

資料浮標節電型波浪儀數據分析

林演斌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

中央氣象局建置的長期作業化海氣象資料浮標有9站，從1997年起執行觀測任務；加上觀光局與水利署所建置的資料浮標，目前國內海氣象資料浮標共17站。觀測資料具多重的應用價值，包含波浪湧浪預測、船舶航行、漁業、海岸變遷模擬等。資料浮標系統由國立成功大學近海水文中心於1997年研發成功，持續使用至今。由於觀測項目需求陸續增加，使得節電重要性提高。為更精進資料浮標系統節電，本研究從耗電功率相對較大的作業化波浪儀著手，雖在市場上已出現節電型波浪儀產品，耗電功率僅約為作業化波浪儀的1/6，但其觀測資料之正確度未被探討。本研究在小琉球浮標再安裝2個波浪儀，包含節電型波浪儀與全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)，其中GNSS能直接量測獲得公分等級的海面水位高度數據，具有相當高之可信度，本研究以GNSS驗證節電型波浪儀觀測資料，研究期間最大的示性波高(significant wave height)近7 m，分析結果顯示，大部分節電型波浪儀之示性波高、平均週期(zero-crossing period)、尖峰週期(peak period)與主波向(dominant wave direction)皆與GNSS波浪資料相當一致，其量測效果在波高愈大時愈佳，一維波譜與方向波譜亦然。此外，兩者水位時序列變化趨勢也相當一致。綜合而言，目前規格之節電型波浪儀已能應用，惟須注意小波高情況下，偶而出現的偏差。

關鍵字：資料浮標、節電型波浪儀、GNSS

一、前言

國內17座長期的資料浮標站從1997年起持續使用至今，由於各種觀測項目需求陸續增加，使得資料浮標上掛載之儀器日益增多，加上觀測期間的延長，耗電增大使得節電重要性逐漸提高。為此，有許多可進行的研究方向，本研究之目的為根據波浪資料的驗證結果，確認應用節電型波浪儀於現場觀測波浪之可行性。

近年來，開始有學者發展GPS (Global Positioning System)浮標來觀測波浪，如Harigae et al. [5], Waseda et al. [9], Doong et al. [4], Herbers et al. [6], Joodaki et al. [7]。林等人[1, 2, 3]及Lin et al. [8]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，獲得公分等級精度之海面水位高度資料，並建立以GNSS量測數據為基礎之波浪方向波譜分析流程。由於其直接量測之特性，使得分析此水位所得之波浪資料[如：示性波高(significant wave height) H_s 、平均週期(zero-crossing period) T_z 、尖峰

週期(peak period) T_p 及主波向(dominant wave direction) DWD] 可用來驗證 accelerometer-tilt-compass (ATC)種類之節電型波浪儀所觀測波浪資料的準確度。

二、研究方法

本研究採用之GNSS浮標量測工作原理與波浪資料分析方法等，說明如下：

(一) GNSS 浮標量測工作原理

本研究所發展的GNSS浮標主要係於國立成功大學近海水文中心現有的作業化海氣象浮標上加裝GNSS antenna (天線)接收GPS及GLONASS衛星訊號，進行GNSS天線所在位置座標的解算，參閱圖1。GNSS浮標需要鄰近的位置觀測數據作為修正定位誤差之用，以獲致公分等級的定位成果。鄰近的位置觀測數據來源分為實體與虛擬兩種，GNSS浮標採用虛擬的位置觀測數據，其工作原理為：首先，內政部國土測繪中心所建置之VBS-RTK控制中心每秒鐘接收衛星定位基準網之觀測資料，此衛星定位基準網由設置在臺灣本島與離島的78處衛星基準站組成。在VBS-RTK控制中心內部，包含有e-GNSS即時動態定位系統軟體，為美國Trimble公司研發之

progressive infrastructure via overlaid technology (PIVOT)軟體，該軟體利用各處所傳來觀測資料內含之L1、L2雙頻載波相位(carrier phase)觀測量，計算多路徑(multipath)誤差、電離層(ionosphere)誤差、對流層(troposphere)誤差、星曆(ephemeris)誤差及整數週波未定值(integer ambiguity)，並建立誤差模型(model)。接下來，GNSS浮標在觀測期間內，每秒鐘亦接收衛星訊號並計算概略位置資料，再將此概略位置資料以特定格式傳送至VBS-RTK控制中心。之後，VBS-RTK控制中心利用上述誤差模型與GNSS浮標傳來的概略位置資料，產生最接近GNSS浮標之虛擬位置觀測數據，並以特定格式回饋至GNSS浮標，以作為GNSS浮標進行公分等級定位之用。最後，GNSS浮標利用本身接收之雙頻觀測數據與VBS-RTK控制中心回饋之虛擬位置觀測數據，解算整數週波未定值，在獲得固定解(fixed ambiguity)後，即可達公分等級的定位成果，此定位成果內容包含經緯度與高度等。

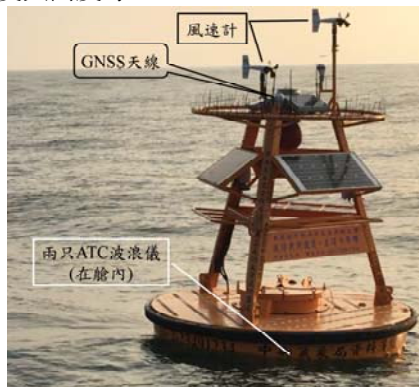


圖1 小琉球GNSS浮標外觀圖

(二) 波浪儀規格

本研究之分析資料分別來自於節電型波浪儀、GNSS與作業化波浪儀，其中作業化波浪儀為小琉球浮標上常設的波浪儀，而節電型波浪儀與GNSS係為了研究而安裝。上述三種感測器之中，節電型與作業化波浪儀均量測資料浮標之加速度、傾角與電羅經方位，為ATC種類的波浪儀，而GNSS係直接量測海面水位高度與東西、南北方向運動速度，並據以分析波浪。表1~3分別為為節電型波浪儀、GNSS與作業化波浪儀之主要規格。

表1 節電型波浪儀之主要規格

項目	參數	規格
加速度	範圍	50 m/s ²
	準確度	bias repeatability (1年): 0.03 m/s ² 非線性: 0.03% full scale (FS)
傾角	範圍	縱搖 (pitch): -90° ~ 90° 橫搖 (roll): -180° ~ 180°
	準確度	動態(dynamics): 1.5°
電羅經	範圍	-180° ~ 180°
	準確度	±1.0°

電源	耗電功率	0.57 W
----	------	--------

表2 GNSS之主要規格

項目	規格
即時動態定位	水平: 10 mm + 1 ppm (parts per million) × 基線長度 垂直: 15 mm + 1 ppm × 基線長度
速度	0.02 m/s (circular error probability, CEP)
耗電	4 W

表3 作業化波浪儀之主要規格

項目	參數	規格
加速度	範圍	±1 g
	準確度	±10 mg
傾角	範圍	±30°
	準確度	±0.2° (to 20°), ±0.3°
電羅經	範圍	0 ~ 360°
	準確度	±3.0° (磁傾角 < 75°)
電源	耗電功率	3.6 W

(三) 現場試驗布置

小琉球浮標布放於小琉球南方海域，該處水深約為100 m，距最近的岸邊約1.0 km，附近最近的衛星基準站為小琉球衛星基準站，兩者距離為3.7 km，小琉球浮標位置如圖2所示。GNSS天線安裝高度距平均海面為2.29 m，GNSS資料之取樣頻率為1 Hz，取樣期間為每小時的50 min起，共10 min。節電型波浪儀之取樣頻率亦為1 Hz，取樣期間與GNSS相同。作業化波浪儀之取樣頻率為2 Hz，取樣期間亦與GNSS相同。本研究採用之小琉球試驗資料期間為2016年10月15日0時至10月24日15時，此期間有海馬(HAIMA)颱風影響。



圖2 小琉球試驗位置圖

(四) 波浪資料分析方法

本研究使用Lin et al. [8]建立之ATC與GNSS之波浪分析流程，ATC之波浪分析流程能從ATC波浪儀量測的原始數據中依序分析，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之波浪分析流程能從GNSS天

線量測的原始數據中，直接將天線高度換算為海面水位高度，並結合東西、南北方向之運動速度共三個原始數據時序列，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。

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)，以每小時從所觀測之600 s數據選取前面的512 s數據分析波浪而言，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在70%以上之觀測資料分析波浪。

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

三、結果與討論

1. 示性波高

圖3中包含有節電型波浪儀與GNSS觀測之示性波高及兩者差異之逐時變化圖，其中兩者差異為節電型波浪儀示性波高減去GNSS示性波高。三者分別以黑色圓形、紅色方形及綠色菱形表示。

此外，統計全部資料中，有89.8%資料之示性波高差異小於±20 cm，顯示大部分節電型波浪儀與GNSS觀測之示性波高極為一致。此外，從圖3可發現在試驗歷程中，兩者差異較大之發生時間，並非發生於颱風大波高期間(2016年10月21日1~13時)，而是發生於小波高之期間，可見於颱風大波高期間，節電型波浪儀與GNSS觀測之示性波高相當一致。示性波高係由一維波譜計算而來，因此兩者差異之原因稍後將從一維波譜探討。

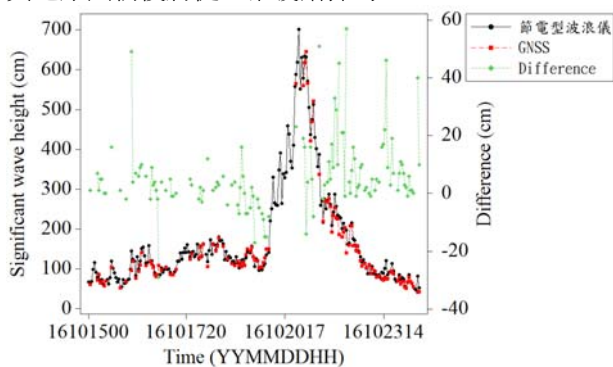


圖3 示性波高比較圖

2. 平均週期

圖4中包含有節電型波浪儀與GNSS觀測之平均週期及兩者差異之逐時變化圖，其中兩者差異為節電型波浪儀平均週期減去GNSS平均週期。三者分別以黑色圓形、紅色方形及綠色菱形表示。

統計全部資料有96.9%資料之平均週期差異小於±1 s，顯示大部分節電型波浪儀與GNSS觀測之平

均週期極為一致。此外，從圖4可發現在試驗歷程中，兩者差異較大之發生時間，並非發生於颱風大波高期間，而是發生於小波高之期間，可見於颱風大波高期間，節電型波浪儀與GNSS觀測之平均週期相當一致。平均週期係由一維波譜計算而來，因此兩者差異之原因稍後將從一維波譜探討。

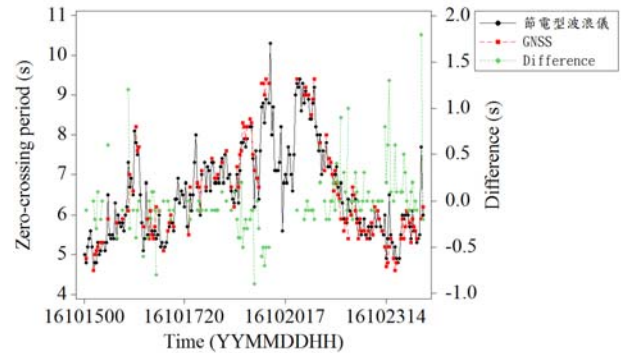


圖4 平均週期比較圖

3. 尖峰週期

圖5中包含有節電型波浪儀與GNSS觀測之尖峰週期及兩者差異之逐時變化圖，其中兩者差異為節電型波浪儀尖峰週期減去GNSS尖峰週期。三者分別以黑色圓形、紅色方形及綠色菱形表示。

統計全部資料有83.6%資料之尖峰週期差異小於±1 s，顯示大部分節電型波浪儀與GNSS觀測之尖峰週期極為一致。此外，從圖5可發現在試驗歷程中，兩者差異較大之發生時間，並非發生於颱風大波高期間，而是發生於小波高之期間，可見於颱風大波高期間，節電型波浪儀與GNSS觀測之尖峰週期相當一致。尖峰週期係由一維波譜計算而來，因此兩者差異之原因稍後將從一維波譜探討。

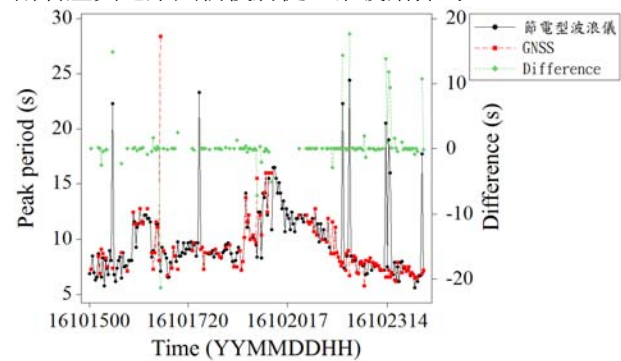


圖5 尖峰週期比較圖

4. 主波向

圖6中包含有節電型波浪儀與GNSS觀測之主波向及兩者差異之逐時變化圖，其中兩者差異為節電型波浪儀主波向減去GNSS主波向。三者分別以黑色圓形、紅色方形及綠色菱形表示。

從圖6計算發現全部資料中，有84.4%資料之主波向差異小於±22.5°，顯示大部分節電型波浪儀與GNSS觀測之主波向相當一致。此外，從圖6可發現

在試驗歷程中，兩者差異較大之發生時間，並非發生於颱風大波高期間，而是發生於小波高之期間，可見於颱風大波高期間，節電型波浪儀與GNSS觀測之主波向相當一致。主波向係由方向波譜計算而來，因此兩者差異之原因稍後將從方向波譜探討。

綜合上述四個小節之示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向差異的發生比例資料，顯示以目前規格之節電型波浪儀觀測波浪，能獲得良好的結果，亦即大部分之示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向資料皆與GNSS之波浪資料相當一致，尤其在颱風大波高期間，兩者之波浪資料較小波高期間更為一致。

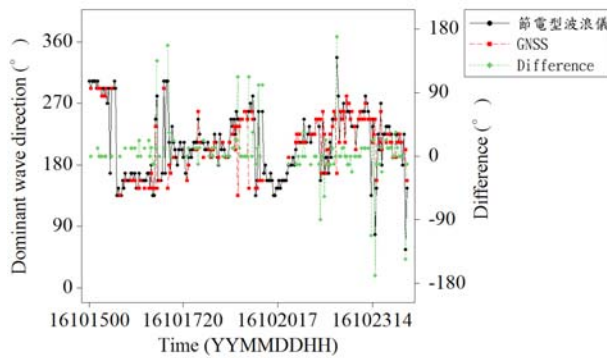


圖6 主波向比較圖

綜合上述資料，以示性波高作為門檻值，統計各門檻值之最大差異及平均絕對差異，分別如表4、5。從表4看出，不論是示性波高、平均週期、尖峰週期或主波向，最大差異皆隨著示性波高門檻值增大而變小。顯示當波高愈大時，節電型波浪儀之觀測誤差更小。

從表5看出，不論示性波高門檻值為何，示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向之平均差異分別在17 cm、0.2 s、1.2 s與18°以內。顯示節電型波浪儀之觀測結果良好，可做為現場觀測使用。

表4 節電型波浪儀之最大差異統計表

Hs 門檻(cm)	樣本數	Hs 差異(cm)	Tz 差異(s)	Tp 差異(s)	DWD 差異(°)
≥100	82	57	1.0	-21.3	169
≥200	21	51	0.4	-2.9	-90
≥300	9	51	0.2	0.0	34
≥400	8	23	-0.2	0.0	34

表5 節電型波浪儀之平均絕對差異統計表

Hs 門檻(cm)	樣本數	Hs 差異(cm)	Tz 差異(s)	Tp 差異(s)	DWD 差異(°)
≥100	82	9	0.2	1.2	18
≥200	21	13	0.1	0.1	15

≥300	9	17	0.1	0.0	10
≥400	8	13	0.1	0.0	10

5. 水位時序列

圖7為小琉球試驗期間，GNSS之示性波高達最大時之水位時序列圖，該筆示性波高為6.46 m。為能詳細檢視節電型波浪儀與GNSS水位時序列之差異，僅繪出512 s中的前面128 s數據。從圖7可知，兩者之水位時序列變化趨勢一致，就個別波浪而言，可看出週期與相位(phase)皆相當一致，此外，可看出節電型波浪儀相對於GNSS之個別波高，稍微偏大、一致與稍微偏小之情形皆有發生，此對於以零上切法分析之最大波高會有影響，但對於十分之一波高、三分之一波高、均方根波高與平均波高應該影響不大，因為波高之正偏差與負偏差在算術平均過程相互抵消。

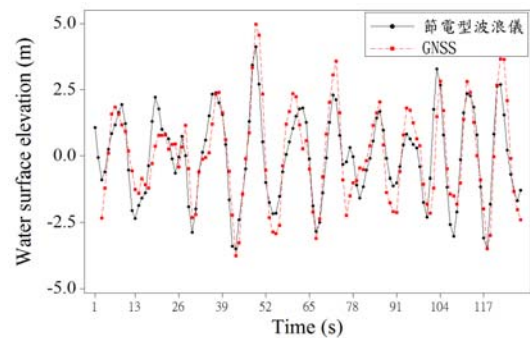


圖7 2016年10月21日8時之水位時序列圖

6. 一維波譜

圖8~10為試驗期間之一維波譜案例，選取的時間依序為2016年10月21日8時、10月22日12時與10月24日14時，係分別選取GNSS示性波高達最大、節電型波浪儀與GNSS之示性波高差異及平均週期差異達最大之發生時間。在一維波譜圖中，節電型波浪儀、GNSS與作業化波浪儀三者分別以黑色圓形、紅色方形及綠色菱形連線表示。

從圖8看出，當GNSS觀測之示性波高達6.46 m時，節電型波浪儀與GNSS之一維波譜形狀一致，且尖峰頻率相等，惟節電型波浪儀之能量密度尖峰值稍低。此外，檢視圖9與10，發現節電型波浪儀相對於GNSS，具有相似的偏差現象，亦即節電型波浪儀之一維波譜含有低頻雜訊及形狀偏差，兩圖低頻雜訊之尖峰頻率分別為0.04、0.06 Hz。圖9與10顯示在小波高情況下，節電型波浪儀之示性波高差異與平均週期及尖峰週期差異較大之原因為一維波譜之低頻雜訊與形狀偏差，研判此為加速度量測範圍過大(達5 g以上)所引起，亦即當小波高時，波浪引起的加速度較小，以過大量測範圍的感測器量測小範圍的加速度變化，量測值較不精準。

而作業化波浪儀之量測範圍較小($\pm 1\text{ g}$)，其與GNSS之一維波譜形狀不論是颱風大波高或小波高之情況下，皆極為吻合，此可從圖8~10中看出。

綜合本小節所述，可知目前規格之節電型波浪儀已能應用於觀測波浪，但須注意小波高情況下，可能存在的一維波譜低頻雜訊與形狀偏差，此造成示性波高、平均週期、尖峰週期、方向波譜與主波向之偏差，未來可選用較小加速度量測範圍之節電型波浪儀持續研究。

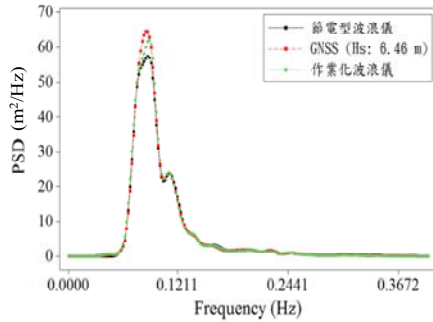


圖8 2016年10月21日8時之一維波譜圖

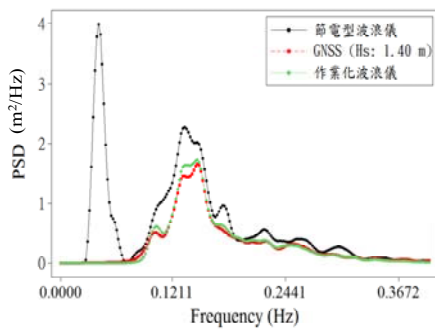


圖9 2016年10月22日12時之一維波譜圖

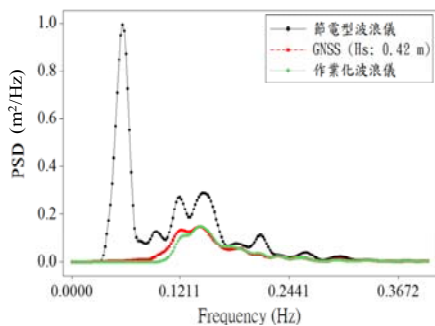


圖10 2016年10月24日14時之一維波譜圖

7. 方向波譜

圖11~12為試驗期間之方向波譜，選取的時間為2016年10月21日8時與10月23日16時，分別是GNSS所分析最大示性波高與最大主波向差異之發生時間。其中，10月21日8時、10月23日16時GNSS觀測之示性波高分別為6.46 m、0.75 m，分別代表颱風大波高與小波高期間。在方向波譜圖中，波浪能

量高低分別以深淺層次的顏色表示，能量所在方位代表波浪從該方位傳來。

從圖11可看出，(a)與(b)兩方向波譜之形狀相當一致，且兩者之主波向與平均風向相差僅 7° ，顯示在颱風大波高情況下，節電型波浪儀所觀測之方向波譜與主波向均為正確。

另外，從圖12可知，相較於GNSS之方向波譜，節電型波浪儀之方向波譜在頻率約為0.05 Hz且波來向約為東方之處，多出異常能量，此為節電型波浪儀一維波譜之低頻雜訊所引起，進而造成主波向誤判，顯示在小波高情況下，節電型波浪儀所觀測之方向波譜亦含有低頻雜訊，且因此誤判主波向。此外，圖12(b)之平均風向為 275° ，而主波向為 247.5° ，兩者相差達 27° ，此原因可能是波浪受到地形折射影響而轉向。

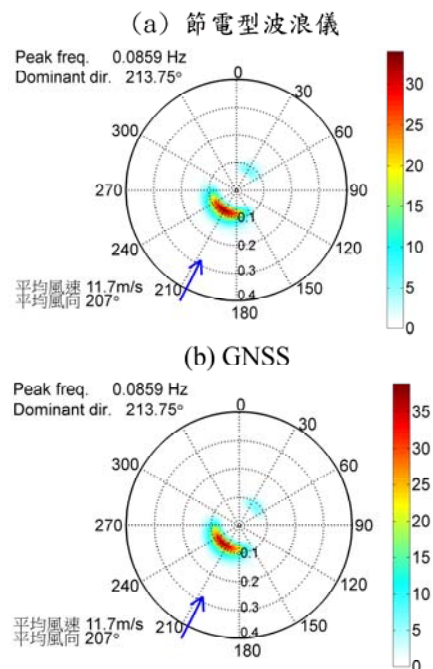
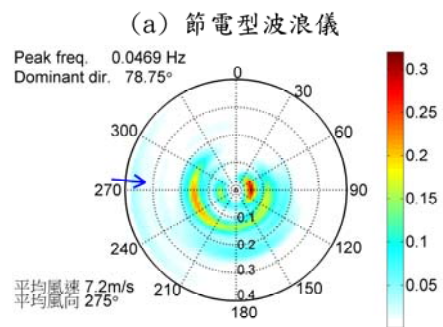


圖11 2016年10月21日08時之方向波譜圖



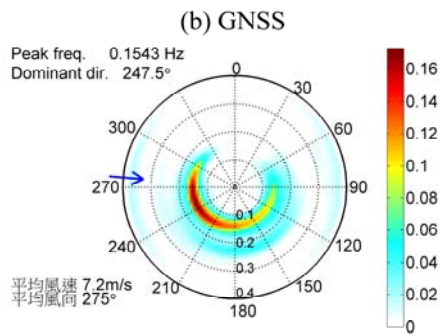


圖12 2016年10月23日16時之方向波譜圖

四、結論

從以上試驗與分析，獲致以下成果：首先，以目前規格之節電型波浪儀觀測波浪，能獲得良好的觀測結果，亦即大部分之示性波高、平均週期、尖峰週期與主波向皆與GNSS之波浪資料相當一致，尤其在颱風大波高期間，節電型波浪儀之量測效果較小波高期間更佳，一維波譜與方向波譜亦然。其次，兩者之水位時序列變化趨勢一致。綜合而言，目前規格之節電型波浪儀已能應用於現場觀測波浪，惟應用時須注意小波高情況下，偶而出現的一維波譜偏差，及其所造成的示性波高、平均週期、尖峰週期、方向波譜與主波向的偏差。

謝誌

感謝交通部中央氣象局購買節電型波浪儀與GNSS設備，提供小琉球浮標作為試驗平台，並提供小琉球浮標作業化觀測之波浪與風速風向資料，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: “潮位與皮波觀測 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資訊科技”, *海洋及水下科技季刊*, 第25卷, 第2期, 37-45
4. Doong, D.-J., Lee, B.-C., Kao, C. C., 2011: “Wave measurements using GPS velocity signals”, *Sensors*, 11(1), 1043-1058
5. 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
6. 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
7. Joodaki, G., Nahavandchi, H., Cheng, K., 2013: “Ocean wave measurement using GPS buoys”, *Journal of Geodetic Science*, 3(3), 163-172
8. 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
9. Waseda, T., Shinchi, M., Nishida, T., Tamura, H., Miyazawa, Y., Kawai, Y., Ichikawa, H., Tomita, H., Nagano, A., Taniguchi, K., 2011: “In GPS-based wave observation using a moored oceanographic buoy in the deep ocean”, *The 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers*, 365-372