域觀測海水水位之誤差較深海大，因此，GNSS (Global Navigation Satellite System)浮標能彌補此海域海水水位量測之不足。Lin et al. (2017)利用 VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics)定位技術開發 GNSS 浮標，獲得公分等級之定位成果，並據以分析潮位與波浪；但由於定位過程需透過電信廠商基地台上網連線，使得該技術無法適用在電信廠商網路訊號涵蓋範圍以外。為突破布放位置限制，需利用其他不同種類的解算方法以及衛星傳輸無遠弗屆的特性。Kuo et al. (2012)以精密單點定位 (precise point positioning, PPP)方法分析 GPS 浮標記錄資料，發現使用 PPP 定位的 GPS 浮標具有觀測海面變化精度達數公分之潛力，惟其為非即時觀測。Choy et al. (2017)指出在導入基於衛星的增強系統 (satellite-based augmentation systems, SBAS)下，PPP 精度已可達公分等級。有些商業型 SBAS 服務，例如 Novatel TerraStar-C 服務 (https://www.novatel.com/products/terrastar-gnss-corrections/#contentTab1)即可達到，不論該服務的使用者是在陸地或空中。然而，使用該 RT-PPP 服務實際的定位成果精度以及利用定位成果分析潮位與波浪之效果，均有待實證。

碎波現象極為複雜，近岸處的碎波造成沿岸流與裂流，是海岸水上遊憩活動的危險因子。另外，碎波造成的流速變化也影響近岸漂砂，與海岸變遷息息相關，可見觀測碎波的重要性。有關觀測碎波方法，在深海有 Longuet-Higgins and Smith (1983)使用柱型浮標安裝電容線量測水位躍起以觀測現場碎波，然而浮標起伏 (heave) 運動會影響量測。Gemrich and Farmer (1999)使用導電度計在漂流式浮標偵測碎波引起的水位空缺(void fraction)的快速變化，但當浮標漂至氣泡區時，此方法可能偵測錯誤。Thomson (2012)以 SWIFT (Surface wave instrumentation floats with tracking)柱型漂流浮標量測碎波引起的亂流，該浮標量測流速，並以 200 Hz 頻率量測加速度與姿態，量測結果用來計算能量消散。Brown et al. (2018)指出雖然能量傳遞至波峰的機制隨水深變化，但能量消散與水深無關，所以在碎波帶更適合發展碎波觀測技術，因為能在短期間

內量到很多碎波。Sinclair (2014)在碎波帶內以直徑 8.75 cm 漂流式浮體上的慣性量測單元 (inertial measurement unit, IMU)量測碎波，該技術能成功辨識捲浪(plunging)型碎波。Brown et al. (2018)並指出，碎波的衝擊特性為短期間內造成高頻運動，因此高頻的取樣對於偵測碎波至為關鍵。綜合而言，前人使用於觀測碎波的平台以資料浮標佔多數，僅極少數採用固定的平台，而使用觀測儀器包含電容線、導電度計、IMU、電位計、海流儀，取樣頻率較一般觀測波浪更高。

基於前述動機與前人研究，本研究延伸 GNSS 浮標開發至離岸與近岸碎波帶兩處，一方面擴展其功能，以期未來在離岸海域即時觀測水位時，能不受陸地網路訊號與衛星參考站限制。本研究分析即時精密單點定位(real-time PPP, RT-PPP)成果用於評估量測波浪運動之效果。另一方面，開發小型近岸 GNSS 浮標並評估其在碎波帶觀測波浪之效能，加上它具有掛載漂砂濃度觀測儀器能力，期待未來能提供更多在近岸碎波帶內的潮、波、流與漂砂濃度資料，應用於海岸變遷趨勢分析。

二、研究方法

GNSS 浮標研發係整合多個技術而成，主要為浮標體、高精度的 GNSS 定位與量測技術、波浪與流速分析方法等，並安裝於現場實地觀測，以下說明相關原理、方法與現場觀測布置：

2.1 現場試驗布置

本研究在離岸 GNSS 浮標部分，尚待進行現場試驗。而小型近岸 GNSS 浮標體係由本團隊根據近岸碎波帶觀測與作業需求所設計，其直徑為 0.8 m，裝載 540 AH 容量的電池後重量約 90 kg，能持續運作數月，確切運作期間則視裝載儀器而定。該浮標觀測處距離陸地約 80 m，水深約為 3 m，外觀與位置如圖 1。取樣 GNSS 觀測的高度與速度資料之頻率為 2 Hz，期間為每小時的 50 min 起，共 10 min。本研究資料期間為 2021 年 7 月 5 至 30 日，期間內主要天氣系統有烟花颱風與西南風。而流速則以掛載在錨繫的聲波式都卜勒流速儀觀測，每 2 秒發射聲波量測一次，每 6 分鐘獲得 1 筆平均流速。本研究引用彌陀浮標觀測之波浪資料與小型近岸 GNSS 浮標作比對，彌陀浮標水深為 23 m，約位於小型近

岸 GNSS 浮標南方 17 km 處。



圖 1 小型近岸 GNSS 浮標外觀與位置圖

2.2 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。而在範圍外的即時觀測，可利用 RT-PPP 技術。

TerraStar-C Pro 為全球的多星系定位服務，包含 GPS, GLONASS, Galileo 與 BeiDou，修正訊號的產出是基於布建在全球超過 100 座的 GNSS 參考站網，並能在全世界透過地球靜止軌道衛星直接對使用者的 GNSS 接收器發送。在水平與垂直向的定位精度，以均方根而言，分別可達 2.5 cm 與 5 cm，與 VBS-RTK 服務相同。惟相較於 VBS-RTK 收斂時間較久，優勢為不需陸地行動網路，亦即使用的位置不受陸地行動網路訊號涵蓋範圍的限制。本研究 PPP 定位解算係由浮標上的 GNSS 接收器執行。

2.3 以 GNSS 觀測數據分析波浪方法

本研究將 GNSS 量測之水位時序列，先經處理雜訊以及低頻雜訊，再以快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)計算一維波譜，最後再平滑之，並據以計算示性波高(significant wave height)、平均週期(zero-crossing period)。本文以平均週期與水深代入分散關係式(dispersion relation)求得觀測處波浪的波長，再進一步計算波浪相速(wave celerity)。另外，2.1 小節所述 GNSS 觀測的速度資料為浮標體在水平向的運動速度，可代表水平向的水粒子運動速度，此速度大於波浪相速時，代表發生碎波。本文計算於每小時觀測 10 min 的 1,200 點速度大於波浪相速的點數，並進一步計算比例，以此作為發生碎波多寡的指標。

本研究參照 Lin et al. (2020)研究，以垂直向位移、東西向水粒子運動速度與南北向水粒子運動速

度組合分析方向波譜，以式(1), (2)計算：

$$S(f, \theta) = D(f, \theta)C_{\eta\eta}(f) \quad (1)$$

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a'_n(f) \cos n\theta + b'_n(f) \sin n\theta] \right\} \quad (2)$$

式中 f 為頻率， θ 為波浪前進方向角，係以平面上數學 xy 座標系統之正 x 軸起算，逆時針遞增， $D(f, \theta)$ 為方向分布函數(directional spreading function)， $C_{\eta\eta}(f)$ 為一維波譜， $a'_n(f)$ 和 $b'_n(f)$ 為傅立葉(Fourier)係數， n 為傅立葉級數之階次。

依據 Lin et al. (2017)之重新整理，上述方向分布函數中之傅立葉係數以式(3) - (6)計算：

$$a'_1(f) = \frac{C_{\eta u}(f)}{\sqrt{C_{\eta\eta}(f)[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]}} \quad (3)$$

$$b'_1(f) = \frac{C_{\eta v}(f)}{\sqrt{C_{\eta\eta}(f)[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]}} \quad (4)$$

$$a'_2(f) = \frac{C_{uu}(f)-C_{vv}(f)}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (5)$$

$$b'_2(f) = \frac{2C_{uv}(f)}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (6)$$

式中 $C_{mn}(f)$ 為波浪觀測量 m 與 n 之交錯譜(cross-power spectrum)， m 與 n 分別代表 η , u , 或 v 其中之一， η , u , 與 v 分別代表水位(亦即垂直向位移)、東西向及南北向水粒子運動速度。

最後再從所計算的各頻率與方向的方向波譜資料中，選取數值最大者即為主波向(dominant wave direction)，本文中主波向為波浪的來向。

2.4 Doppler 量測速度原理

GNSS 浮標以 Doppler 原理量測自身的運動速度，精度能達數個 cm/s 等級。He (2015)指出以都普勒偏移(Doppler shift)方程式計算衛星 S 與 GNSS R 速度的基本原理，如式(7)所示：

$$D_{R_j}^S = \frac{V_r}{c} f_j^S \quad (7)$$

式中 $D_{R_j}^S$ 為 S 與 R 在第 j 個頻道之頻率偏移， f 為 GNSS 載波相位(carrier phase)觀測的頻率， V_r 為 S 相對於 R 的軸向速度(radial velocity)， c 為真空光速。當 R 與 S 相互接近時， $D_{R_j}^S$ 為正值，反之則為負值。本研究採用之小型近岸 GNSS 浮標能接收衛星載波相位訊號，根據儀器規格，其量測水平運動速度精度以一倍準偏差計算最佳可達 0.7 cm/s，惟海上現場量測可能受當時的大氣條件影響。

2.5 ButterWorth 低通濾波

本研究採用巴特沃斯濾波器(Butterworth filter)濾除流速資料中的潮流成分，它也被稱作最大平坦

濾波器。其特點是通頻帶(passband)內的頻率響應曲線最大限度平坦，沒有漣波，而在阻頻帶(stopband)則逐漸下降為零。Hollos and Hollos (2014)指出巴特沃斯濾波器的頻率響應如式(8)：

$$|G_n(j\omega)|^2 = \frac{1}{1+\epsilon^2\omega^{2n}} \quad (8)$$

式中 n 為階數， ϵ 為最大通頻帶漣波(maximum pass band ripple)， j 為虛數單位， ω 為角頻率。此濾波器的截止頻率(cut off frequency)意義為於該頻率處能量被濾除一半。

三、結果與討論

3.1 離岸型 GNSS 實驗

圖 2 為離岸 GNSS 靜態高度時序列圖，圖中資料期間為一天，取樣頻率為 2 Hz，標準偏差為 2.9 cm，小於 5 cm，顯示離岸型 GNSS 結合 RT-PPP 服務所量測高度之精度符合規格。此外，本研究為檢測離岸型 GNSS 感測波浪運動性能，由工作人員伸直手臂並手持離岸型 GNSS 方式，使離岸型 GNSS 進行垂直面的圓周運動，在旋轉前以尺丈量離岸型 GNSS 在最高點與最低點兩位置之高度差約為 1.14 m，以碼表計算多圈旋轉總時間並計算平均值約 8 秒，圖 3 為離岸 GNSS 動態高度時序列圖，圖中資料點之取樣頻率為 10 Hz，可看出波形近似正弦波。再者，取圖中 5 個波的平均波高為 1.18 m，與以尺丈量結果相差僅 0.04 m。此外，計算圖中 5 個波的平均週期約為 8.6 s，與用碼表計算之平均值相差 0.6 s。綜而言之，以上試驗數據可說明離岸型 GNSS 量測波浪運動波形、波高與週期之效果良好。

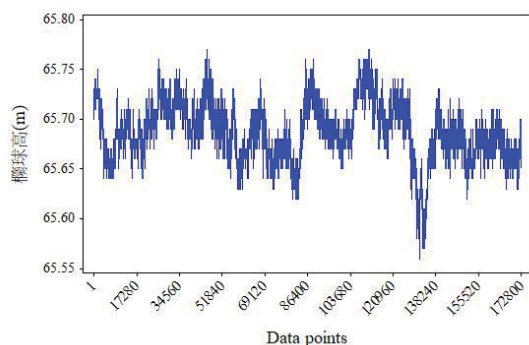


圖 2 離岸 GNSS 靜態高度時序列圖

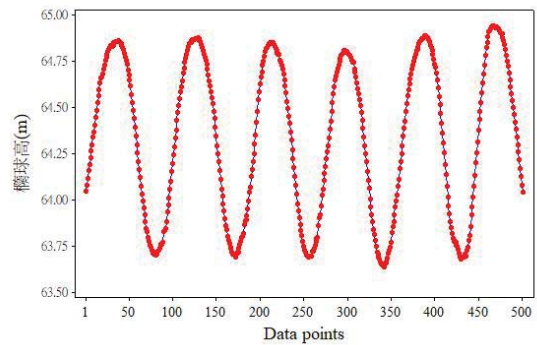


圖 3 離岸 GNSS 動態高度時序列圖

3.2 小型近岸 GNSS 浮標波浪觀測

為查證小型近岸 GNSS 浮標觀測波浪資料的正確性，本研究將其與鄰近在外海的彌陀浮標波浪資料比較，示性波高、尖峰週期與主波向(dominant wave direction, DWD)比較圖分別如圖 4 ~ 6 所示。觀察圖 4，發現於 7 月 24 日以前，兩站示性波高均小，其中近岸較外海示性波高小，而之後烟花颱風與西南風期間，兩站示性波高均較大，且近岸與外海示性波高相互一致。由於兩站位置與水深不同，波浪受近岸地形影響，使得兩站示性波高不完全相等，尚為合理。而從圖 5 可知，兩站之尖峰週期在大部分時候為一致但少數時候不同。此外，從圖 6 可知，兩站之主波向絕大部分為西南來向，其中彌陀浮標於 7 月 22 日 4 時~23 日 22 時有許多西北來向的主波向，原因是受烟花颱風影響，較強的西北風引起波浪所致，而同期間小型近岸 GNSS 浮標的主波向轉向較不明顯，應是受近岸地形影響所致。綜上所述，可知小型近岸 GNSS 浮標觀測之波浪統計資料皆為正確。

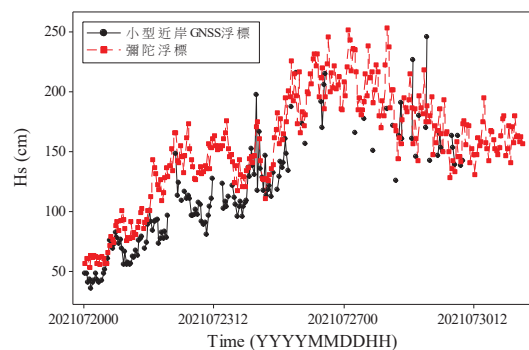


圖 4 小型近岸 GNSS 浮標示性波高比較圖

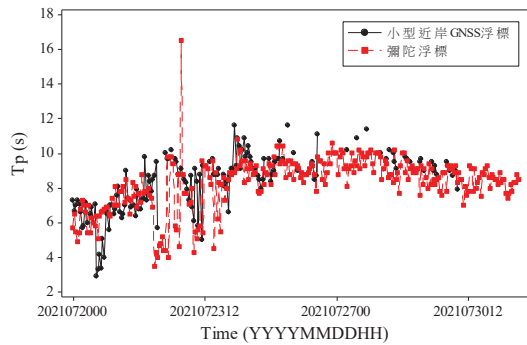


圖 5 小型近岸 GNSS 浮標尖峰週期比較圖

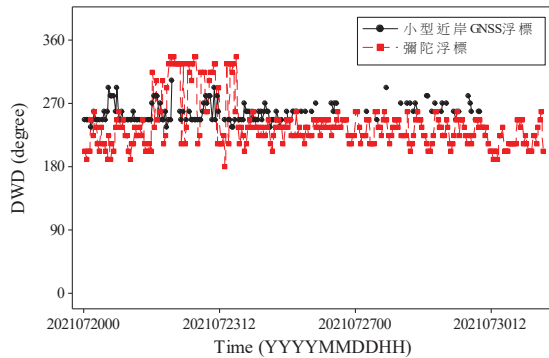


圖 6 小型近岸 GNSS 浮標主波向比較圖

3.3 近岸碎波觀測

在近岸的碎波影響流速變化，對於遊憩安全與漂砂運移均有影響，本研究開發小型近岸 GNSS 浮標之隨波性良好，且能觀測瞬時的運動速度，其運動速度可視為水粒子運動速度。本研究先以每小時觀測的平均週期與水深計算波長，並計算波浪相速，再從每小時觀測 10 min 的 1,200 點數據中，計算最大運動速度，結果顯示於圖 7 上圖。另外，又將該 1,200 點之數據逐一與波浪相速比較，找出運動速度大於波浪相速的點數，並計算比例，結果顯示於圖 7 下圖。從圖 7 上圖發現，從 7 月 22 起的逐時資料中，水粒子最大運動速度偶有大於波浪相速，而於 7 月 25 日下午至 30 日上午期間，水粒子最大運動速度幾乎皆大於波浪相速。此外，從圖 7 下圖亦可看出，於 7 月 25 日下午至 30 日期間，運動速度大於波浪相速的比例較高，顯示發生碎波較頻繁，其原因應是該期間與海域受烟花颱風影響，先是吹拂較強的西北風，待颱風遠離後又引起西南風與西南

氣流，使得觀測處波浪發生變化。上述討論顯示出小型近岸 GNSS 浮標除能觀測一般的波浪統計值之外，亦能觀測碎波。

為觀察近岸碎波引起流速變化現象，分析 7 月 5 日至 30 日期間的流速資料如圖 8，圖 8 上與下圖分別為小型近岸 GNSS 浮標觀測與濾除潮流成分之流速。圖 8 上圖為海面下方約 1.5 m 處的流矢圖，從該圖發現，7 月 24 日以前的流速多為北北東向與南南西向，整體有明顯半日潮流的特徵，但偏南南西向的海流較明顯，漲退潮流速大多在 20 cm/s 左右，但 7 月 25 日之後，流速明顯增加達約 70 cm/s，流向多為北北西向、北向及北北東向，可能原因為當時浪高變大，於量測位置處形成碎波，造成較強的往北沿岸流。

為探討其原因，使用 Ren-Chieh Lien 所撰寫 LPASS 程式(Lien et al., 2014)，將 1 小時 1 筆的海流資料運用 Butterworth filter 低通濾波的方法過濾，截止頻率為 1/36，結果如圖 8 下圖所示。可以發現平時 7 月 5~24 日浪高較小時，除了潮流外，還有流速約 15 cm/s 左右、流向為南南西向的沿岸流。但是當 7 月 25 日以後，有一股流速最高接近 40 cm/s 的流速，流向往北的沿岸流。對照圖 7 下圖，於 7 月 24 日以前幾乎無碎波發生，而 7 月 25 日以後碎波發生較頻繁，可知沿岸流的變化與碎波明顯有相關。

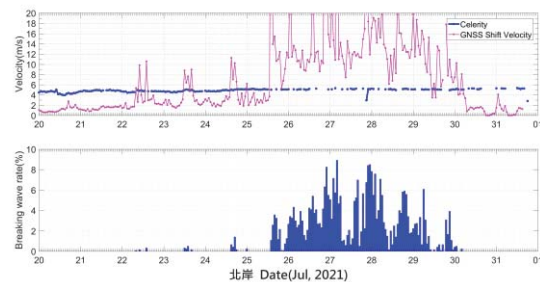


圖 7 小型近岸 GNSS 浮標速度(上)與碎波點數比例(下)圖

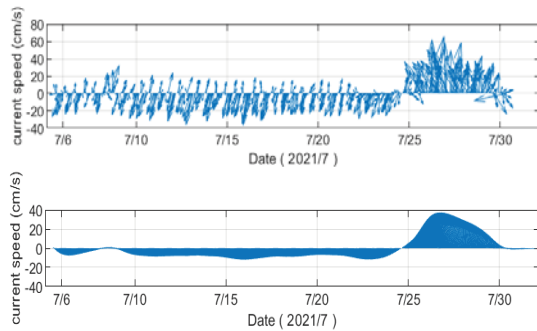


圖 8 小型近岸 GNSS 浮標觀測(上)與濾除潮流成分(下)之流速變化圖

四、結論

本研究同步呈現本團隊研發離岸 GNSS 浮標與小型近岸 GNSS 浮標成果，並分析兩者的實驗與現場觀測資料，獲得下述結論：

1. 離岸型 GNSS 量測波浪運動波形、波高與週期之效果良好。
2. 小型近岸 GNSS 浮標觀測之波浪統計資料皆為正確，且能觀測碎波。
3. 小型近岸 GNSS 浮標觀測到沿岸流的變化與碎波明顯有相關。

謝誌

本論文採用之小型近岸 GNSS 浮標資料係 2021 年經濟部水利署第六河川局「黃金海岸漂砂自動化觀測」計畫之部分觀測成果，而經濟部水利署彌陀浮標觀測資料係從交通部中央氣象局網頁取得，謹向上述單位致謝。

參考文獻

1. Brown, A., et al. (2018) Kinematics and statistics of breaking waves observed using SWIFT buoys, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44(4), 1011-1023.
2. Choy, S., Kuckartz, J., Dempster, A.G., Rizos, C. (2017) GNSS satellite-based augmentation systems for Australia, *GPS Solut.*, 21, 835-848. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0569-2>.
3. Dawidowicz, K. (2014) Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts, *Acta Adriatica*, 55(2), 145-161.
4. Gemmrich, J.R., Farmer, D.M. (1999) Observations

- of the scale and occurrence of breaking surface waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2595-2606.
5. He, K. (2015) *GNSS kinematic position and velocity determination for airborne gravimetry*, Technische Universitaet Berlin (Germany), Potsdam, Germany, ISSN 2190-7110.
 6. Hollos, S. and Hollos, J.R. (2014) *Recursive digital filters: A concise guide*, Abrazol Publishing.
 7. Kuo, C.Y., Chiu, K.W., Chiang, K.W., Cheng, K.C., Lin, L.C., Tseng, H.Z., Chu, F.Y., Lan, W.H., and Lin, H.T. (2012) High-frequency sea level variations observed by gps buoys using precise point positioning technique, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 23, 209-218.
 8. Lien, R.-C., Ma, B., Cheng, Y.-H., Ho, C.-R., Qiu, B., Lee, C.M., and Chang, M.-H. (2014) Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 2129-2142.
 9. 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.
 10. Lin, Y.-P., Huang, C.-J., and Chen, S.-H. (2020) Variations in directional wave parameters obtained from data measured using a GNSS buoy, *Ocean Engineering*, 209, 107513.
 11. Longuet-Higgins, M.S. and Smith, N.D. (1983) Measurement of breaking waves by a surface jump meter, *J. Geophys. Res.*, vol. 88, no. C14, 9823-9831.
 12. Sinclair, A. (2014) FlowRider: A lagrangian float to measure 3-D dynamics of plunging breakers in the surf zone, *J. Coastal Res.*, vol. 293, 205-209.
 13. Thomson, J. (2012) Wave breaking dissipation observed with “SWIFT” drifters, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 29, no. 12, 1866-1882.