

導航級 GNSS 測波技術開發與微型測波浮球之運用

林演斌¹ 施孟憲¹ 陳聖學¹ 莊宗憲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，亟需能避免或減輕被漂沙掩埋、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)定位精度日益提昇且成本大幅下降，本團隊延續進行導航級 GNSS 觀測海洋波浪之研究，利用 4 座資料浮標資料，綜合分析導航級 GNSS 觀測波高、週期與主波向(dominant wave direction, DWD)之誤差，結果顯示導航級 GNSS 量測波浪誤差尚可接受，能夠作為觀測波浪儀器選項。據此開發直徑 0.42 m 的微型測波浮球，能即時回傳資料，適用於近岸淺水區域短期觀測波浪。

關鍵詞：全球衛星導航系統、一維波譜、方向波譜、微型測波浮球

Development of a mini wave buoy by using the navigation-grade GNSS

Yen-Pin Lin* Mong-Hsien Shih** Sheng-Hsueh Chen** Zong-Sian Jhuang***
Ching-Jer Huang**** Kuo-Liang Wang***** Jia-Lin Ma*****

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

** Engineer, COMC, NCKU

*** Technician, 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 continued to develop the ocean waves observation technology by utilizing navigation-grade GNSS receives on 4 data buoys. The results demonstrated that the significant wave heights, the zero-crossing periods, and the dominant wave directions (DWD) obtained from navigation-grade GNSS receivers were acceptable. The navigation-grade GNSS receive is capable of being an option of wave sensors. Thus, we continue to develop a real-time mini wave buoy with a diameter of 0.42 m for measuring ocean waves in nearshore areas.

Keywords: Global navigation satellite system (GNSS); One-dimensional spectrum; Directional spectrum; Mini wave buoy

一、前言

近岸結構物的設計需波浪等資料，收集夠長期間的資料，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，以及資料浮標與波浪浮球(wave rider)，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。而雖然較大型的資料浮標(直徑大於 2.5 m)流失機率很小，且波浪儀安裝在海表面，無遭漂沙掩埋問題，適用於長期監測，但短期間用在近岸海域觀測波浪顯得大材小用。而進口波浪浮球成本不低且不易擴充功能。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，自行開發更小型資料浮標或浮球為極佳的解決方案，其中波浪感測儀器之成本與正確度，為達成目標之關鍵。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)精度提昇且成本下降，導航級 GNSS 已能作為觀測海洋波浪使用。

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), Lin et al. (2017), 林等(2019)與 Lin et al. (2020)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，被 SBAS 輔助衛星訊號涵蓋之時間較先進國家延遲，因此以往無法使用 SBAS GPS 測波，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 RTK GNSS，價位較前述研究所採用的更高。

林等(2019)開始利用作業化資料浮標上定位用的導航級 GNSS 原始資料分析波浪，證實導航級

GNSS 不論在實驗室或現場海域，其量測結果均非常良好，然而未進一步應用在更小型資料浮標或浮球上。Lin et al. (2020)研究以 RTK GNSS 多種不同原始資料組合分析方向波譜，發現不論波高大小，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，或是以東西向水粒子運動速度、南北向水粒子運動速度與垂直向水粒子運動速度組合之計算結果較以東西向位移、南北向位移與垂直向位移組合為佳，以 3 方向位移計算方向波譜結果較差之原因為在小波高情況下，位移之訊噪比較小，使得方向波譜有時失準。

本研究延續林等(2019)成果，除廣為收集更多測站資料，以掌握導航級 GNSS 量測波浪誤差特性之外，亦著手開發微型測波浮球，以做為日後在近岸淺水海域觀測波浪使用。

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 衛星廣播距離訊號(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(orbital)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，使用者不需自建傳統差分定位所需之基準站與即時通訊，亦不需像 VBS-RTK 定位般，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，使得開發與應用導航級 GNSS 測波技術之條件已具備。

2.2 反移動平均高通濾波器

Lin et al. (2017)利用 RTK GNSS 量測潮位與波浪，RTK GNSS 量測平面與垂直位移精度為 cm 等級，能直接分析波浪。雖然導航級 GNSS 量測平面位移精度為 2.5 m，速度精度為 0.05 m/s，量測垂直位移精度又較平面位移精度為差，難以直接分析波浪，但是觀察其所獲得之高度(height)時序列，除了包含較高頻的波浪所引起之高度變化外，亦包含低頻擾動，且其幅度不小於高頻，若能濾除則可獲得波浪資料。

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。本研究將導航級 GNSS 量測之高度(即為垂直向位移)時序列資料經過此高通濾波器處理，再分析波浪，其方法可參照 Herbers et al. (2012)之研究。

2.3 方向波譜

為確保導航級 GNSS 在大、小波高情況下量測方向波譜均能獲得最佳結果，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：

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

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

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：

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

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

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

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

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。

2.4 實驗布置

現場實驗資料來自於水利署蘇澳、台東、金門與彌陀浮標，水深分別為 23 m、30 m、25 m 與 23 m，加速度-傾角-電羅經(accelerometer-tilt-compass, ATC)與導航級 GNSS 兩儀器分別安裝在資料浮標，位置如圖 1 所示，圖 1 中 ATC 為浮標既有作業化觀測使用之波浪儀，而導航級 GNSS 為資料浮標上之定位用途儀器，本研究額外擷取其訊號作為分析波浪使用。導航級 GNSS 與 ATC 之資料取樣頻率均為 2 Hz，每筆資料之取樣期間為每小時的 50 min 起，共 10 min，每小時觀測 1 筆。為使研究分析資料涵蓋各種不同海域與波高，本研究選取之試驗資料期間在蘇澳、台東、金門與彌陀浮標分別為 2020 年的 10/04 ~ 10/14、10/03 ~ 10/12、08/10 ~ 08/12、08/01 ~ 08/31。

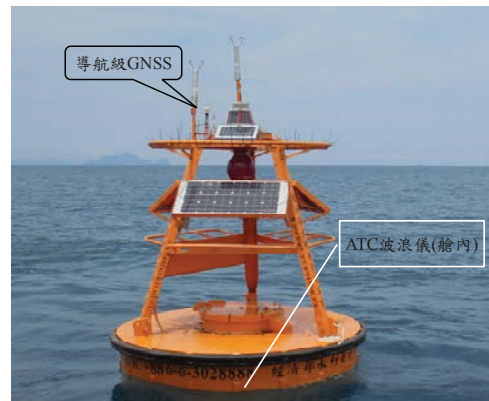


圖 1 ATC 與導航級 GNSS 安裝位置圖

三、結果與討論

3.1 波浪誤差分析

為增加統計結果之代表性，本研究將蘇澳、台東、金門與彌陀浮標之資料一起納入分析。由表 1 統計資料發現，ATC 示性波高小於 50 cm 之樣本數為 117，平均絕對誤差(MAE, mean absolute error)與平均絕對誤差百分比(MAPE, mean absolute percent error)分別為 8.3 cm 與 21.6%，顯示在波高小之情況下，導航級 GNSS 量測示性波高誤差百分比比較大，原因為計算百分比的分母(即為 ATC 示性波高)數值小，以 MAE 僅 8.3 cm 而言，誤差尚在可接受範圍。而當 ATC 示性波高大於等於 50 cm 時，樣本數為 772，導航級 GNSS 量測之 MAE 與 MAPE 分別為 8.7 cm 與 6.6%，顯示波高在 50 cm 以上情況下，導航級 GNSS 量測示性波高結果亦尚可接受。

表 1 中，當 ATC 示性波高資料落在小於 50 cm, 50 - 100 cm, 100 - 200 cm, 200 - 300 cm 與 300 cm 以上共 5 個級距分組時，樣本數分別為 117, 223, 401, 134 與 14，僅 300 cm 以上級距分組之樣本數偏少。可看出 5 個級距分組之平均誤差(ME, mean error)分別為 8.3, 6.0, -2.6, -2.8 與 -13.8 cm，顯示平均而言導航級 GNSS 量測示性波高在波高小於 100 cm 情況下較 ATC 稍微偏大，而在波高在 100 cm 以上情況下較 ATC 稍微偏小。

以導航級 GNSS 示性波高相對於 ATC 之偏離量而言，上述 5 個級距分組之 MAE 分別為 8.3, 6.5, 7.0, 13.9 與 39.8 cm，顯示導航級 GNSS 量測示性波高誤差在波高為 200 cm 以上情況下微增，不過尚在可接受範圍。5 個級距分組之 MAPE 分別為 21.6, 10.1, 4.8, 6.0 與 10.0，顯示導航級 GNSS 量測示性波高誤差百分比隨著示性波高變大過程之變化趨勢為先減少再微增，以 100 - 200 cm 與 200 - 300 cm 兩個級距分組誤差最小。

表 1 示性波高誤差分析表

示性波高範圍(cm)	<50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	≥ 300	≥ 500
樣本數	117	223	401	134	14	772
ME(cm)	8.3	6.0	-2.6	-2.8	-13.8	-0.3
MAE(cm)	8.3	6.5	7.0	13.9	39.8	8.7
MAPE(%)	21.6	10.1	4.8	6.0	10.0	6.6

由表 2 統計資料發現，當 ATC 示性波高小於 50 cm 時，平均週期之 MAE 與 MAPE 分別為 0.26 sec 與 5.9%，顯示在波高小之情況下，導航級 GNSS 量測平均週期誤差尚可接受。而當 ATC 示性波高大於等於 50 cm 時，導航級 GNSS 量測之 MAE 與 MAPE 分別為 0.18 sec 與 3.0%，顯示波高在 50 cm 以上情況下，導航級 GNSS 量測平均週期結果良好。此外，表 2 亦顯示 5 個級距分組之 ME, MAE 與 MAPE 不隨示性波高變大而明顯變化。

表 2 平均週期誤差分析表

示性波高範圍(cm)	<50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	≥ 300	≥ 500
樣本數	117	223	401	134	14	772
ME(sec)	0.24	0.05	-0.03	0.11	0.11	0.02
MAE(sec)	0.26	0.17	0.16	0.26	0.31	0.18
MAPE(%)	5.9	3.4	2.6	3.6	3.7	3.0

由表 3 統計資料發現，當 ATC 示性波高小於 50 cm 時，導航級 GNSS 量測主波向(DWD, dominant wave direction)之 MAE 與 MAPE 分別為 19.5° 與 7.4%，當 ATC 示性波高大於等於 50 cm 時，導航級 GNSS 量測主波向之 MAE 與 MAPE 分別為 17.7° 與 15.5%，顯示導航級 GNSS 量測主波向結果尚可接受。表 3 中各級距分組之 ME 皆為負值，顯示平均而言，導航級 GNSS 量測之主波向較 ATC 稍微偏小。此外，表 3 亦顯示 5 個級距分組之 ME, MAE 與 MAPE 不隨示性波高變大而明顯變化。

表 3 主波向誤差分析表

示性波高範圍(cm)	<50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	≥ 300	≥ 500
樣本數	117	223	401	134	14	772
ME(°)	-8.2	-7.5	-13.5	-19.0	-1.6	-12.5
MAE(°)	19.5	13.3	17.9	25.0	11.4	17.7
MAPE(%)	7.4	8.5	16.1	25.4	16.0	15.5

綜合上述討論結果，導航級 GNSS 量測示性波高、平均週期與主波向之結果尚可接受，因此導航級 GNSS 能夠作為觀測波浪儀器選項，在作法上，可如圖 1 的方式，與 ATC 波浪儀並行使用，作為資料浮標上的備援波浪儀，而另一種作法，則於下一節說明。

3.2 微型測波浮球設計

本研究並進一步利用導航級 GNSS 進行微型測

波浮球開發，微型測波浮球本體是採用市面上販售的漁業用浮球，直徑為 42 cm，耐水壓 300 m，可提供 33.8 kg 的浮力，上方並搭配太陽能警示燈。內部搭載導航級 GNSS 測波系統、通訊模組(4G)與天線、鋰電池與無線充電模組，詳細組成架構示意圖如圖 2 所示。錨繫設計是採用不鏽鋼索搭配恰克和轉環，中間串接小型浮球，尾端與底床錨碇塊連結，詳細錨繫設計示意圖如圖 3 所示。

微型測波浮球之設計概念為可量測水深為 20 m 內的近岸淺水海域，最淺可達 5 m 水深，能運用於河口或近岸淺水區域短期測波使用。由於其體積小且重量輕，使得海上布放、更換與回收更加簡易。而使用後取回之微型測波浮球可以透過無線充電技術充電，不需拆解浮球，能保持浮球的完整與防水功能，以便下一次觀測使用。微型測波浮球的觀測項目為波高、週期及波向，每小時即時回傳 1 筆資料，可以連續觀測達 1 個月以上。此外，亦具備擴充功能，可以增加潮位、海流、濁度/泥沙濃度與水溫的量測。



圖 2 微型測波浮球外觀與組成架構示意圖

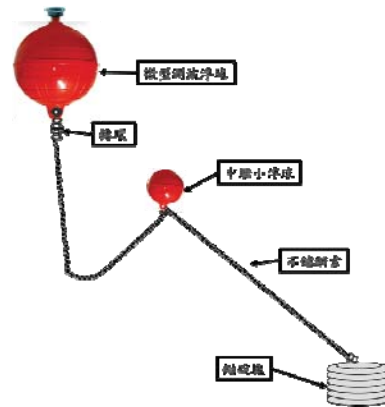


圖 3 微型測波浮球錨繫設計示意圖

四、結論

本研究在分析 4 處現場實驗數據與比較後，獲致結論如后：導航級 GNSS 量測示性波高、平均週期與主波向之結果尚可接受，能夠作為觀測波浪儀器選項。

謝誌

本研究係額外擷取經濟部水利署蘇澳、台東、金門與彌陀浮標上定位用的導航級 GNSS 原始資料進行，並利用既有作業化波浪儀原始資料作分析比較，使本研究能順利進行，僅此致謝。

參考文獻

1. 林演斌、陳聖學、黃清哲、王國樑、馬家驊(2019) 導航級 GNSS 觀測波浪之研究，第 41 屆海洋工程研討會論文集，第 412 - 417 頁。
2. Doong, D.-J., Lee, B.-C., Kao, C.C. (2011) Wave Measurements Using GPS Velocity Signals, *Sensors*, 11(1), 1043-1058.
3. 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.
4. 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.
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. 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.
 7. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals (accessed on 10 October 2019).