

GNSS浮標方向波譜分析與比較

林濱斌¹

黃清哲¹

陳聖學¹

高家俊¹

林燕璋²

滕春慈²

國立成功大學近海水文中心¹

中央氣象局海象測報中心²

摘要

本研究團隊開發全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標，能在近岸海域同時觀測潮位與波浪，並以所觀測之水位(water surface elevation)、東西向速度與南北向速度3個時序列分析方向波譜(directional wave spectrum)，證實水位時序列、示性波高(significant wave height)、零上切週期(zero-crossing period, 或稱為平均週期)、一維波譜(one-dimensional wave spectrum)、方向波譜與主波向(dominant wave direction, DWD)，皆與加速度-傾角-電羅經(accelerometer-tilt-compass, ATC)波浪儀之觀測結果一致(Lin et al., 2017)。然而與波向有關的波浪參數除主波向之外，還有平均波向(mean wave direction)與方向分布(directional spreading)等，以方向波譜分析而言，可運用之GNSS時序列組合尚有其他2種，因此本研究利用中央氣象局小琉球浮標於2016年海馬(HAIMA)颱風期間之GNSS數據分析，證實GNSS及節電型ATC波浪儀等4種時序列組合之主頻平均波向絕大部分幾乎相等。其次，主頻平均波向與主波向在絕大多數時候幾乎相等。另外，GNSS 3種時序列組合在主頻之方向分布幾乎相等，而節電型ATC在主頻之方向分布與GNSS一致。此外，GNSS之3種時序列組合之主波向絕大部分幾乎相等。本研究亦發現，在小波高情況下，4種組合中以 ηuv 組合之方向波譜最佳，而在大波高情況下，4種組合之方向波譜皆非常好。

關鍵字：資料浮標、GNSS、主波向、平均波向、方向分布、方向分布函數

一、前言

海洋中的波浪資料包含波高、週期與波向等，是工程、環境與研究所需的基本資料，舉例而言，波向會影響海堤上波浪之溯升高度，而波向係從方向波譜(directional wave spectrum)計算而得，可見方向波譜觀測非常重要。

林等人(2012, 2014, 2015, and 2017)及Lin et al. (2017)應用中華民國內政部國土測繪中心提供之Virtual Base Station Real-Time Kinematics (VBS-RTK)服務，研發全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)浮標，直接量測換算為公分等級精度之海面水位高度資料，能同時分析潮位與波浪資料。在波浪方面，建立以GNSS之水位(η)、東西向速度(u)與南北向速度(v)時序列為基礎之方向波譜分析流程，前述研究顯示，GNSS所得波浪資料，包含水位時序列(water surface elevation)、一維波譜(one-dimensional wave spectrum)、方向波譜(directional wave spectrum)、示性波高(significant wave height)、平均週期(zero-crossing period)、尖峰週期(peak period)及主波向(dominant wave direction, DWD)，皆與accelerometer-tilt-compass (ATC)及節電型ATC波浪

儀所觀測波浪資料一致。然而，前述研究未以GNSS量測之三軸位移(displacement)與速度(velocity)共6個時序列，進行多種時序列組合，分析方向分布函數(directional spreading function)及方向波譜，此外，亦未分析平均波向(mean wave direction)與方向分布(directional spreading)，致使在選擇最佳GNSS組合時缺乏依據。

Work (2008)利用現場試驗資料比較資料浮標與ADCP (acoustic doppler current profiler)波浪觀測結果之異同，發現大部分之波譜參數非常一致。最顯著差異發生在波譜之高頻與低頻處，在0.05 Hz以下，資料浮標量測到少許的波浪能量，但ADCP並無，使得資料浮標之平均週期與尖峰週期均較ADCP大。該研究針對此2種波浪儀時序列採用相同的方向波譜分析方法，稱之為MEM (maximum entropy method)，但採用不同的時序列組合分析方向波譜，其運用了資料浮標的6組時序列，與ADCP之12組時序列。證實兩儀器獲得相近的平均波向與主波向，兩者差異為資料浮標之方向解析能力較低，亦即ADCP量測之方向分布函數較資料浮標更為集中在主波向能量周圍。不過該研究與資料浮標比對之波浪資料係運用ADCP量測之速度與壓力時序列分析，並未直接量測

水位時序列，且其最大的示性波高僅有2.5 m，尚未包含颱風大浪資料。Riedel and Healey (2005)指出，分別運用三軸位移與三軸速度，均能計算方向分布函數，進一步能獲得平均波向與方向分布。

有鑑於此，本研究選取2016年海馬(HAIMA)颱風風浪影響期間小琉球浮標的現場試驗資料，最大之示性波高將近7 m，運用3種GNSS時序列組合，計算方向分布函數及方向波譜，並比較主頻的平均波向與方向分布及主波向等波浪參數之差異。另外，本研究亦利用同在資料浮標上的節電型ATC時序列組合，計算方向分布函數及方向波譜，並比較節電型ATC與GNSS在主頻之平均波向與方向分布，以更完整地掌握波浪觀測儀器特性。

二、研究方法

與本研究有關之GNSS浮標量測工作原理、波浪儀規格與現場試驗佈置請參閱林等人(2017)，本篇說明GNSS資料選取、4種時序列組合之傅立葉係數、加權傅立葉係數、主頻的平均波向與方向分布等，如下：

(一) GNSS 資料選取

GNSS觀測時，受到GNSS接收之衛星訊號、網路連線品質、衛星定位基準網接收之衛星訊號、電離層活動及數據擷取方法等因素影響，無法完全保證每秒鐘皆獲得固定解，因此定義解算成功率如式(1)，以每小時從所觀測600 s數據選取前面的512 s數據分析波浪而言，每個瞬間觀測之原始數據包含經度、緯度、高度、東西向速度、南北向速度與垂直向速度，式(1)之總資料數為512，而解算成功資料數為獲得固定解之資料數，並挑選每小時的解算成功率為100%之觀測資料分析波浪。

$$\text{解算成功率} = \frac{\text{解算成功資料數}}{\text{總資料數}} \quad (1)$$

(二) 節電型 ATC 加速度-縱搖-橫搖(aPR)與 GNSS 水位-東西向速度-南北向速度 (η_{uv}) 組合

本研究使用Lin et al. (2017)建立之波浪分析流程，運用節電型ATC量測之近乎垂向加速度(acceleration, a)、縱搖(pitch, P)與橫搖(roll, R) 3個時序列分析，先獲得中間過程之加速度譜，並據以分析獲得一維波譜、示性波高、平均週期、尖峰週期、水位時序列、方向波譜與主波向等。另外，GNSS波浪分析流程能從GNSS天線量測的數據中，直接將天線高度換算為海面水位高度(η)，並結合GNSS觀測之東西、南北向速度(u and v)共3個時序列，分析獲得一維波譜、示性波高、平均週期、尖峰週期、方向波譜與主波向等。

(三) GNSS 東西向位移-南北向位移-水位組合 ($en\eta$)

以GNSS量測原始數據中之經、緯度分別代表海水運動之東西向、南北向位移，而水位如同前一小節所述，運用GNSS之東西向位移X(t) (e)、南北向位移Y(t) (n)與水位Z(t) (η)時序列，依據Riedel and Healey (2005)，可推求計算方向分布函數之4個傅立葉係數，如式(2) - (5)。

$$a'_1(f) = \frac{\text{Im}[C_{XZ}(f)]}{\sqrt{[C_{XX}(f)+C_{YY}(f)]C_{ZZ}(f)}} \quad (2)$$

$$b'_1(f) = \frac{\text{Im}[C_{YZ}(f)]}{\sqrt{[C_{XX}(f)+C_{YY}(f)]C_{ZZ}(f)}} \quad (3)$$

$$a'_2(f) = \frac{C_{XX}(f)-C_{YY}(f)}{C_{XX}(f)+C_{YY}(f)} \quad (4)$$

$$b'_2(f) = \frac{2 \text{Re}[C_{XY}(f)]}{C_{XX}(f)+C_{YY}(f)} \quad (5)$$

其中f為頻率， C_{ij} 為時序列i與j之交錯譜(cross-spectra)，i與j可為X(t)、Y(t)或Z(t)，運算子Im與Re分別代表取複數之虛部及實部。

(四) GNSS 東西向-南北向-垂直向速度組合(uvw)

以GNSS量測原始數據中之東西向速度、南北向速度與垂直向速度分別代表海水運動之東西向、南北向與垂直向速度(u, v, and w)，依據Riedel and Healey (2005)，可推求方向分布函數之4個傅立葉係數，如式(6) - (9)。

$$a'_1(f) = \frac{\text{Im}[C_{uw}(f)]}{\sqrt{[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]C_{ww}(f)}} \quad (6)$$

$$b'_1(f) = \frac{\text{Im}[C_{vw}(f)]}{\sqrt{[C_{uu}(f)+C_{vv}(f)]C_{ww}(f)}} \quad (7)$$

$$a'_2(f) = \frac{C_{uu}(f)-C_{vv}(f)}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (8)$$

$$b'_2(f) = \frac{2 \text{Re}[C_{uv}(f)]}{C_{uu}(f)+C_{vv}(f)} \quad (9)$$

其中i與j可為u(t)、v(t)或w(t)。

(五) 加權傅立葉係數定義

本研究運用上述節電型ATC與GNSS共4種時序列組合計算傅立葉係數，此方法稱之為TFS (truncated Fourier series)，為Longuet-Higgins et al. (1963)所提出，並採用該研究提出之加權傅立葉係數計算方向分布函數，Earle (1996)指出，雖此舉增加方向分布的寬度，但能避免在遠離平均波向的方向處出現負值。此外，由於不會影響比較各種組合所獲得方向分布之結果，因此本研究採用加權後之係數。Longuet-Higgins et al. (1963)提出之加權傅立葉係數，可表示為式(10) - (13)

$$a''_1(f) = \frac{2}{3} a'_1(f) \quad (10)$$

$$b''_1(f) = \frac{2}{3} b'_1(f) \quad (11)$$

$$a''_2(f) = \frac{1}{6} a'_2(f) \quad (12)$$

$$b''_2(f) = \frac{1}{6} b'_2(f) \quad (13)$$

(六) 主頻之平均波向與方向分布定義

依據Riedel and Healey (2005)，平均波向與方向分布均為頻率 f 之函數，以一維波譜計算之主頻代入式(14) - (15)中之 f ，可分別獲得主頻之平均波向與方向分布。

$$\theta_m(f) = \tan^{-1} \frac{b_1''(f)}{a_1''(f)} \quad (14)$$

$$\sigma_\theta^2(f) = 2[1 - (a_1''(f) \cos \theta_m(f) + b_1''(f) \sin \theta_m(f))] \quad (15)$$

三、結果與討論

1.3 種 GNSS 組合之比較

(1) 主頻之平均波向

圖1為3種GNSS組合之主頻平均波向及其差異逐時變化圖。從差異線可看出， uvw 與 ηuv 組合之平均波向幾乎相等， $en\eta$ 與 ηuv 組合之平均波向絕大部分幾乎相等，87.8%之樣本差異在 $\pm 10^\circ$ 以內，圖1中最大差異為 204° ，發生於2016年10月26日0時，此時GNSS示性波高為0.37 m， ηuv 、 $en\eta$ 與 uvw 組合之平均波向分別為 138° 、 342° 與 146° ，觀察 $en\eta$ 組合於25日21時至26日2時之方向波譜(詳見第(4)小節)，除了26日0時主要波浪能量從西北象限傳來之外，其餘皆自西南及東南象限傳來，以連續性法則觀之，應是26日0時 $en\eta$ 組合之平均波向有偏差。

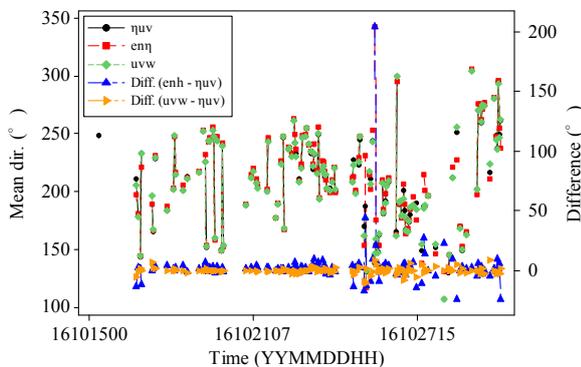


圖1 GNSS主頻平均波向及差異逐時變化圖

主頻平均波向與主波向均為常見的波向資料，為瞭解兩者差異，繪製GNSS ηuv 組合之主頻平均波向與主波向差異組體圖，如圖2。波向差異為主頻平均波向減去主波向之數值，從圖2可知，波向差異在 $\pm 15^\circ$ 以內之樣本佔了83.8%，顯示兩波向在絕大多數時候幾乎相等，最大差異為 -102° ，發生於2016年10月27日0時，此時GNSS示性波高為0.42 m，僅此樣本之差異值超過1個象限，其餘差異皆在1個象限以內。其他3個GNSS組合之組體圖形狀皆與圖2極為相似， $en\eta$ 、 uvw 與 aPR 組合波向差異在 $\pm 15^\circ$ 以內之樣本分別佔了82.4%、84.8%與78.5%，可知兩波向在絕大多數時候幾乎相等。

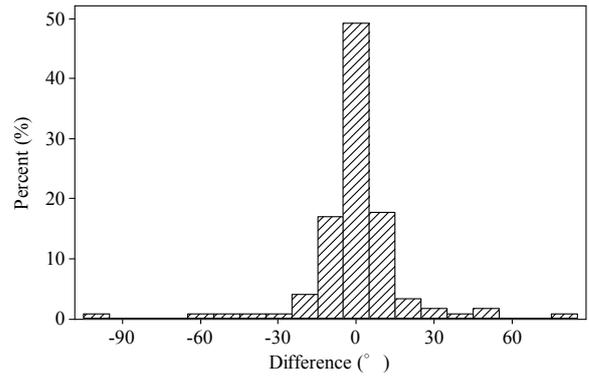


圖2 GNSS ηuv 組合之主頻平均波向與主波向差異組體圖

(2) 主頻之方向分布

圖3為GNSS主頻方向分布逐時變化圖，其中 $en\eta$ 與 ηuv 組合差異之最大值僅 11° ， uvw 與 ηuv 組合差異之最大值僅 5° ，可見3種組合在主頻之方向分布幾乎相等。

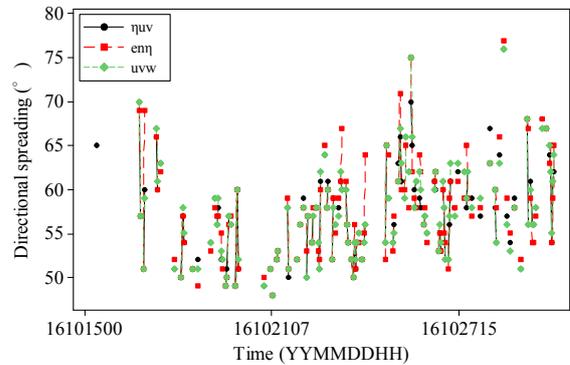


圖3 GNSS主頻方向分布逐時變化圖

(3) 主波向

圖4為GNSS主波向及差異逐時變化圖，從 uvw 與 ηuv 組合之主波向差異絕大部分在 $\pm 12^\circ$ 以內觀之，可知兩者極為一致。而 $en\eta$ 與 ηuv 組合之主波向差異亦有高達93.8%在 $\pm 30^\circ$ 以內，可知兩者亦非常接近。圖4中 $en\eta$ 與 ηuv 之最大差異為 169° ，發生於2016年10月26日0時，此時GNSS示性波高為0.37 m， ηuv 與 $en\eta$ 組合之主波向分別為 146° 與 315° ，應是26日0時 $en\eta$ 組合之主波向有所偏差，其原因與同一時間 $en\eta$ 組合之主頻平均波向偏差原因相同。

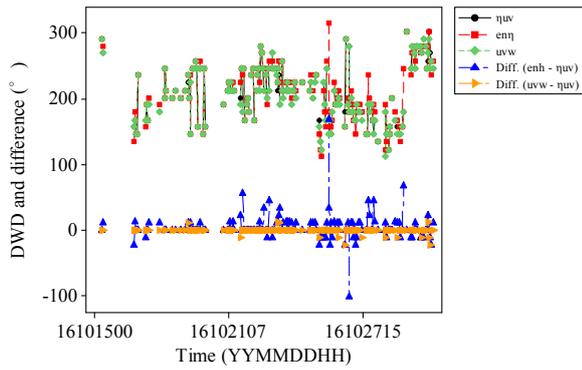


圖4 GNSS主波向及差異逐時變化圖

(4) 方向波譜

圖5左與右分別為GNSS enη與ηuv組合於2016年10月25日21時至26日2時之方向波譜，此期間以GNSS計算之示性波高皆小於1 m，以enη組合而言，可看出26日0時相較於前後時間方向波譜之來向變異太大，而右邊ηuv組合於26日0時之方向波譜較前後時間一致，可知應是26日0時enη組合之方向波譜有偏差。此外，本研究亦觀察同期間GNSS uvw組合與節電型ATC aPR組合之方向波譜，發現uvw組合於26日0時亦稍有偏差，而aPR組合於26日0時與1時均受到一維波譜低頻雜訊影響。依據前述討論，可知在4種組合中，在小波高情況下，以ηuv組合之方向波譜最佳。

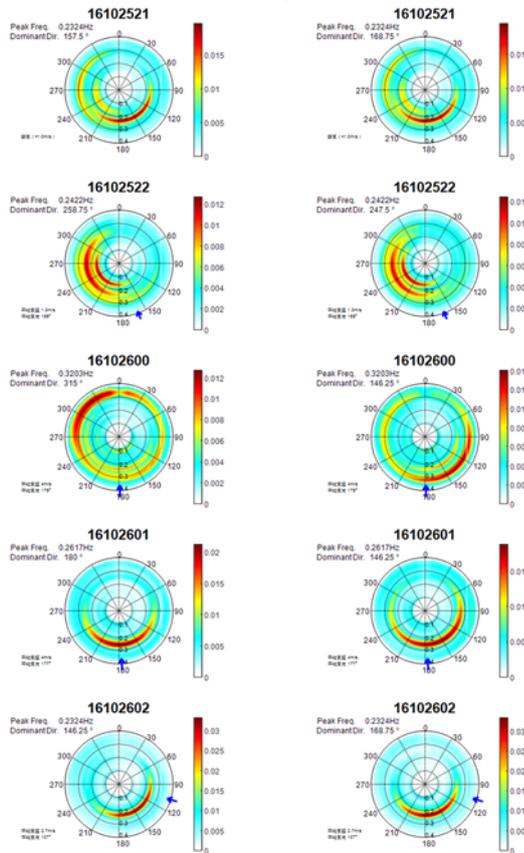


圖5 小波高期間之GNSS enη(左)與ηuv(右)組合方向波譜圖

圖6為海馬(HAIMA)颱風引起大波高期間之方向波譜，左、中與右分別為GNSS ηuv, enη與uvw組合之方向波譜，於2016年10月21日6時至11時期間，以GNSS計算之示性波高皆大於4.2 m，可看出3種組合之方向波譜皆互相一致，此外，觀察節電型ATC aPR組合之方向波譜，亦與GNSS 3種組合之方向波譜幾乎一樣。可知4種組合於大波高情況下之方向波譜皆非常良好。

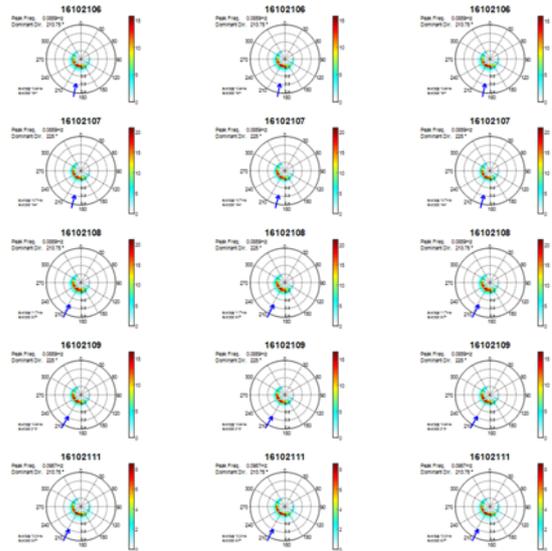


圖6 大波高期間之GNSS ηuv(左), enη(中)與uvw(右)組合方向波譜圖

2. 節電型 ATC 與 GNSS 之比較

(1) 主頻之平均波向

圖7為海馬(HAIMA)颱風期間，小琉球試驗節電型ATC aPR組合與GNSS ηuv組合之主頻平均波向，圖中並繪出aPR組合減去ηuv組合之主頻平均波向差異，可看出兩主頻平均波向之數值絕大部分幾乎相等。此外，從兩主頻平均波向差異之組體圖(如圖8)亦可看出，83.9%的差異值在±15° 以內，顯示aPR與ηuv組合所分析之主頻平均波向幾乎相等。

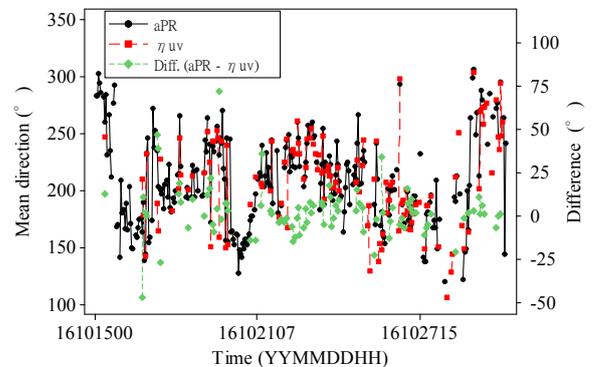


圖7 節電型ATC aPR與GNSS ηuv組合之主頻平均波向及差異逐時變化圖

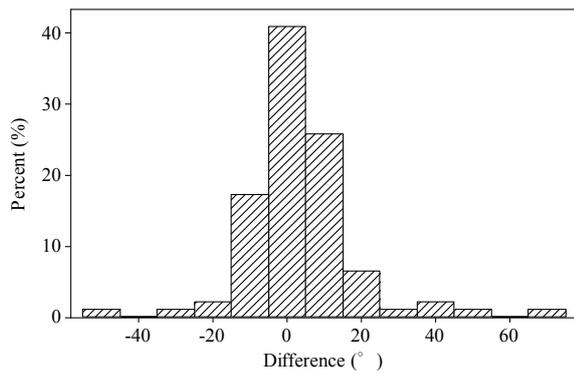


圖8 節電型ATC aPR與GNSS ηuv組合之主頻平均波向差異組體圖

(2) 主頻之方向分布

圖9為節電型ATC aPR組合與GNSS ηuv組合之主頻方向分布及差異逐時變化圖，由圖中aPR組合減去ηuv組合之主頻方向分布差異，可知兩組合之主頻方向分布一致。

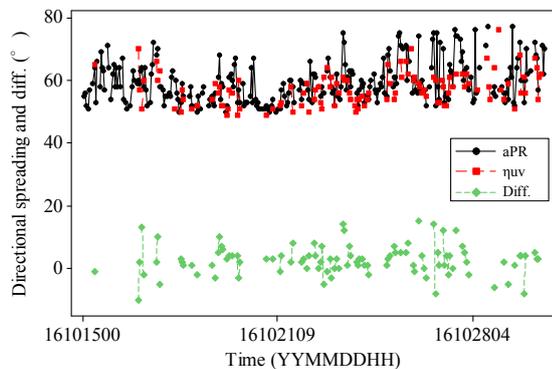


圖9 節電型ATC aPR與GNSS ηuv組合之主頻方向分布及差異逐時變化圖

四、結論

從以上試驗與分析，獲致以下成果：首先，GNSS ηuv, enη與uvw及節電型ATC aPR等4種組合之主頻平均波向絕大部分幾乎相等，惟極少數小波高時enη組合之主頻平均波向會有較大偏差。其次，以4種組合之分析結果觀之，主頻平均波向與主波向在絕大多數時候幾乎相等，僅極少數小波高時兩者差異超過1個象限。另外，GNSS ηuv, enη與uvw等3種組合在主頻之方向分布幾乎相等，而節電型ATC aPR組合之主頻波浪能量在方向上的分布寬度與ηuv組合一致。此外，GNSS ηuv, enη與uvw等3種組合之主波向

絕大部分幾乎相等，惟極少數小波高時enη組合之主波向會有較大偏差。

本研究亦發現，在小波高情況下，4種組合中以ηuv組合之方向波譜最佳，而在大波高情況下，4種組合之方向波譜皆非常良好。

謝誌

感謝交通部中央氣象局購買節電型ATC波浪儀與GNSS設備，提供小琉球浮標作為試驗平台，使本研究能順利進行。

參考文獻

1. 林寅斌、陳聖學、湯世燦、黃清哲, 2012: “GPS 浮標即時觀測潮位之研究”, 第34屆海洋工程研討會論文集, 745-749
2. 林寅斌、陳聖學、黃清哲、高家俊, 2014: “潮位與波浪觀測GPS浮標之研發”, 中央氣象局103年天氣分析與預報研討會, A8-18, 1-6
3. 林寅斌、范揚名、吳立中, 2015: “創新海岸防災觀測與預報科技”, *海洋及水下科技季刊* 第25卷, 第2期, 37-45
4. 林寅斌、黃清哲、陳聖學、高家俊、林燕璋、滕春慈, 2017: “資料浮標節電型波浪儀數據分析”, 中央氣象局106年天氣分析與預報研討會, A5-18, 1-6
5. Earle, M.D., 1996: *Nondirectional and directional wave data analysis procedures*. National Data Buoy Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, Stennis Space Center, Hancock County, MS, USA
6. Longuet-Higgins, M.S., Cartwright, D.E., and Smith, N.D., 1963: “Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy”, *Ocean Wave Spectra*, Prentice Hall, 111-136
7. 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
8. Riedel, J.S., & Healey, A.J., 2005: “Estimation of directional wave spectra from an autonomous underwater vehicle (AUV)”, *NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA CENTER FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE RESEARCH*, 1-10
9. Work, P.A., 2008: “Nearshore directional wave measurements by surface-following buoy and acoustic Doppler current profile”, *Ocean Engineering*, 35(8-9), 727-737