

Performance of the GNSS Buoy for Monitoring Tides and Ocean Waves in Coastal Areas

Yen-Pin Lin¹ Ching-Jer Huang^{2*} Dong-Jiing Doong³ Chia Chuen Kao⁴

¹ Graduate Student, Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.

² Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.

³ Associate Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.

⁴ Honorary Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The Global Navigation Satellite System (GNSS) that utilizes a Virtual Base Station Real-Time Kinematics (VBS-RTK) positioning technology, operated by the National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of Interior, R. O. C., can achieve centimeter-level accuracy in measuring elevations. This research aims to examine the performance of the GNSS buoy developed by Lin et al. (2017) based on the above-mentioned GNSS system for monitoring tides and ocean waves in coastal areas. The performance will be examined to clarify the effect of the percentage of good altitude data on the monitoring of tides and waves, as well as the possible errors in the tides and waves that would be caused by the inclination of the buoy hull. First, static test was performed to determine the percentage of good altitude data obtained by the GNSS. Two field tests were carried out by deploying the buoy in the Wan-Li waters and the Small Liu-Qiu waters, respectively, to examine the performance of the GNSS buoy. The field tests demonstrate that the rate of effective data reaches 83 % and 74 % in measuring tides and waves, respectively. The data are referred to as effective data when their accuracies reach centimeter-level. For the field tests with the GNSS antenna installed at an elevation of 2.26 m, as the inclination of the buoy hull is less than 7° , the error in tide caused by the inclination is negligible. However, as the angle increases up to 16.1° , the uncorrected GNSS tide underestimates a water level of 12 cm. The correction of the water level due to inclination does not make significant change in the values of significant wave height, mean wave period, and the peak wave direction. Finally, during the field test, the GNSS buoy deployed in the Small Liu-Qiu waters detected a typhoon-caused swell with a significant wave height up to 7 m. The significant wave height obtained by the

GNSS agrees very well with that obtained by the ATC (accelerometer-tilt-compass) wave sensor even at this high wave height.

Keywords: VBS-RTK, GNSS buoy, coastal waters, operational monitoring of tides and waves

* Corresponding author, E-mail: cjhuang@mail.ncku.edu.tw

近岸海域潮位與波浪觀測用 GNSS 浮標效能之研究

林演斌¹ 黃清哲^{2*} 董東璟³ 高家俊⁴

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人

² 國立成功大學水利及海洋工程學系教授

³ 國立成功大學水利及海洋工程學系副教授

⁴ 國立成功大學水利及海洋工程學系名譽教授

摘要

全球衛星導航系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)透過內政部國土測繪中心之虛擬基準站即時動態定位(Virtual Base Station Real-Time Kinematics, VBS-RTK)技術解算能獲得公分等級精度的高度資料。本研究主要是探討 Lin et al. (2017)利用上述衛星導航系統所研發的近岸海域潮位與波浪作業化觀測用 GNSS 浮標的效能，如 GNSS 解算成功率(the percentage of good altitude data)對潮位與波浪觀測結果的影響，以及浮標傾角對潮位與波浪觀測結果的影響等。為探討上述特性，本研究首先進行 VBS-RTK 服務的解算成功率測試，並分別將 GNSS 浮標布放於灣裡及小琉球海域，進行現場試驗。試驗結果顯示，GNSS 浮標觀測潮位與波浪之有效資料（解算成功率達門檻值以上的資料）比例分別大於 83%及 74%。在 GNSS 天線安裝高度為 2.26 m 的條件下，當浮標平均總傾角小於 7° 時，潮位誤差基本上可忽略，而當平均總傾角達到 16.1° 時，未修正的潮位低估 12 cm。而以瞬時總傾角修正與否對於示性波高、平均週期與主波向的影響極微。此外，小琉球浮標在試驗期間測到示性波高接近 7 m 的颱風湧浪，GNSS 與加速度-傾角-電羅經 (accelerometer-tilt-compass, ATC)波浪儀所觀測到的示性波高非常吻合。

關鍵詞：VBS-RTK、GNSS 浮標、近岸海域、潮位與波浪作業化觀測

* 通訊作者 E-mail: cjhuang@mail.ncku.edu.tw

一、前言

近岸及河口的實測潮位是相當重要的資料，例如颱風期間河口實測潮位可反映颱風暴潮的特性，為防災決策所需的重要資訊。此外，近岸結構物的設計常需附近的潮位及地形水深等資料。然而，近岸及河口環境常缺乏架設陸基型潮位站所需的穩固平台，因此近岸及河口的潮位常付之闕如。為了滿足實際的需求，近岸及河口潮位常常是由鄰近的潮位站資料經由內插或外插求得。在平時，利用此方法所得結果與實際情況可能差異不大，但在極端海況下，如出現颱風所生成的暴潮或湧浪，局部區域的水位變化可能極為顯著，無法再由鄰近潮位站的水位資料估算求得。

近年來，開始有學者發展 GPS (Global Positioning System) 浮標來觀測潮位，Watson (2005) 將 GPS 浮標區分為小型 GPS 浮標、小型自動 GPS 浮標及大型 GPS 浮標等三種。該研究指出，小型 GPS 浮標適合短期觀測，而大型 GPS 浮標觀測潮位的缺點為在運動情形下，不易精確量測 GPS 天線相對於水面之高度。林等人(2012, 2014, 2015)及 Lin et al. (2014, 2017) 應用中華民國內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior, R.O.C.)提供之虛擬基準站即時動態定位 (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方法，能在近岸海域同時觀測潮位及波浪。經過在蘇澳外海的現場試驗證實，GNSS 浮標觀測所得潮位與鄰近的交通部中央氣象局蘇澳潮位站資料一致，GNSS 浮標與蘇澳潮位站所得潮位資料之均方根誤差小於 10 cm。此外，GNSS 浮標所得示性波高 H_s (significant wave height)、平均週期 T_z (zero-crossing period) 及主波向 DWD (dominant wave direction) 在未經瞬時總傾角修正之條件下，與同在資料浮標上的加速度-傾角-電羅經 (accelerometer-tilt-compass, ATC) 波浪儀所得觀測資料一致。惟在該研究試驗期間，颱風引起之示性波高僅接近 3 m。經由上述結果，Lin et al. (2017) 證實利用 GNSS 浮標可用來觀測近岸及河口的潮位及波浪，且其高度量測精度為公分等級。

GNSS 浮標觀測潮位之優勢為不需陸地高程測量，即能獲得以基隆平均海面為基準的潮位資料，不受陸地地層下陷影響。此外，由於 GNSS 浮標漂浮在海表面上，量測的潮位資料不受到海床變動影響。另外，在測量平均海水面方面，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 浮標能彌補此海域海水水位量測之不足。Gommenginger et al. (2003) 說明衛星高度計能測量波浪之示性波高，但尚無法量測方向波譜，而其研究已能推算全球性範圍之波浪平均週期，均方根誤差為

0.8 s，且風浪海域較湧浪海域適用。由於衛星繞行地球的特性，衛星高度計對同一海域之觀測時距長，甚至以週計算 (Dawidowicz, 2014)。目前浮標上常用的波浪觀測儀器為 ATC (例如 MacIsaac and Naeth, 2013)，其功能為可提供頻率域利用波譜法及時間域利用零上切法分析之波浪統計參數。然而該型波浪儀分析時間域波浪統計參數所需的波浪水位數據，是間接計算而得。由於 GNSS 浮標直接觀測水位，因此由分析此水位所得之波浪資料(如：示性波高、平均週期及主波向)可用來驗證 ATC 波浪儀所觀測波浪資料的準確度(Lin et al., 2017)。

GNSS 浮標能處理美國 GPS 及俄羅斯 GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System of Russia)衛星訊號，相較於僅處理 GPS 訊號，解算成功率較佳。不論 GPS 或 GLONASS 之解算成果，高度精度均可達到 5 cm 以內，且均能觀測潮位與波浪。波浪觀測項目包含水位時序列、一維波譜、方向波譜、示性波高、平均週期與主波向(Lin et al., 2017)，甚至能分析尖峰週期與零上切法之波浪統計參數。

Lin et al. (2017)研發的 GNSS 浮標相當於 Watson (2005)所分類的大型 GPS 浮標，其天線安裝高度較小型 GPS 浮標為高，因此浮標傾斜對潮位與波浪量測誤差之影響不能忽視。因此本研究將探討 GNSS 浮標因傾角造成海面水位高度量測誤差的修正方法，並比較在示性波高較大的條件下，GNSS 與 ATC 波浪儀兩套儀器之波高差異。此外，有效資料

比例攸關作業化觀測效能，本研究定義每秒 RTK 解算精度達公分等級時為解算成功，而每小時的解算成功率(the percentage of good altitude data)達門檻值以上稱為有效資料。因此，本研究也將探討 GNSS 浮標的解算成功率，並分析有效資料所佔的比例。

二、研究方法

GLONASS 為俄羅斯建立之衛星定位系統，具有一套實體衛星定位系統，而 GNSS 並非如此，僅為表示衛星定位接收器或服務功能之用，若衛星定位接收器或服務能夠處理兩種以上之衛星定位系統訊號，則稱為 GNSS 接收器或服務，本研究採用之 GNSS 接收器能接收 GPS 與 GLONASS 訊號，而目前內政部國土測繪中心 e-GNSS 系統能處理 GPS 及 GLONASS 訊號。

GNSS 浮標研發係整合多個技術而成，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資料浮標上加裝 GNSS antenna (天線)接收 GPS 及 GLONASS 衛星訊號，進行 GNSS 天線所在位置坐標的解算，參閱圖 1。GNSS 浮標需要鄰近位置的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。鄰近位置的觀測數據來源分為實體與虛擬兩種。GNSS 浮標採用虛擬的觀測數據，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 PIVOT (progressive infrastructure via overlaid technology) 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，以模型(model)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)。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。

RTK 與 VBS-RTK 共同處為兩者均利用差分原理以提昇定位成果精度，兩者均需要 GNSS 浮標與基準站訊號進行解算，RTK 引用之基準站訊號為實體基準站資料，一般認為 RTK 基線(baseline)

長度(亦即 GNSS 浮標與基準站距離)限制為 20 km。而 VBS-RTK 為網路式 RTK 技術之一種，本研究所引用之基準站訊號為虛擬基準站 (Virtual Reference Station, VRS)資料，VBS-RTK 基線長度可達 50 km，其中虛擬基準站資料係由 VBS-RTK 控制中心集中接收各處之衛星基準站資料，透過軟體模型計算而得，在計算過程需要 GNSS 浮標位置資料。

有關 VBS-RTK 之其他詳細說明，可參見 Lin et al. (2017)論文，本節說明現場試驗布置、解算成功率、測量學上高度的定義與換算方法及海面水位高度修正方法等。

2.1 現場試驗布置

本研究現場試驗分別在灣裡及小琉球海域進行，灣裡試驗浮標布放於台南市二仁溪河口外海約 1.6 km 處，水深約為 10 m，如圖 2 中左圖所示。離該位置最近的衛星基準站為成大測量衛星基準站，兩者相距約 11 km；最近的潮位站為水利署永安潮位站，位於永安液化天然氣港北堤，約位於灣裡浮標之南南東方 11.7 km。該浮標裝設有 GNSS 及 ATC 波浪儀，GNSS 為美國 Topcon Positioning Systems 公司製造之 MR-1，ATC 為美國 MicroStrain 公司生產之 3DM-GX1。GNSS 天線安裝高度為 2.26 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。

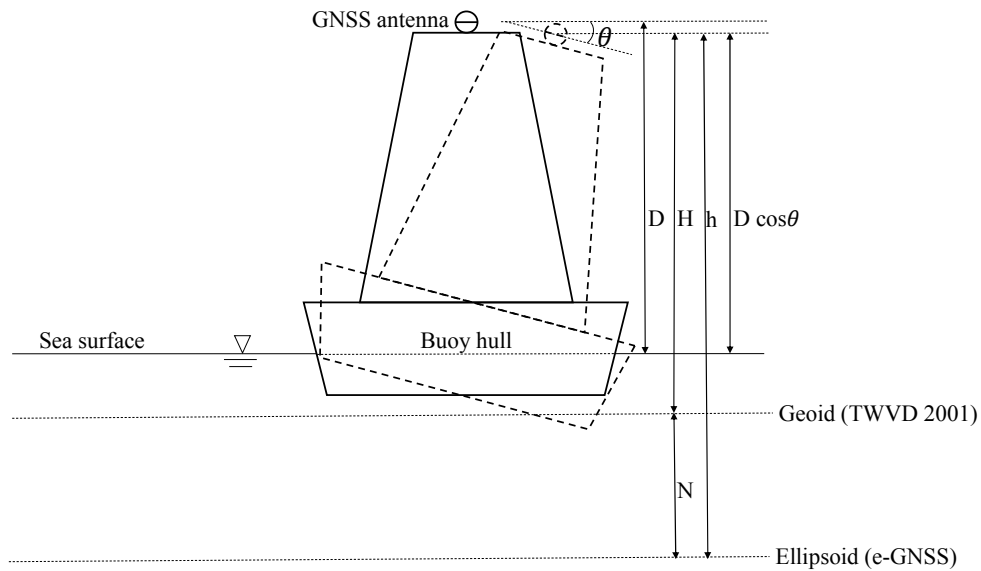


圖 1 GNSS 浮標量測高度關係圖

ATC 波浪儀內的傾角計輸出縱搖與橫搖數據，取樣頻率為 2 Hz，取樣期間與 GNSS 相同，GNSS 取樣資料內容有橢球高與解算品質指標等，利用解算品質指標判定解算成功。本研究引用灣裡試驗的資料期間為 2015 年 8 月 1 日 0 時至 8 日 11 時，實得 177 個樣本。

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，如圖中右圖所示。該浮標也裝設有 GNSS、傾角計及 ATC 波浪儀，GNSS 與灣裡相同型號，傾角計為荷蘭 Xsens Technologies B.V.公司製造之 MTi 10 series attitude heading reference system (AHRS)，ATC 波浪儀為美國 Watson Industries 公司生產之 SHR-A1360-2A-30/105，為目前交通部中央氣象局的作業化海氣象浮標所採用。

GNSS 天線安裝高度為 2.29 m，GNSS 資料之取樣與灣裡試驗相同，而傾角計之取樣頻率為 1 Hz，與 GNSS 數據同步。ATC 波浪儀之取樣頻率為 2 Hz，每小時取樣期間與 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 2017 年 2 月 20 日 13 時，每小時觀測 1 筆，實得 3,024 筆資料。

2.2 解算成功率

GNSS 浮標解算時，依當時條件而獲得不同精度等級的定位成果。當每秒的定位成果達到最高的精度等級，亦即公分等級時，稱為解算成功，或稱為得到固定解。也就是說，RTK 解算依照當時 GNSS 接收之衛星訊號、網路連線品質、GNSS 衛星定位基準網接收之衛星訊號、電離層活動等狀態，會有不同精度之成果，GNSS 接收器在解算後針對成果精度給予不同品質指標 (quality

indicator) (Topcon Positioning Systems Inc., 2013), 詳如表 1 所示。當解算品質指標為”4 – RTK Fix solution”時, 本研究認定當時之解算成果為解算成功。每小時觀測的原始數據依照式(1)計算解算成功率, 每小時的解算成功率達門檻值以上者稱該筆資料為有效資料。有關潮位與波浪之解算成功率門檻值的設定將分別於 3.2 及 3.5 節討論。GNSS 浮標觀測時, 每秒的原始數據皆為即時解算, 在分析潮位時, 先從原始數據中找出解算成功之數據並計算數量, 以選取每小時

54 min 起之 6 min 數據而言, 式(1)的總資料數為 360 個, 再以式(1)計算解算成功率。在分析波浪時, 以選取每小時 50 min 起之 512 點數據而言, 同樣以式(1)計算解算成功率, 分母為 512, 分子為解算成功數據個數。選取 512 點之原因為分析波浪過程採用快速傅立葉轉換 (Fast Fourier Transform, FFT), 需要 2 的整數次方樣本數。

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



圖 2 灣裡浮標(左)及小琉球浮標(右)試驗位置圖

表 1 GNSS 解算成果品質指標

代號	意義
0	Fix not available or invalid
1	GPS SPS Mode (single point mode), fix valid
2	Differential GPS SPS Mode, fix valid
3	GPS PPS Mode (single point mode), fix valid
4	RTK Fix solution
5	RTK Float solution
6	Estimated (dead reckoning) mode
7	Manual input mode

2.3 高度定義與轉換方法

GNSS 浮標量測天線所在位置的橢球高(ellipsoidal height)，而臺灣本島海岸工程採用的高度為正高(orthometric height)，亦即以基隆平均海平面為基準的高度，兩者坐標系統不同，因此 GNSS 浮標量測所得橢球高須經過換算，才能得到一般海岸工程所用的正高。

圖 1 為 GNSS 浮標量測高度關係圖，橢球高 h 之定義為自橢球面(ellipsoid)起算之高度，橢球面係依據內政部國土測繪中心所定義之 e-GNSS 坐標系統給定。正高 H 之定義為自大地水準面(geoid)起算之高度，此高度在國內由內政部公布之 2001 臺灣高程基準(Taiwan Vertical Datum 2001，簡稱 TWVD 2001)所定義，圖 1 中 N 為大地水準面高(geoid height)，或稱為大地起伏(geoidal undulation)，上述 h 、 H 與 N 三者之關係如式(2)所示(Milbert and Smith, 1996)。將 h 轉換為 H 之原理為：由於布放在近岸區域之 GNSS 浮標活動範圍僅大約為數十公尺半徑之圓形區域，此區域內之 N 可視為常數，先利用此式求出 GNSS 浮標活動範圍之 N ，得知此常數值及 GNSS 所觀測瞬間的 h 後，再利用此式計算瞬間的 H 。在轉換過程不需要換算為海面高度，因此不需傾斜修正，詳細說明如後。

$$H = h - N \quad (2)$$

大地水準面高(N)的計算方法如下：利用布放 GNSS 浮標後所觀測之第

一個小時共 10 min 的原始數據，亦即天線在 e-GNSS 坐標系統下的經緯度與 h 數據，此三維坐標係 GNSS 所計算並輸出，從中選取 30 s 以上之固定解樣本，將此 30 s 以上之經緯度與 h 數據透過三維坐標轉換服務，轉換得到天線在 TWVD 2001 坐標系統下相同樣本數之 H 數據，分別以此樣本數之 h 及 H 代入式(2)，即可獲得相同樣本數之 N 及其算術平均值，此值可被輸入於 GNSS 浮標中。接下來 GNSS 浮標於每次觀測時，結合此已知的算術平均後之 N 與瞬時觀測之 h ，代入式(2)即可獲得瞬時的 H 。惟當 e-GNSS 坐標系統更新時，亦須重新計算 N 。在計算獲得上述瞬時的天線正高 H 後，即可利用已知的天線安裝高度常數值 D 與瞬時的總傾角(inclination, θ)，進一步換算為瞬時的海面(sea surface)正高，其方法詳述於下節。

2.4 海面水位高度修正方法

本研究所述的潮位與波浪觀測均利用 GNSS 浮標觀測數據，潮位係依照 2.2、2.3 與本節之方法，視需要進行傾斜修正後，獲得海面水位正高，再進行分析。而波浪係依照 2.2 與本節之方法，視需要進行傾斜修正後，獲得海面水位橢球高，再進行分析。本節說明傾斜修正方法。

浮標的運動形式可用船體的運動來說明，在正交坐標系統中，浮標運動包含有縱移(surge)、橫移(sway)、起伏(heave)、縱搖(pitch)、橫搖(roll)、橫擺(yaw)，各運動之示意圖如圖 3 所示。其

中縱移與橫移為水平方向移動，而橫擺為水平方向轉動，三者皆不會引起高度變化，因此不予修正。起伏主要為波浪造成的上下運動，由於資料浮標隨波運動特性良好，本研究亦不考慮起伏引起之誤差，僅針對縱搖與橫搖之影響修正。

圖 1 中，當資料浮標瞬時縱搖及橫搖的角度分別為 P 及 R 時，可應用式(3)計算瞬時總傾角 θ ，未修正的 (uncorrected) 海面水位正高 E_u 為 $H - D$ ，如式(4)所示，而修正後的 (corrected)海面水位正高 E_c 可由式(5)求得，潮位誤差 ΔE 以式(6)表示，此係為了衡量未進行傾斜修正之潮位誤差。將式(3) ~ (6)計算所得之瞬時數據進行算術平均，即可獲得每小時的平均總傾角、未修正潮位、修正後潮位與潮位誤差。

$$\theta = \cos^{-1}(\cos P \times \cos R) \quad (3)$$

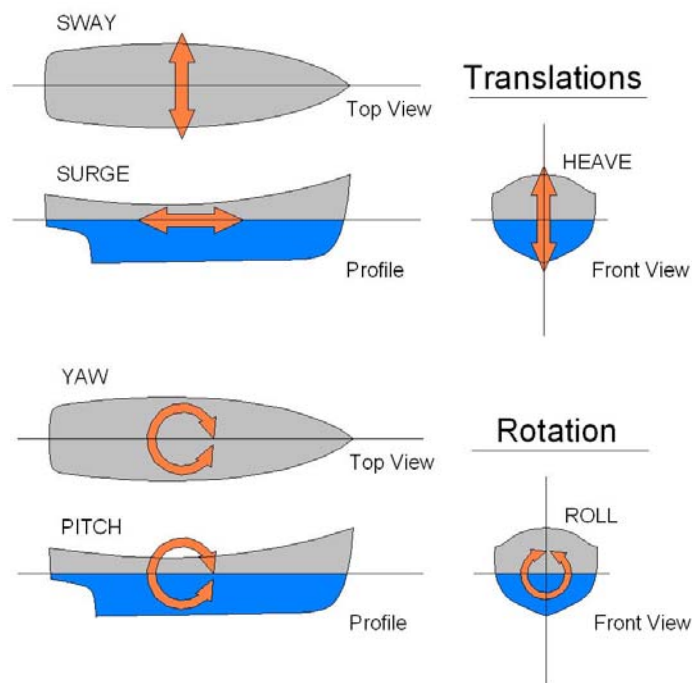
$$E_u = H - D \quad (4)$$

$$E_c = H - D \times \cos \theta \quad (5)$$

$$\Delta E = E_u - E_c \quad (6)$$

2.5 以 GNSS 觀測數據分析波高與週期之方法

本文係參照本研究團隊於 2017 年發表論文(Lin et al., 2017)中說明 ATC 波浪儀波高、週期、波向與利用 GNSS 觀測數據分析方向波譜之分析流程，以進行分析。惟 Lin et al. (2017)代入分析之原始數據未考慮 GNSS 浮標傾斜之影響，而本文將此影響納入考慮。



https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_motions

圖 3 船體運動示意圖

三、結果與討論

3.1 VBS-RTK 服務之解算成功率

為探討 VBS-RTK 服務之解算成功率，本研究先在成功大學敬業校區大樓頂樓進行靜態試驗。該位置相當於 13 樓高度，視野極為空曠，且位在市區，網路連線品質佳，附近最近的衛星基準站為成大測量衛星基準站，距離約 500 m。引用資料期間為 2016 年 9 月 1 日 17 時 24 分 56 秒至 2 日 17 時 24 分 55 秒共 24 小時，取樣頻率為 1 Hz，共取得 86,400 個樣本。經分析固定解之樣本數為 86,318，以式(1)計算解算成功率為 0.999。固定解樣本之高度資料組體圖如圖 4，圖中橫軸為利用 VBS-RTK 解算所得試驗位置 GNSS 天線之高度(altitude above geoid)，縱軸為不同高度區間所佔的百分比。實線所示為常態分布曲線，經分析最高與最低的高度相差 25 cm，標準偏差 (StDev) 為 1.28 cm，優於 VBS-RTK 服務之 5 cm 精度(Wu et al.,

2013)，此精度能滿足大部分潮位與波浪觀測需求。圖 4 中的高度為正高，係由 GNSS 所測得橢球高減去 GNSS 接收器內建之全球大地水準面高模式(global geoid model) (Topcon Positioning Systems Inc., 2013)計算之大地水準面高而得，內建值不如採用 TWVD 2001 準確，但也會隨位置不同變化。

3.2 潮位有效資料統計分析

為衡量分析平均潮位所需之解算成功率門檻，可從兩方面考慮，其一為測量精度，其二為海面波浪週期，考慮海面波浪週期之原因係為了取得至少一個波浪週期所需的樣本數以分析平均潮位，藉此方式消除或減低海面波浪對平均潮位之影響。在測量精度方面，內政部國土測繪中心 VBS-RTK 服務系統建議，測量成果須為固定解，且須獲得 30 筆以上之樣本，再取算術平均作為最終定位坐標成果(內政部國土測繪中心，2017)。

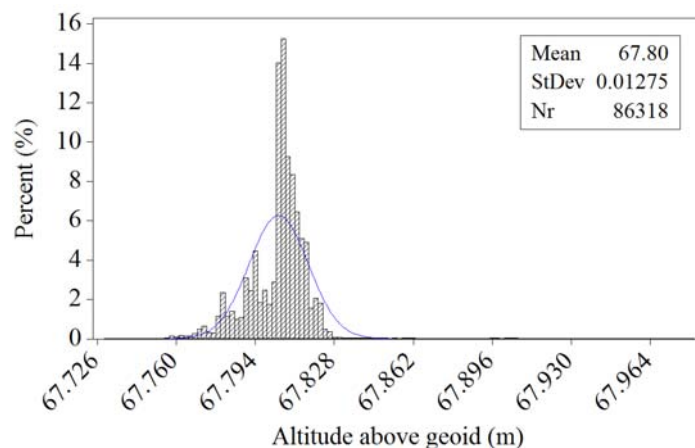


圖 4 靜態測試之高度資料組體圖

在波浪週期方面，Garrison (2013) 將海面上波動依週期分類，海面風浪之週期範圍為 0.1 ~ 23 s，亦即以 1 Hz 取樣頻率而言，至少須記錄 23 筆數據，始足以涵蓋一個波浪週期。綜合以上兩個方面之要求，所需解算成功的樣本數至少應為 30 個。另外，美國國家海洋暨大氣總署之標準作業化潮位觀測時距為 6 min (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017)，交通部中央氣象局與經濟部水利署之潮位站亦採用此觀測時距。綜合而言，以前述所需 30 個解算成功的樣本數，除以 6 min 觀測時距及 1 Hz 取樣頻率的總樣本數 360，得解算成功率為 0.083，此即為本研究採用於潮位資料分析之解算成功率門檻，當每小時觀測之解算成功率高於此門檻時，始計算平均潮位，成為有效資料。也就是說，在每小時的最後 6 min 以 1 Hz 取樣頻率下，共取得 360 個數據，而在這 360 個數據中若有超過 30 個數據解算成功，則屬跨過解算成功率門檻。

本研究以每小時整點前 6 min 觀測期間所得數據，利用式(1)計算每小時的解算成功率，繪製灣裡試驗期間之解算成功率發生機率組體圖與解算成功率累積發生機率組體圖，分別如圖 5 左及右所示，橫軸為解算成功率，從 0 到 1.0 以 0.083 為一區間，以左圖最左邊區間為例，其解算成功率範圍為 0 ~ 0.083，此區間共有 19 筆資料，佔全部 177 筆資料之 10.7%，其他區間依此類推。而右圖之縱軸為累積發生機率，亦即右圖中每一區間之縱軸數值為左圖中該區間與

該區間左邊所有區間發生機率之總和。由右圖可發現於 2015 年灣裡試驗期間，解算成功率大於 0.083 的有效資料比例為 89.3%。而分析小琉球試驗期間資料可知，兩圖之形狀與圖 5 極為相似，解算成功率大於 0.083 的資料比例為 83.6%。從左圖可看出，解算成功率在 0.996 以上的資料佔了約 63.8%，顯示絕大部分資料之解算成功率很高。造成解算成功率不佳的原因與 GNSS 接收之衛星訊號、網路連線品質、GNSS 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有關，進一步查證發現，解算成功率為 0 的資料比例約佔 9%，未來可針對此改善。

3.3 浮標傾角與潮位誤差之關係

為進一步分析平均總傾角對潮位觀測誤差之影響，本研究從上述每小時 54 min 起取 6 min 之 GNSS 與傾角計數據，從中挑選解算成功率 0.083 以上的資料，依式(3)~(6)計算潮位，繪製逐時時間序列如圖 6。取 54 min 起 6 min 之潮位來分析的主要原因，是希望分析的時間區間與潮位站的一致，方便做後續的比較。圖 6 各曲線分別為 2015 年灣裡試驗之未修正潮位、修正後潮位、潮位誤差、平均總傾角與永安站潮位資料，圖中潮位高度之基準皆為基隆平均海平面。從圖 6 可看出當平均總傾角變大時，潮位誤差變為負值，顯示未經修正之潮位觀測值有偏低情形。此外，圖 6 的結果顯示當浮標平均總傾角小於 7° 時，潮位誤差 (ΔE) 基本上可忽略，而當平均總傾角達到 16.1° 時，未修正的潮

位低估約 12cm。

比較修正後灣裡 GNSS 浮標的潮位與永安潮位站的潮位，可看出兩者潮高與相位皆一致；但於低潮位時，永安潮位較灣裡浮標潮位高出約 20 cm，灣裡潮差較大，可能是兩處之位置與水深不同所致，確實的原因尚待收集更多試驗資料再進一步研究。

圖 7 為灣裡浮標及小琉球浮標試驗期間潮位誤差對總傾角關係圖，其中圓形點與方形點分別表示灣裡浮標及小琉球浮標試驗資料。從該圖可知兩次試驗期間之潮位誤差與平均總傾角關係一致。整體而言，當 GNSS 浮標平均總傾角為 10° 時，潮位誤差為 5 cm，而當 GNSS 浮標平均總傾角達 16.1° 時，未修正的潮位低估 12cm。

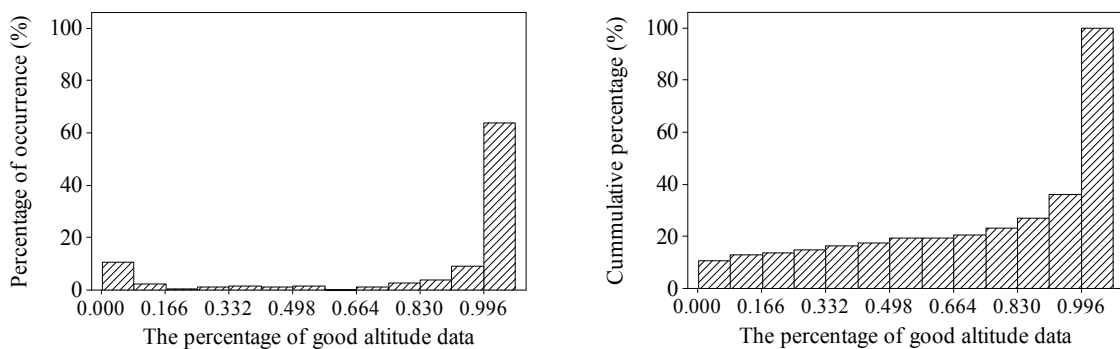


圖 5 灣裡浮標試驗之解算成功率發生機率組體圖(左)與解算成功率累積發生機率組體圖(右)

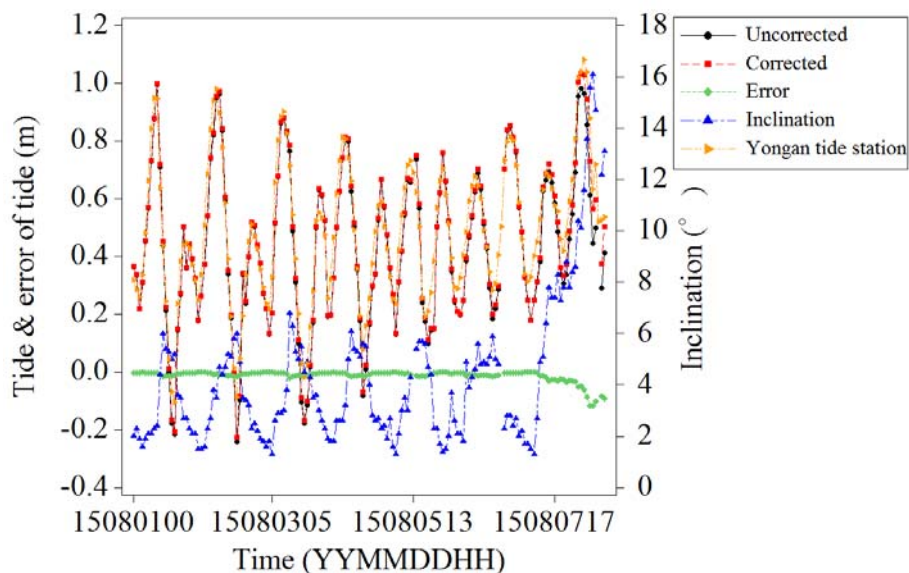


圖 6 灣裡浮標試驗之潮位、潮位誤差、平均總傾角與永安潮位逐時變化圖

由式(3) ~ (6)也可以推導出潮位誤差與瞬時總傾角及天線安裝高度之關係式如下：

$$\Delta E = D(\cos \theta - 1) \quad (7)$$

由式(7)可知天線安裝高度(D)愈低，潮位誤差受到瞬時總傾角影響愈小。以灣裡 D 值(2.26 m)與假設之 0.30 m 代入式(7)並將之繪於圖 7，分別如圖中實線與虛線，可知當天線安裝高度為 0.30 m 時，即便 GNSS 浮標瞬時總傾角達 20°，潮位誤差仍優於 -2 cm。此外，亦可看出實測點與實線之關係一致。當瞬時總傾角較大時，實測點與實線偏離變大，當平均總傾角約 15° 時，實測與理論之 ΔE 相差約 3.5 cm，此仍在 GNSS 浮標量測高度之精度範圍內。

3.4 浮標傾角對波浪觀測結果的影響

上節的結果顯示，當浮標平均總傾角較大時(如 16.1°)，未修正的潮位低估可達 12 cm。本節將探討平均總傾角對波浪觀測結果的影響。本研究採用的波浪資料係由加裝於小琉球浮標之 GNSS 與傾角計所測得，於 2016 年 10 月 15 ~ 21 日，有海馬(HAIMA)颱風通過臺灣南部海面，雖然交通部中央氣象局未發布颱風警報，但颱風湧浪(swell)卻在小琉球海域造成 7 m 左右的示性波高，而其餘月分之示性波高皆小於 2 m。為分析浮標平均總傾角對波浪觀測值的影響，本研究選取小琉球浮標試驗期間內(2016 年 10 月 15 日 0 時 ~ 31 日 23 時)每小時解算成功率為 1.00 的資料，並計算出示性波高差異值(d_Hs)、平均週期差異值(d_Tz)與主波向差異值(d_DWD)。

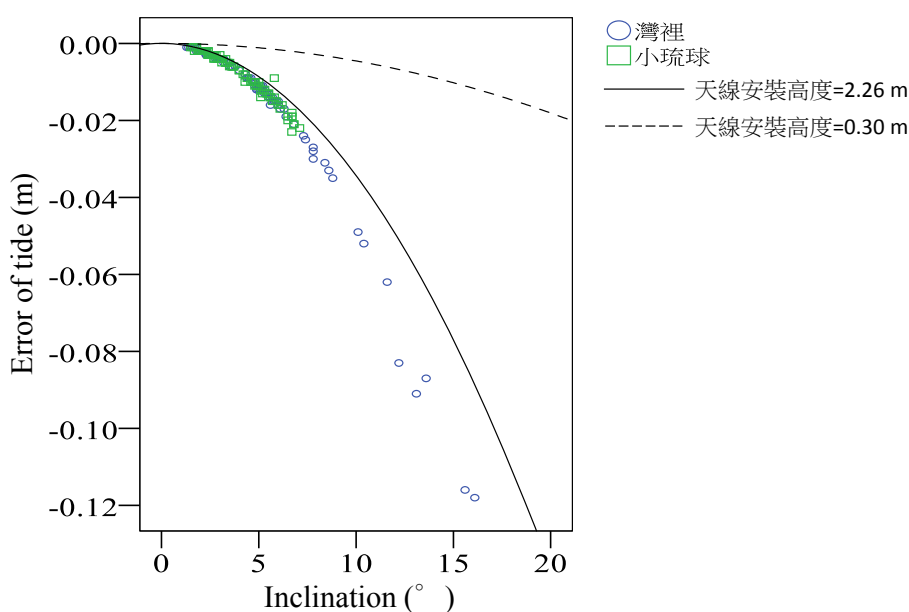


圖 7 灣裡浮標及小琉球浮標之潮位誤差與總傾角關係圖

差異值定義為未修正觀測值減去修正後之觀測值。圖 8 所示為上述試驗期間內各差異值的時間序列，圖中圓形、長方形與菱形符號分別為示性波高差異值、平均週期差異值與主波向差異值。為了解平均總傾角對各差異值的影響，圖 8 中也標示出平均總傾角的時間序列，並以三角形符號表示。從圖 8 可看出波高之最大差異僅 1 cm，平均週期之最大差異僅 0.1 s，而兩者之主波向完全相等。此外，分別觀察上述各差異值曲線隨著平均總傾角之變化趨勢，可看出示性波高、平均週期及主波向之差異值皆與平均總傾角變化無關，其原因應該是：一、如圖 8 所示，平均總傾角皆小於 7° ，因此實際的水位誤差相當小。二、波高係兩個相鄰的波峰與波谷海水位之

差值，因浮標傾斜造成的波高誤差，在平均計算過程被抵消。

換言之，以未經傾角修正之海面水位高度資料分析波浪，相較於以經過傾角修正之海面水位高度資料分析波浪，兩者之示性波高、平均週期與主波向幾乎相等，顯示浮標傾角不會影響 GNSS 浮標之波浪觀測。在天線安裝高度較 2.29 m 更低之情況下，因浮標傾斜造成的波高誤差，同樣在平均計算過程被抵消，且以式(7)可知，其海面水位高度之誤差將更小，因此示性波高誤差也會更小，浮標傾角更加不會影響 GNSS 浮標之波浪觀測。綜合言之，不論天線安裝高度為何，浮標傾角對示性波高、平均週期與主波向皆無影響。

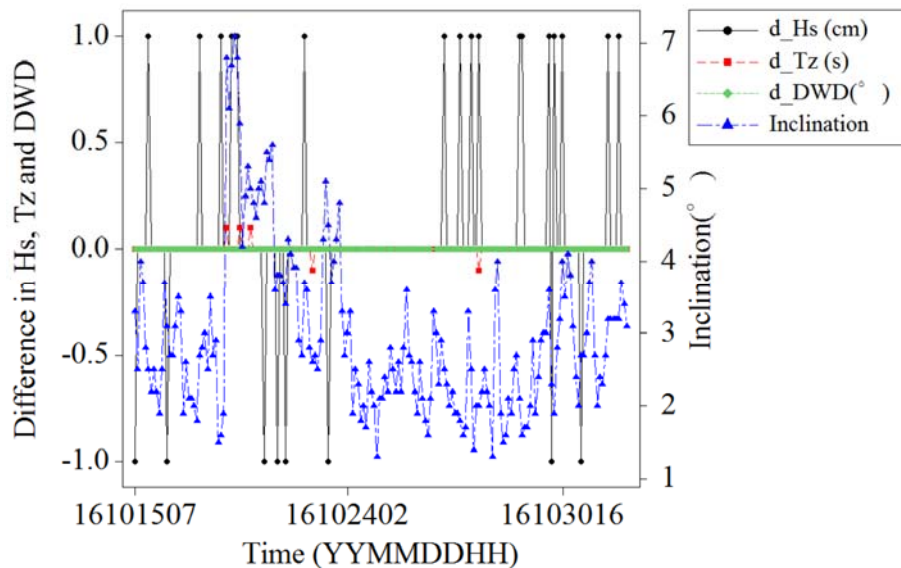


圖 8 小琉球浮標試驗之示性波高、平均週期、主波向差異與平均總傾角逐時變化圖

3.5 最低解算成功率門檻值對波浪分析結果的影響

前述 3.2 節從分析潮位所需之最少樣本數考慮潮位最低解算成功率門檻值，而分析波浪所需之最低解算成功率門檻值難以比照，因此本節從示性波高誤差考量，從誤差值訂定分析波浪之最低解算成功率門檻值。

從上一節分析結果得知，傾斜修正與否對於 GNSS 觀測示性波高、平均週期與主波向之影響極小，本節探討不同解算成功率門檻值對波浪分析結果的影響。表 2 所示為小琉球浮標試驗期間，在特定的解算成功率門檻值以上，有效資料所佔比例，及示性波高最大絕對差異。示性波高最大絕對差異為利用 GNSS 所得解算成功水位資料算出的示性波高減去 ATC 波浪儀所得示性波高之絕對值，再從逐時資料中取出最大者，兩者均未經傾斜修正。

從表 2 可看出在小琉球現場試驗中，當解算成功率門檻從 0.50 ~ 0.90 逐步變大時，有效資料比例從 79.0% ~ 68.2% 逐步變小；同時，示性波高最大絕對差異從 111 ~ 19 cm 逐漸變小，可知解算成功率門檻分別與有效資料比例與示性波高最大絕對差異呈現負相關。從表 2 亦可得知，當容許的示性波高最大絕對差異為 28 cm 時，可選取解算成功率在 0.70 以上的資料分析波浪，而此時有效資料比例為 74.4%。

此外，從表 2 亦可看出解算成功率門檻對於有效資料比例之影響程度，當門檻每降低 0.10 時，有效資料比例增量介於 2.3% ~ 3.8% 之間，可見放寬篩選資料的門檻，對於有效資料比例之提昇效果有限。以最大之有效資料比例減量 (3.8%) 估計，當解算成功率門檻為 1.00 時，有效資料比例大約為 64%。

表 2 小琉球試驗之解算成功率門檻、有效資料比例與示性波高最大絕對差異關係表

解算成功率門檻	有效資料比例(%)	示性波高最大絕對差異(cm)
≥ 0.50	79.0	111
≥ 0.60	76.7	83
≥ 0.70	74.4	28
≥ 0.80	72.0	19
≥ 0.90	68.2	19

3.6 颱風示性波高比較

承接 3.5 節觀測資料，本節挑選其中解算成功率門檻為 0.70 以上的 GNSS 與 ATC 波浪儀示性波高資料進行迴歸分析，共得 2,217 筆有效資料。圖 9 為 GNSS 對 ATC 示性波高散布圖，分析結果顯示 R^2 為 0.992，兩示性波高迴歸關係如式(8)所示，與 Lin et al. (2017)之示性波高迴歸關係式極為一致，該關係式 ($H_{s(GNSS)} = 0.975H_{s(ATC)} + 3.89(cm)$) 是藉由比較 2013 年 8 月於臺灣蘇澳海域試驗期間 GNSS 與 ATC 之示性波高所得結果，惟該試驗期間測到的最大示性波高不到 2.5 m。圖 10 為 GNSS 與 ATC 示性波高逐時時間序列圖，圖中每小時 GNSS 解算成功率皆為 1.00，最大的示性波高誤差發生於 2016 年 10 月 21 日 8 時，當時 GNSS 與 ATC 之示性波高分別為 6.46 m 與 6.45 m，相差僅 0.01 m。本研究試驗結果顯示在示性波高接近 7 m 之情況下，兩套儀器量測之示性波高仍極為一致。

$$H_{s(GNSS)} = 0.986H_{s(ATC)} + 2.91(cm) \quad (8)$$

四、結論

本研究主要是探討先前所研發的近岸海域潮位與波浪觀測用 GNSS 浮標的效能，如 GNSS 解算成功率對潮位與波浪觀測結果的影響、浮標總傾角與潮位觀測誤差的關係、以及平均總傾角對波浪觀測結果的影響等。為探討上述特性，本研究分別將 GNSS 浮標布放於灣

裡及小琉球海域，進行現場試驗。經由本研究可獲得下述結論：

1. 靜態試驗顯示在網路連線品質佳及視野空曠的情況下，VBS-RTK 服務系統的解算成功率達 0.999。
2. GNSS 浮標以每小時整點前 6 min 原始數據分析該小時平均潮位，解算成功率大於 0.083 的有效資料比例為 83.6%以上。
3. 在 GNSS 天線安裝高度為 2.26 m 的條件下，當浮標平均總傾角小於 7° 時，潮位誤差(ΔE)基本上可忽略，而當平均總傾角達到 16.1° 時，未修正的潮位低估 12 cm。
4. 當 GNSS 天線高度為已知時，潮位誤差對瞬時總傾角之關係為餘弦相關函數，天線安裝高度愈低，未以傾斜修正之潮位誤差愈小。
5. 在波浪觀測部分，不論示性波高、平均週期或主波向，各差異值皆不隨平均總傾角變化，且修正與否所造成之差異極微，顯示當以 GNSS 浮標觀測波浪時，不需以瞬時總傾角修正。
6. 依據前述兩點，GNSS 浮標若為了觀測波浪，則感測器僅需配備 GNSS 接收器，不需傾角計。若為了觀測潮位，則感測器除 GNSS 接收器外，尚需配備傾角計，除非 GNSS 天線安裝高度與平均海面高度相等，或是能接受傾斜運動引起之潮位誤差。

7. 解算成功率門檻值分別與示性波高最大絕對差異及有效資料比例呈現負相關，當容許的示性波高最大絕對差異為 28 cm 時，可選取解算成功率在 0.70 以上的資料分析波浪，此時有效資料比例為 74.4%。
8. 由小琉球海域現場試驗得知在颱風引起的示性波高接近 7 m 情形下，GNSS 與 ATC 波浪儀觀測之示性波高一致。

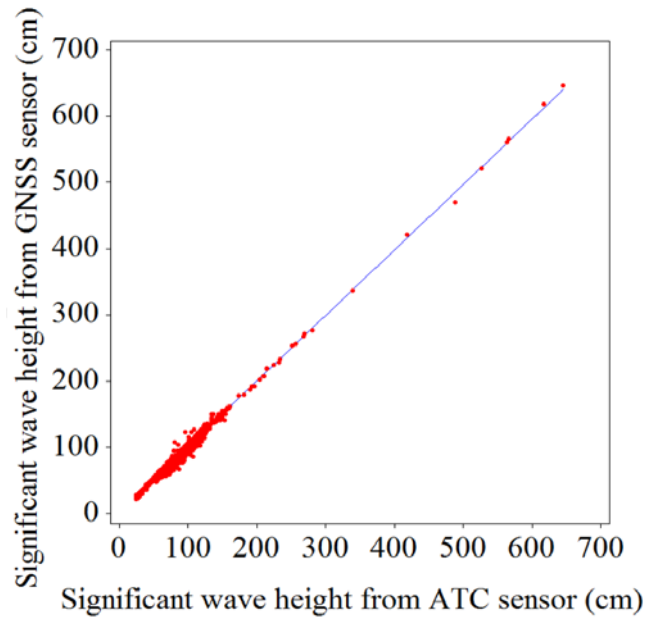


圖 9 小琉球浮標試驗之 GNSS 對 ATC 示性波高散布圖

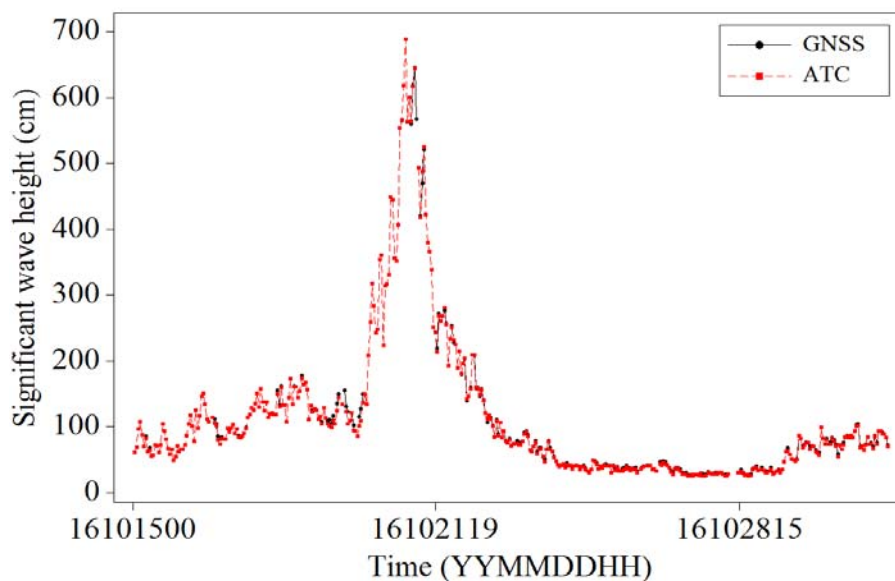


圖 10 小琉球浮標試驗之 GNSS 與 ATC 示性波高逐時時間序列圖

謝 誌

本論文採用之 2015 年灣裡試驗資料係「台南高雄海堤溢淹越波預警系統驗證及建置(1/2)」委託專業服務計畫之部分觀測成果，承蒙經濟部水利署第六河川局經費之補助使本研究得以進行現場作業。永安潮位資料係為經濟部水利署近海水文觀測計畫之成果。2016 年小琉球試驗資料承蒙交通部中央氣象局購買 GNSS 設備安裝於小琉球浮標進行觀測，謹向上述單位致謝。

參考文獻

- Dawidowicz, K. (2014) "Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts," *Acta Adriatica*, Vol. 55(2), pp. 145-161.
- Garrison, T. (2013) *Oceanography - An invitation to marine science*, Brooks/Cole, Cengage Learning, eighth edition.
- Gommenginger, C., et al. (2003) "Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model," *Geophysical research letters*, Vol. 30(22), doi:10.1029/2003GL017743.
- Lin, Y.-P., Chen, S.-H., Huang, C.-J., and Kao, C. C. (2014) "Development of a GPS buoy for monitoring tides and ocean waves," *Proceedings of Conference on Weather Analysis and Forecasting 2014*, Taipei, Taiwan, A8-18, pp. 1-6. (In Chinese)
- Lin, Y.-P., Chen, S.-H., Tang, S.-T., and Huang, C.-J. (2012) "Real-time observation of tide with a GPS buoy," *Proceedings of the 34th Ocean Engineering Conference in Taiwan*, Tainan, Taiwan, pp. 745-749. (In Chinese)
- Lin, Y.-P., Fan, Y.-M., and Wu, L.-C. (2015) "Innovative technologies for safer coasts in observation and forecasting," *Journal of Ocean and Underwater Technology*, Vol. 25(2), pp. 37-45. (In Chinese)
- Lin, Y.-P., Huang, C.-J., and Chen, S.-H. (2014) "Development of a GPS buoy for monitoring water surface elevations at estuaries," *OCEANS 2014 - TAIPEI, IEEE*, pp. 1-6.
- 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*, Vol. 17, 172, doi:10.3390/s17010172.
- MacIsaac, C., and Naeth, S. (2013) "TRIAXYS next wave II directional wave sensor - the evolution of wave measurements," *OCEANS 2013 - San Diego, IEEE*, pp. 1-8.
- Milbert, D. G., and Smith, D. A. (1996) "Converting GPS height into NAVD88 elevation with the GEOID96 geoid height model," *Proc GIS/LIS '96 Ann Conf, Denver, 19-21 Nov. American Congress on Surveying and Mapping, Washington, DC*, pp. 681-692.
- National Land Surveying and Mapping Center, Ministry of the Interior, R.O.C. (Taiwan) (2017) Operating procedures

- and the configuration guide for VBS-RTK service, Available online: <http://www.egnss.nlsc.gov.tw/content.aspx?i=20150625102717820> (accessed on 5 April 2017). (In Chinese)
- National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce (2017) Tides and currents - products - water levels, Available online: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/stations.html?type=Water+Levels> (accessed on 6 April 2017).
- Topcon Positioning Systems Inc. (2013) *GRIL Reference Manual*, Topcon Positioning Systems, Inc.: Livermore, CA, USA.
- Watson, C. S. (2005) *Satellite altimeter calibration and validation using GPS buoy technology*, PhD Thesis, University of Tasmania.
- Wikipedia (2017) Ship motions, Available online: https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_motions (accessed on 6 June 2017).
- Wu, C.-T., Hsiao, C.-Y., and Hsieh, P.-S. (2013) "Using UAV and VBS-RTK for rapid reconstruction of environmental 3D elevation data of the Typhoon Morakot disaster area and disaster scale assessment," *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, Vol. 44(1), pp. 23-33.

Manuscript Received: Aug. 11, 2017
Revision Received: Oct. 16, 2017
and Accepted: Oct. 30, 2017