

導航級 GNSS 觀測波浪之研究

林演斌¹ 陳聖學¹ 黃清哲¹ 王國樑² 馬家驊²

¹國立成功大學近海水文中心

²經濟部水利署水文技術組

摘要

在近岸海域，亟需能克服或減輕被漂沙掩埋、流失與成本過高等缺點之波浪觀測系統，由於全球衛星導航系統(global navigation satellite system, GNSS)定位技術日益精進且接收器成本大幅下降，本團隊進行導航級 GNSS 觀測海洋波浪之技術研究。本研究透過實驗，並與海上資料浮標既有之波浪資料比較，以檢驗導航級 GNSS 觀測波高、週期、主波向(dominant wave direction, DWD)、一維波譜與方向波譜等資料之正確度。結果顯示，導航級 GNSS 不論在實驗室或現場海域，其量測結果皆非常良好。

關鍵詞：全球衛星導航系統、一維波譜、方向波譜

Study on ocean waves observation technology by using a navigation-grade GNSS receiver

Yen-Pin Lin* Sheng-Hsueh Chen** Ching-Jer Huang*** Kuo-Liang Wang****
Jia-Lin Ma*****

* Head, R&D department, Coastal Ocean Monitoring Center (COMC), National Cheng Kung University (NCKU)

** QC engineer, COMC, NCKU

*** Director/Professor, COMC/Department of Hydraulics and Ocean Engineering, NCKU

**** Director, Hydrology division, Water Resources Agency (WRA), Ministry of Economic Affairs (MOEA)

***** Section chief, Hydrology division, WRA, MOEA

ABSTRACT

In order to mitigate problems, such as sand covering, drift, and high costs, for existing ocean waves observation systems in nearshore areas, it is quite necessary to develop an innovative technology for ocean waves observation. According to improvement in accuracy and cost down for the GNSS (global navigation satellite system), we developed the ocean waves observation technology by utilizing a navigation-grade GNSS receiver and the SBAS (satellite based augmentation system) service. The results demonstrated that the significant wave heights, the zero-crossing periods, the dominant wave directions (DWD), the one-dimensional spectra, and the directional spectra were nearly identical to those from the existing ATC (accelerometer-tilt-compass) wave sensor on the data buoy.

Keywords: GNSS; One-dimensional spectrum; Directional spectrum

一、前言

近岸結構物的設計需波浪等資料，收集夠長時間的資料，可作為分析設計波高之依據，此外，在

近岸海域，海堤前的波高、週期與波向，是決定潮升高度與海堤安全的重要因子，可見近岸實測波浪資料之重要性。常見在近岸觀測波浪方法，主要有底碇式的音波式儀器與壓力計，以及資料浮標，然

而，底碇式儀器萬一流失或被漂沙掩埋，將使資料欠缺或品質不良，此為其隱憂。另外，較大型的資料浮標(直徑大於 2.5 m)流失機率很小，且波浪儀安裝在海表面，無遭漂砂掩埋問題，適用於長期監測，但若短期間用在近岸海域觀測波浪，則顯得大材小用。綜上所述，在近岸海域，亟需能克服或減輕上述缺點之波浪觀測系統，使用更小型資料浮標為極佳的解決方案，其中波浪感測儀器之成本與正確度，為解決問題之關鍵。由於衛星定位技術蓬勃發展，加上定位晶片大量生產，使得全球定位系統(Global Positioning System, GPS)與全球衛星導航系統(global navigation satellite system, GNSS)日益普及且成本下降，本研究進行導航級 GNSS 觀測海洋波浪之技術開發。

有關 GPS 與 GNSS 浮標觀測波浪之研究，包含 Harigae et al. (2005), Doong et al. (2011), Herbers et al. (2012)與 Lin et al. (2017)等，皆已證實觀測波浪之效果。然而，Harigae et al. (2005)雖使用低成本 GPS 接收器，但未說明所使用的硬體與高通濾波器(high pass filter)軟體相關資訊，而 Doong et al. (2011)所使用的 GPS 接收器之成本不低，Herbers et al. (2012)雖使用具接收 SBAS (satellite based augmentation system)輔助衛星訊號之低成本 GPS 接收器，但在臺灣海域，SBAS 輔助衛星訊號之涵蓋時間較先進國家延遲，因此以往未開發 SBAS GPS 測波技術，而 Lin et al. (2017)雖利用 VBS-RTK (virtual base station real-time kinematics)定位技術獲得公分等級之定位成果，並據以分析潮位與波浪，但需使用測量等級 GNSS，價位較前述研究所採用的更高。

二、研究方法

本研究運用之研究方法主要有 SBAS 技術、反移動平均高通濾波器軟體與方向波譜(directional spectrum)分析等，說明如下：

2.1 SBAS

SBAS 為一種輔助 GNSS 之衛星系統，架構包含太空、地面、支援與使用者共 4 個分段。其中太空段為地球同步衛星(GEO, geosynchronous satellite)，負責傳送類似 GPS 之載波訊號；地面段負責供應 SBAS 航行訊息；使用者段為使用者用以

接收 SBAS 訊號之接收器。SBAS 衛星傳送距離訊號(ranging signals)、差分修正(differential corrections)訊號與附加參數共 3 種訊號。其中距離訊號為類似 GPS 的 L1 頻段訊號，用以輔助使用者增加可用的衛星數；差分修正主要針對既存的 GPS、GLONASS 與 GEO 的導航服務作修正，以增進其效能，修正內容包含衛星軌道(orbits)與時表(clocks)誤差，與估計訊號穿透電離層而造成延遲的資訊；附加參數係為告知使用者關於 GPS、GLONASS 與 GEO 之安全導航可用性資訊(https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals)。

透過接收 SBAS 廣播輔助衛星訊號，讓使用者的單一 GNSS 接收器免費修正定位成果，定位精度從一般單機定位的 20 m 提昇至 1.5 - 2 m，此亦屬差分式的(differential)即時定位解算，使用者不需自建基準站與即時通訊，亦不需上網連線至陸地上的收費服務系統，因此具有不受距離限制與低成本的優勢。由於日本建置的 SBAS 服務- MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)之輔助衛星廣播訊號已涵蓋臺灣，加上能接收 MSAS 的導航級 GNSS 接收器成本極低，使得開發適用於臺灣海域的低成本 GNSS 測波技術條件已完備，因此進行本研究。

2.2 實驗布置

首先在實驗場以動態旋轉方式檢測 GNSS 量測波高、週期與主波向(dominant wave direction, DWD)之正確度，採用之動態率定機具有半徑為 1 m 之懸臂與馬達，實驗時將 GNSS 安置於懸臂末端，並以馬達控制，使懸臂僅能以固定頻率旋轉。此布置所代表之波高為 2 m，週期可由碼表量測旋轉數圈之平均而得，而波浪來向由動態率定機擺設坐向決定。

此外，現場實驗於蘇澳港北方外海的蘇澳浮標進行，浮標外觀如圖 1，水深約為 20 m，距最近的岸邊約 2.1 km，圖 1 中加速度-傾角-電羅經(accelerometer-tilt-compass, ATC)為浮標既有作業化觀測使用之波浪儀。GNSS 與 ATC 之資料取樣頻率均為 2 Hz，取樣期間為每小時的 50 min 起，共 10 min。本研究採用之試驗資料期間為 2019 年 8 月 19 日 14 時至 30 日 15 時，每小時觀測 1 筆，此期間有

白鹿颱風引起波浪之影響。

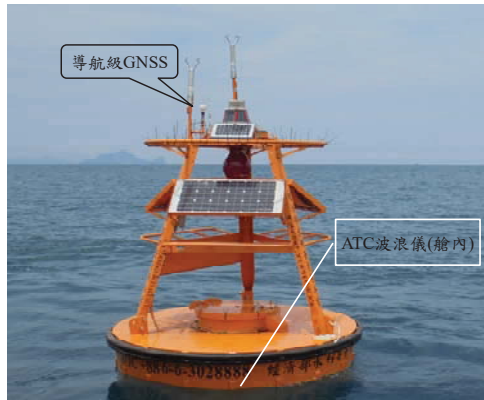


圖 1 波浪儀安裝位置圖

2.3 反移動平均高通濾波器

導航級 GNSS 搭配 SBAS 定位服務之精度不足，無法直接據以分析波浪，觀察其所獲得之高度 (height) 時序列除了較高頻的波浪所引起之高度變化外，亦包含有低頻變動，且在取樣期間內，此低頻變化幅度不小於高頻，此低頻擾動需被濾除，始能獲得波浪資料。由於原始資料時序列經過移動平均 (moving average)，能消除高頻訊號，處理後時序列變得平滑，移動平均為一種低通濾波器 (low pass filter)，反之，將原始資料時序列減去其移動平均，即為一種高通濾波器 (high pass filter)，稱之為反移動平均高通濾波器。將 GNSS 高度時序列資料經過此高通濾波器處理，並分析波浪之方法，可見諸於 Herbers et al. (2012) 之研究。

2.4 方向波譜

導航級 GNSS 之方向波譜以式(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) 之重新推導，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、東西向及南北向水粒子運動速度。

三、結果與討論

3.1 動態實驗分析結果

本研究透過動態實驗，以檢驗運用反移動平均高通濾波器之效果。兩次實驗設定之波高、週期與 DWD 如表 1 所示，動態量測結果亦如表 1，可知在單一頻率情況下，兩次實驗 $H_{1/3}$ 之誤差分別為 +12 (6%) 與 -22 cm (-11%)，可看出運用濾波器之效果良好，能大幅降低低頻誤差。而兩實驗之週期量測結果亦均十分良好。表中之設定與量測 DWD 均以磁北為基準，順時針遞增， 0° 、 90° 、 180° 與 270° 分別代表波浪來向為北、東、南與西方，經分析 DWD 誤差為 $+10^\circ$ ，結果亦良好。綜上所述，可知運用反移動平均高通濾波器於導航級 GNSS 所量測之原始資料後，再進行分析，不論是波高、週期或 DWD，皆能獲得良好結果。

表 1 GNSS 動態測試結果表

Item		Case I	Case II
$H_{1/3}$ (cm)	設定	200	200
	量測	212	178
$T_{1/3}$ (s)	設定	3.7	7.6
	量測	3.7	7.6
DWD ($^\circ$)	設定	174	174
	量測	184	184

3.2 波浪統計值與特性

本研究試驗期間 ATC 與 GNSS 之示性波高、平均週期與 DWD 分別如圖 2 - 4 所示。

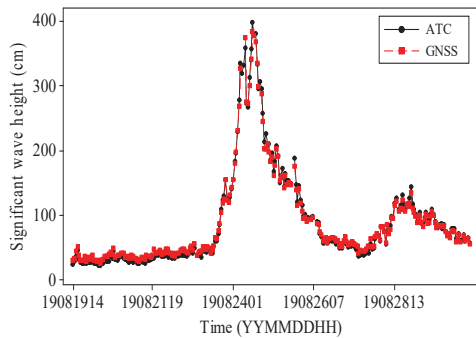


圖 2 逐時示性波高比較圖

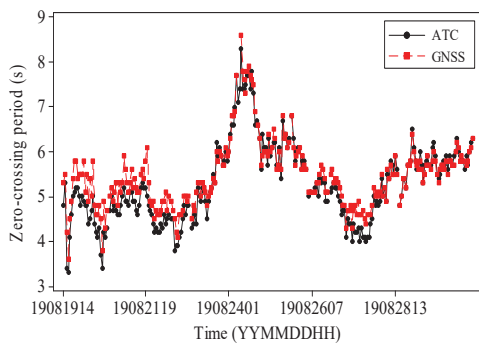


圖 3 逐時平均週期比較圖

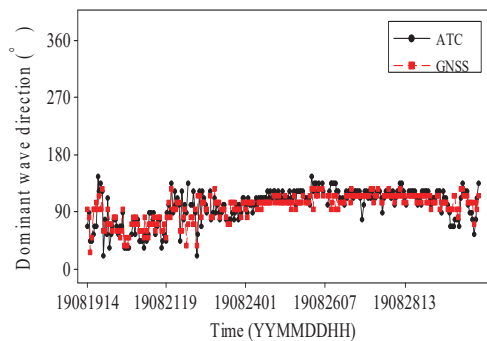


圖 4 逐時 DWD 比較圖

由圖 2 資料計算發現，示性波高平均絕對誤差為 4.6 cm，平均絕對誤差百分比為 8.5%，當 ATC 示性波高 ≥ 0.5 m 時，兩誤差指標分別為 4.1 cm 與 3.6%，顯示 GNSS 觀測波高結果極為良好。此外，由圖 3 可知，平均週期之兩誤差指標分別為 0.2 sec 與 5.0%，顯示 GNSS 觀測平均週期結果亦極為良好。圖 4 中 DWD 以磁北為基準，順時針遞增， 0° 、 90° 、 180° 與 270° 分別代表波浪來向為北、東、南與西方，由圖 4 可知，DWD 之平均絕對誤

差為 12.7° ，此可能與分析解析度(為 11.25°)較大有關，但仍顯示 GNSS 觀測 DWD 結果良好。綜上所述，可證實導航級 GNSS 直到示性波高近於 4 m 情況下，觀測波浪結果皆良好，至於更大波高之觀測結果，則有待收集更多現場資料驗證。

3.3 一維波譜

觀察多筆 ATC 與 GNSS 之一維波譜，發現 GNSS 與 ATC 一維波譜形狀極為相似，選取 ATC 波高 ≥ 1 m 資料觀察，以圖 5 - 6 代表，發現隨著頻率增大，GNSS 能量密度時而較 ATC 能量密度稍大與稍小，原因可能是反移動平均高通濾波器之特性所致，而 GNSS 與 ATC 之尖峰頻率相等。整體而言，GNSS 與 ATC 之一維波譜形狀仍極為相似。圖 7 為 ATC 波高 < 0.5 m 之一維波譜比較，兩者比較結果與前述波高較大之比較結果一致，惟圖 7 中，GNSS 多出一些低頻能量。

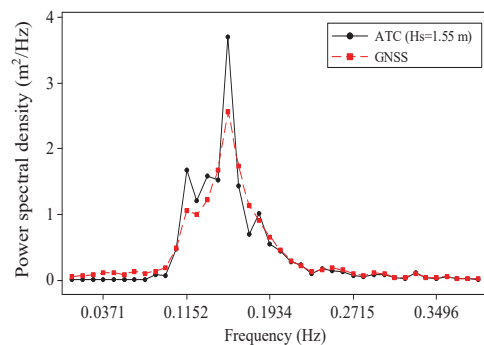


圖 5 2019 年 8 月 23 日 20 時一維波譜

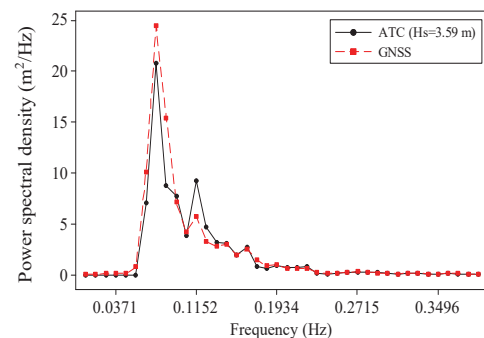


圖 6 2019 年 8 月 24 日 9 時一維波譜

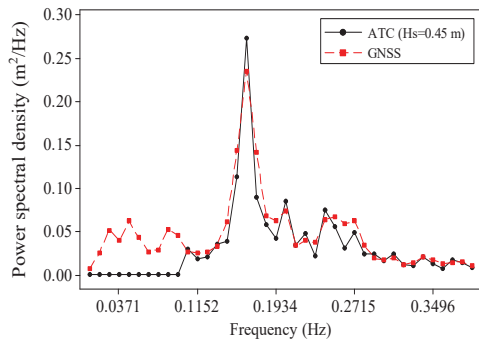


圖 7 2019 年 8 月 22 日 21 時一維波譜

3.4 方向波譜

圖 8, 9 分別為 2019 年 8 月 24 日 9 時 ATC 與 GNSS 方向波譜，圖中徑向刻度代表頻率，單位為 Hz，而切線方向刻度為波浪來向， 0° 、 90° 、 180° 與 270° 分別代表波浪自北、東、南與西方而來，圖 8, 9 中之 0° 分別代表磁北(magnetic north)與真北(true north)，在蘇澳浮標海域，磁北約略在真北的逆時針方向 4° ，而圖中顏色深淺代表波浪能量密度之大小，數值大小參照右方顏色柱，此外，實線箭號代表 DWD，虛線箭號代表平均風向。可看出尖峰頻率均為 0.076 Hz ，且 GNSS 較 ATC 之尖峰能量密度稍大，其原因為在圖 6 一維波譜中，GNSS 較 ATC 之尖峰能量密度稍大，在一維波譜乘上方向分布函數後，使得方向波譜之尖峰處獲得較大能量密度。不過，以整體圖形而言，GNSS 與 ATC 波浪能量在頻率與方向之分布均相當一致，觀察其他時刻之方向波譜圖形，包含 22 日 21 時與 23 日 20 時，亦有 GNSS 與 ATC 兩者極為相似情形。綜上所述，證實導航級 GNSS 能獲得正確之方向波譜。

除此之外，發現圖 8, 9 中 ATC 在各方向皆存在微小波浪能量，而 GNSS 無此現象，較為合理，觀察 22 日 21 時與 23 日 20 時之方向波譜圖形，亦有此情形。此可能是採用 GNSS 訊號分析方向波譜之優勢，不過 ATC 各方的能量雖存在但非常微小，影響不大。

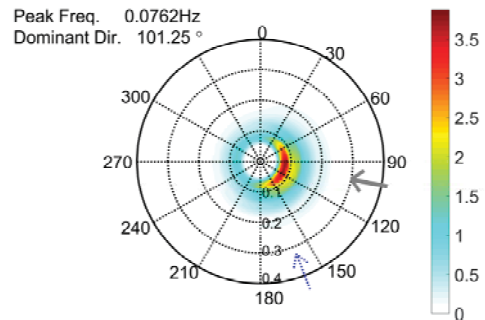


圖 8 2019 年 8 月 24 日 9 時 ATC 方向波譜

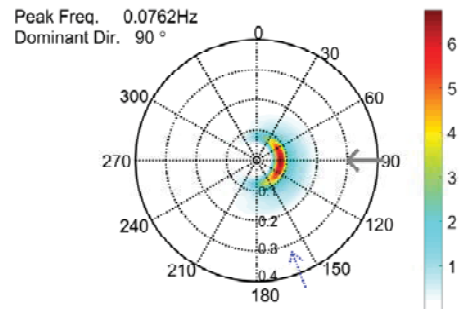


圖 9 2019 年 8 月 24 日 9 時 GNSS 方向波譜

四、結論

本研究在分析數據與比較後，獲致結論如后：

- (1) 依導航級 GNSS 量測模擬單頻波浪實驗之分析結果顯示，不論是波高、週期或主波向，皆能獲得良好結果。
- (2) 現場海域示性波高截至近 4 m 為止，導航級 GNSS 觀測波高、週期與主波向之結果良好。
- (3) 整體而言，GNSS 與既有加速度-傾角-電羅經波浪儀之一維波譜形狀極為相似。
- (4) GNSS 與既有加速度-傾角-電羅經波浪儀之方向波譜形狀極為相似。

謝誌

導航級 GNSS 觀測波浪現場實驗係於經濟部水利署蘇澳浮標進行，並引用該浮標既有之作業化波浪觀測資料作比較，使本研究能順利進行，僅此致謝。

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. Herbers, T., Jessen, P., Janssen, T., Colbert, D., MacMahan, J. (2012) Observing Ocean Surface Waves with GPS-tracked Buoys, *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 29, 944-959.
 4. 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.
 5. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals (accessed on 10 October 2019).