

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

以 GPS 決定船姿態角改善船載海面高

GPS determination of ship attitude for improving  
shipborne sea surface height



研究生：翟邦和

指導教授：黃金維

中華民國一〇一年七月

# 以 GPS 決定船姿態角改善船載海面高

研究生：翟邦和

指導教授：黃金維

國立交通大學土木工程學系

## 摘要

本研究於船測重力計畫之船上建立一多天線 GPS 系統獲取取樣間隔 1 Hz 之觀測資料，以 TRACK 進行動態差分定位解算，而後進行船隻運動姿態解算，解算方法為姿態角直接解法(Direct Computation Formulas, DCF)；而後以此姿態角成果對天線垂距作改正，得時變天線垂距改正量，再應用時變天線垂距於海面高(Sea Surface Height, SSH)改正。本研究撰寫了一 FORTRAN 程式，處理資料時間比對、解算天線相位中心間距離、解算船隻運動姿態、使用姿態成果取得時變天線垂距並以其改正海面高。TRACK 定位成果在靜態長距離基線中精度可達約 1 公分；動態船隻基線則可達約 2 公分。姿態角成果與同時於船上施測之 INS/GPS 整合系統所得成果進行比較，其成果顯示多天線 GPS 系統與 INS/GPS 整合系統之航向角差異甚小，故知此多天線 GPS 系統搭配姿態角直接解法於求取船隻運動姿態上是可行之方法。時變天線垂距改正海面高成果則以交叉點分析、與 DTU10 之差值分析進行比較：與平均海水面 DTU10 之差值，於直線航線上標準差約改善 0.7 公分，改善比率約為 3.45%，於轉向航線上標準差約改善 1.4 公分，改善比率約為 4.07%；交叉點分析方面，方均根值改善約 0.5 公分，比率為 3.31%。

**關鍵字：**船載海面高；姿態；多天線 GPS 系統；INS/GPS 整合系統

# GPS determination of ship attitude for improving shipborne sea surface height

Student : Pang Ho Jai

Advisor : Dr. Cheinway Hwang

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

In this research, a GPS multi-antenna system has been built in the campaigns of collecting shipborne gravity with 1-Hz data rate. The positioning package TRACK is used for kinematic relative positioning (KRP). The assessment of baseline length suggests that the accuracy of KRP from TRACK reaches 1cm in a static condition and 2 cm on a ship. A computer program has been built to compute ship attitudes from kinematic baselines by the direct computation formulas (DCF). The estimated attitudes are used to correct for the antenna height to the sea surface due to attitude effect. The comparison between GPS and GPS/INS-derived attitudes suggest that GPS attitude system and DCF function properly. With the attitude effect accounted, the RMS crossover differences of the corrected SSHs are improved by 0.5 cm, or 3.31% relatively, compared to the case of raw SSHs. With the ocean tide corrected, the difference between corrected SSHs and DTU10 modeled values are reduced by 0.7 cm in standard deviation along straight survey lines, and by 1.4 cm along non-straight lines, corresponding to relative improvements of 3.45% and 4.07%, respectively.

**Keywords:** shipborne sea surface height; attitude; kinematic relative positioning; multi-antenna GPS system; integrated INS/GPS system

## 誌謝

6年，隨著碩士論文的完成，在交大當學生的日子也跟著結束了，在這裡畢業了兩次，大學和碩班。碩班這兩年，要感謝很多人，首先就是指導教授黃金維老師，在他適時的指引方向和悉心指導下，讓我能確定目標和前進的方向，他也常與我討論關於我未來的人生規劃，並給予我許多的建議，讓我在專業領域以及生活態度上都收穫良多。非常感謝台北大學的陳國華老師，他辛苦的往來新竹台北指導並給予許多建議，為我節省了許多摸索的時間。還有成功大學的江凱偉老師與小黑學長，教導我並提供我重要的研究數據，讓這篇論文能夠順利完成。

最要感謝的是爸媽和家人們的體諒、支持和期盼，你們的關心是我努力的動力，你們的拉拔和栽培造就出現在的我，未來我會努力的不讓你們失望的。

兩年時間，啟訓學長是我想感謝最多的人，他陪我走過低潮，也陪著我一起研究，如果沒有他，我就沒有現在的成果，我從他那邊得到了許多，真的是由衷的感謝，希望未來有機會能夠好好的報答學長。感謝逸如學姊，我回到交大的時候正好是她要離開的時候，但後續她仍給了我許多的幫助和解答我許多的疑惑。善解人意的綉雯，陪我聊了很多也幫了我很多忙；辛苦耐勞的恩銘學長，在我碩一的時候幫了我許多的忙；聰明絕頂的詠升，除了課業上的幫忙，也讓大家常常笑開懷，沒想到當初我講的小鄭博居然一語成讖了；開朗大方又美麗的雅琦，我對妳的感謝妳懂的；謝謝鎧凱和元旻的許多幫忙；真的很感謝研究室的大家，許多開心的回憶和大家庭一般的感覺，真的很棒！

謝謝女友小葉，她是支持我的最大原動力，每天的陪伴和打氣加油是我最後關頭能一直堅持的大功臣，把我從沮喪和混亂中一次次的扶起，還有她對我的信心我自己還多讓我能夠一直督促著自己，辛苦妳了，謝謝妳。聖翔，對你的感謝就不在這裡多說了。碩班的同學們，世涵、薇帆、柏溶、伶蓓、郁珊、昭儀、詠升，很懷念那些一起趕作業、專題報告和拼命寫大抄的日子，謝謝你們，祝大家鵬程萬里。

# 目錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 論文架構	4
第二章 理論基礎	5
2.1 座標系統	5
2.1.1 地心地固座標框架 (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)	5
2.1.2 區域水平座標框架(Local level frame coordinate system, LLF)	6
2.1.3 載體座標框架(Vehicle frame coordinate system, VF)	6
2.1.4 天線座標框架(Antenna body frame coordinate system, ABF)	7
2.2 座標框架轉換	8
2.2.1 旋轉矩陣介紹與區域水平座標框架、天線座標框架轉換	8
2.2.2 地心地固座標框架之直角坐標系、大地坐標系轉換	11
2.2.3 地心地固座標框架與區域水平座標框架轉換	12
2.3 姿態角解算: 直接解法(Direct Computation Formulas, DCF)	12
2.4 姿態角改正天線垂距	14
第三章 船動態定位原理與方法	17
3.1 全球衛星定位系統	17
3.2 相對定位: 動態差分定位	19

3.3 TRACK GPS 動態差分定位解算	21
3.4 TRACK 動態定位精度檢核分析	25
3.4.1 靜態測試	25
3.4.2 外部精度評估	27
3.4.3 TRACK 內部精度評估	33
3.5 改正模式	34
3.5.1 海潮改正模式	34
3.5.2 固體潮改正模式	34
3.5.3 濾波	35
第四章 GPS 與 INS/GPS 資料計算	36
4.1 研究區域簡介	36
4.1.1 施測範圍、儀器、測量船隻簡介	36
4.2 施測與計算方法	41
4.2.1 GPS	41
4.2.2 整合式 INS/GPS 系統	45
4.3 GPS 船載海面高	49
第五章 研究成果及分析	51
5.1 姿態角解算成果	51
5.2 海面高改正成果	63
5.2.1 與平均海水面模式 DTU10 MSS 差異分析	63
5.2.2 交叉點分析	76
第六章 結論與建議	78
6.1 結論	78
6.2 建議	79
第七章 參考文獻	81

## 圖目錄

圖 2.1 當地水平座標框架(LOCAL LEVEL FRAME COORDINATE SYSTEM)示意圖.....	6
圖 2.2 載體座標框架(THE VEHICLE FRAME COORDINATE SYSTEM)示意圖.....	7
圖 2.3 天線座標框架(ANTENNA BODY FRAME COORDINATE SYSTEM)示意圖.....	8
圖 2.4 船載 GPS 天線垂距示意圖.....	15
圖 2.5 GPS 姿態角改正天線垂距示意圖.....	16
圖 3.1 GPS 相對定位示意圖.....	19
圖 3.2 TRACK 動態差分處理流程圖.....	22
圖 3.3 2012 年 DOY135 基線 VR01-SHMN 之殘差.....	26
圖 3.4 2012 年 DOY135 基線 HL01-SHMN 之殘差.....	27
圖 3.5 2012 年 DOY135 基線 HL01-VR01 之殘差.....	27
圖 3.6 TRACK 定位成果計算所得 DC 基線長與全測儀觀測值之差異。.....	30
圖 3.7 TRACK 定位成果計算所得 DA 基線長與全測儀觀測值之差異。.....	31
圖 3.8 TRACK 定位成果計算所得 AC 基線長與全測儀觀測值之差異。.....	32
圖 3.9 TRACK 解算 2012 DOY136 之橢球高、天頂距對流層延遲量及軟體內部精 度.....	33
圖 4.1 2012 年近岸船載重力計畫航線規劃圖(摘自內政部 101 年度臺灣本島近岸 船載重力計畫書).....	37
圖 4.2 2012 年近岸船載重力計畫實際施測航線圖.....	38
圖 4.3 尖再發號船體外觀.....	39
圖 4.4 上為實驗儀器於船隻上架設位置圖、下為全測儀施測數據圖，紅色圓圈及 A、B、C、D 為 GPS 接收天線位置，2 綠色圓圈為 IMU 及其 GNSS 天線位 置。.....	40
圖 4.5 岸基站樁標埋設示意圖.....	42
圖 4.6 GPS 資料處理流程圖.....	43
圖 4.7 GPS 動態定位成果應用、改正及分析流程.....	44
圖 4.8 CAINS-21 軟體使用之改良閉合式鬆耦合架構(摘自內政部 100 年度發展與 應用多平台遙測製圖技術工作案總報告書，江凱偉等人，2011).....	48
圖 4.9 船載海面高測量與衛星測高原理圖(陳逸如，2010).....	49
圖 5.1 DOY135 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖.....	52
圖 5.2 DOY135 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得.....	52
圖 5.3 DOY135 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角.....	53
圖 5.4 DOY135 GPS 系統解算所得之船隻側傾角.....	53
圖 5.5 DOY136 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖.....	54
圖 5.6 DOY136 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得.....	54

圖 5.7 DOY136 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角 .....	55
圖 5.8 DOY136 GPS 系統解算所得之船隻側傾角 .....	55
圖 5.9 DOY137 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖 .....	56
圖 5.10 DOY137 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得 .....	56
圖 5.11 DOY137 GPS 系統解算所得之船隻側傾角 .....	57
圖 5.12 DOY137 GPS 系統解算所得之船隻側傾角 .....	57
圖 5.13 DOY138 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖 .....	58
圖 5.14 DOY138 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得 .....	58
圖 5.15 DOY138 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角 .....	59
圖 5.16 DOY138 GPS 系統解算所得之船隻側傾角 .....	59
圖 5.17 DOY139 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖 .....	60
圖 5.18 DOY139 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得 .....	60
圖 5.19 DOY139 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角 .....	61
圖 5.20 DOY139 GPS 系統解算所得之船隻側傾角 .....	61
圖 5.21 DOY135 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值 .....	62
圖 5.22 DOY136 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值 .....	62
圖 5.23 DOY137 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值 .....	62
圖 5.24 DOY138 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值 .....	63
圖 5.25 DOY139 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值 .....	63
圖 5.26 2012 年 DOY135~139 船測編輯後所得直線航線圖 .....	66
圖 5.27 所選航線 ROUTE 01 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	67
圖 5.28 所選航線 ROUTE 04 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	67
圖 5.29 所選航線 ROUTE 06 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	67
圖 5.30 所選航線 ROUTE 08 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	68
圖 5.31 所選航線 ROUTE 09 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	68
圖 5.32 所選航線 ROUTE 10 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	68
圖 5.33 所選航線 ROUTE 11 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	69
圖 5.34 所選航線 ROUTE 12 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	69
圖 5.35 所選航線 ROUTE 13 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	69
圖 5.36 所選航線 ROUTE 14 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	70
圖 5.37 所選航線 ROUTE 15 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	70
圖 5.38 所選航線 ROUTE 16 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	70
圖 5.39 所選航線 ROUTE 17 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	71
圖 5.40 所選航線 ROUTE 18 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	71
圖 5.41 所選航線 ROUTE 20 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	71

圖 5.42 所選航線 ROUTE 22 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	72
圖 5.43 所選航線 ROUTE 24 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	72
圖 5.44 所選航線 ROUTE 26 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	72
圖 5.45 所選航線 ROUTE 27 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	73
圖 5.46 所選航線 ROUTE 28 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	73
圖 5.47 所選航線 ROUTE 29 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果 .....	73
圖 5.48 2012 年 DOY136 船測編輯後所得船轉向航線圖 .....	75
圖 5.49 交叉點差異量分析示意圖 .....	76



## 表目錄

表 1.1 近期船載測高研究之海水面高精度分析.....	3
表 3.1 HL01、SHMN、VR01、VR02 之經度(LON)、緯度(LAT)及高(H)之殘差值 統計.....	25
表 3.2 測站間組基線之基線長殘差值統計.....	26
表 3.3 全測儀基線長、TRACK 平均基線長、兩者差值.....	29
表 3.4 TRACK 基線長與全測儀所得基線長差異值統計.....	29
表 4.1 船載重力計畫選用船隻—尖再發號.....	39
表 4.2 測線起迄座標(摘自內政部 101 年度臺灣本島近岸船載重力計畫書).....	41
表 4.3 GPS、INS 及 INS/GPS 整合系統之特色比較.....	45
表 4.4 一般 INS/GNSS 整合架構的簡易比較(CHIANG, 2004).....	47
表 5.1 2012 年 DOY135~139 航向角(YAW) GPS 系統成果與 IMU 成果比較.....	62
表 5.2 2012 年 DOY135~139 船測姿態角改正前後分析.....	66
表 5.3 2012 年 DOY136 船測轉彎處姿態角改正成果分析.....	75
表 5.4 姿態角改正天線垂距前後海面高交叉點分析成果.....	76



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

海面高(sea surface height, SSH)為海洋及地球重力場應用中重要的一環。地球重力在許多研究領域中佔有著重要的位置,它能夠反映地球形狀和地殼結構的重要資訊;在大地測量領域,地球重力場除了能研究地球樣貌外,還可以確定高程座標;在地球物理領域,地球重力場的觀測資料可以用來探勘地層中可能的組成以發掘礦藏資源,還能夠對地震成因進行分析,此外也有學者嘗試利用觀測重力場的變化情形進行地震預測;在國防應用領域上也有相當重要的作用(施宣昶, 2004)。除了以相對或絕對重力儀等科技搜集陸地上的重力資訊外,海洋重力測量的資料亦可提供做為國家高精度基本測量、海洋資源開發、海面與海底工程設計和施工、海底地殼活動和海洋潮汐之研究等運用,故海洋重力測量具有相當之重要性。

船載測高與衛星測高的目的一致,主要為測定海洋大地水準面與海洋地形等資訊。衛星測高的原理為應用衛星測高儀取得瞬間海水面至衛星之間的高度,在選定一固定的參考橢球體之後,經過海潮改正,則可以獲得海水面與參考橢球體之間的海面高度,然而衛星測高在近岸地區,雷達波的雜訊相對放大許多,導致近岸區域的測高品質不佳,而船載測高則無此項問題,因此在近岸海面高資訊的獲取還是需要依靠船載測高技術。

本研究應用內政部「臺灣本島近岸船載重力測量」計畫中的船載定位GPS觀測資料,船載GPS獲得的橢球高度,經過天線垂距、海潮、固體潮等改正後,可以獲得與衛星測高相當性質的海面高。動態差分定位(Kinematic Relative Positioning, KRP)與精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)目前在海測上所得的定位精度表現相當接近(陳逸如, 2010),故本研究選擇以動態差分方法進行GPS定位解算。

過去在天線垂距改正項目上皆採取於出航前先行量測,而後在求算海水面高

時，便以GPS定位所得之橢球高減去此定值天線垂距；然而船隻在航行過程中必定會因船速及海況等因素而產生姿態的變化，此一變化使得船身傾斜，進而改變了GPS訊號接收天線相位中心到海水面的垂直距離，此垂直距離即為天線垂距改正所需改正之數值，倘若能得到船隻運動姿態的變化並將此姿態成果用於改正天線垂距，應能改善海面高之成果。本研究為解算船隻於施測時的運動姿態，除原船載重力計畫所裝設的GPS接收儀外，另外增設3組GPS接收儀，並使用姿態解直接解法進行姿態角的求解，然後將此姿態角成果應用於改正天線垂距，使其不再是一定值，而是一時變數值，期望能夠改善海面高之成果。

## 1.2 文獻回顧

船載測高，依Chadwell and Bock (2001)所提出之實驗結果，短基線GPS浮標測高經平滑化後精度為2.4公分；Rocken et al. (2005)提出的實驗成果，使用長基線船載儀器精度為10公分；Foster et al. (2009)所提出之實驗結果，使用TRACK解算1 Hz GPS資料之基線解海面高結果，與tidal height比較差異值RMS為9.3公分，使用濾波五分鐘達8.3公分；與model SSH做比較，差異值RMS為56公分，使用五分鐘濾波單窗差異值RMS達16.1公分；與model SSH做比較並引入驗潮站潮位資料改正後差異值RMS為69公分，使用五分鐘濾波單窗差異值RMS達13.3公分。Bouin et al. (2009)提出的研究成果，使用GAMIT解算1Hz船載GPS資料之交叉點海面高差異量為10~14公分，以Sea Level Anomalies, SLA改正後，相對於DNSC08所得RMS為27.3公分，相對於EGM08為21.1公分；陳逸如(2010)提出的實驗成果，使用Bernese PPP解算1 Hz船載GPS資料經平差後之交叉點海面高差異量，精度為2~16公分。相關文獻整理如表1.1所示。

而在GPS多天線系統解算姿態角方面，Lu(1995)提出以直接解法(Direct Computation Formulas, DCF)或最小二乘配至法(Implicit Least Squares, LSQ)進行姿態角解算，兩種方法各有其利弊，DCF之優點在於其解算快速，但只能針對已選取之3組GPS資料進行姿態角求解；LSQ之優點在於能對任意3組GPS資料進行

求解，多於之GPS觀測資料則可用作多餘觀測量，但其解算較為繁複且耗時。

表 1.1 近期船載測高研究之海水面高精度分析

案例	精度(公分)	經濾波或平滑化處理精度(公分)	參考資料
短基線 GPS 浮筒(buoy)研究	-	2.4	Chadwell and Bock, 2001
長基線船載研究設備	10	-	Rocken et al., 2005
1 Hz 船載 GPS 以動態基線解算海水面高，相對於所量測到的海潮訊號為參考面	9.3	8.3	Foster et al., 2009
1 Hz 船載 GPS 以動態基線解算海水面高，相對於一 SSH 模型為參考面	56	16.1	Foster et al., 2009
1 Hz 船載 GPS 以動態基線解算海水面高，相對於一 SSH 模型為參考面以及使用驗潮資料改正	69	13.3	Foster et al., 2009
1Hz 船載 GPS 以動態基線解算交叉點海面高差異量	10~14	-	Bouin et al., 2009
1Hz 船載 GPS 以動態基線解算並以 SLA 改正，相對於 DNSC08	27.3	-	Bouin et al., 2009
1Hz 船載 GPS 以動態基線解算並以 SLA 改正，相對於 EGM08	21.1	-	Bouin et al., 2009
1Hz 船載 GPS 以精密單點定位解算交叉點海面高差異量	-	2~16	陳逸如, 2010

## 1.3 論文架構

### 第一章：緒論

包括研究動機與目的、文獻回顧與本文章節架構之說明

### 第二章：座標框架轉換與姿態角解算方法

本章共分4個部分：說明本研究中所使用之各座標框架、各座標框架間相互轉換之方法、講述姿態角直接解法之理論、姿態角改正天線垂距之方法。

### 第三章：船動態定位原理與方法

本章主要重點在於說明GPS動態定位之原理和對定位成果進行精度分析：對全球衛星定位系統作一簡單介紹；講述動態差分定位之原理；介紹TRACK，本研究所使用之GPS動態差分解算軟體；TRACK定位成果精度分析；改正模式之介紹。

### 第四章：GPS與INS/GPS資料計算

本章說明2012年船載計畫之研究區域、使用之儀器；並簡介GPS系統、INS/GPS整合系統和各自作業流程；最後講述GPS船載海面高之基本原理。

### 第五章：研究成果及分析

此章共分兩大主題：姿態角解算成果與海面高改正成果。姿態角改正成果方面，先將GPS系統所得航向角與INS/GPS所得航向角進行比較，而後對於GPS系統之姿態角成果進行討論；海面高改正成果方面，以與側高衛星所得之平均海水面參考場DTU10比較、交叉點海面高差異值分析，共兩項進行討論。

### 第六章：結論與建議

## 第二章 理論基礎

### 2.1 座標系統

在定位、導航中，座標系統非常重要，因此將在此對本研究中所使用之座標系統進行介紹。

#### 2.1.1 地心地固座標框架 (Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)

地心地固座標框架與協議地球座標系統(Conventional Terrestrial System, CTS)之三軸相符合，亦稱為平均地球座標系統(Average Terrestrial System, AT)，為全球性之地心座標系統。依表達方式可分為直角座標系及大地座標系。直角座標系之原點為地球質量中心，系統 Z 軸平行於 BIH([Bureau International de l'Heure](#))定義之 CTP(Conventional International Pole)，X 軸為地心指向 BIH 定義之零子午圈(格林威治子午圈)與赤道面交點之方向，Y 軸則是與上述 X、Z 軸正交面構成一右旋正交系統(Seeber, 2003)，座標一般以(X, Y, Z)表示。目前美國的 GPS(Global Positioning System)所建立的 WGS84(World Geod,etic System 1984)座標系統即是協議地心地固座標系統的具體實現，是美國國防部的 GPS 廣播星曆和精密星曆的參考座標系統(Misra and Enge, 2011)。GPS 系統和慣性導航中所提到的地固座標框架通常是使用 WGS84 座標系統。(胡智祐, 2009)

大地座標系(Geodetic coordinate system)之定義為地球橢球的中心與地球質心重合，橢球的短軸與地球自轉軸相合，一般以 $(\phi_g, \lambda_g, h_g)$ 分別表示大地緯度、經度及橢球高。大地緯度 $\phi_g$ 定義為過地面點之橢球法線與橢球赤道面的夾角，大地經度 $\lambda_g$ 則是過地面點的橢球子午面與格林威治平大地子午面之間的夾角，橢球高 $h_g$ 是地面點沿橢球法線至橢球面之距離。

### 2.1.2 區域水平座標框架(Local level frame coordinate system, LLF)

當地水平座標框架的原點為測站的中心，在本文中為多天線系統中的主天線，Z軸的方向定義為測站的橢球面法線方向，Y軸指向地平北方(橢球子午圈方向)，X軸則與上述Z軸、Y軸組成一右旋正交座標框架，此三軸分別指向北、東、地，所以稱為NED(North-East-Down)座標系統。在此篇論文中所使用的則是另一三軸定義為東、北、天(East-North-Up, ENU)的座標系統(圖 2.1)，此座標系統在慣性導航系統中是被廣泛使用的當地水平座標框架，與NED座標系統不同的是其Z軸指向為橢球面法線的反方向，也就是當高程增加時Z軸是正向的。

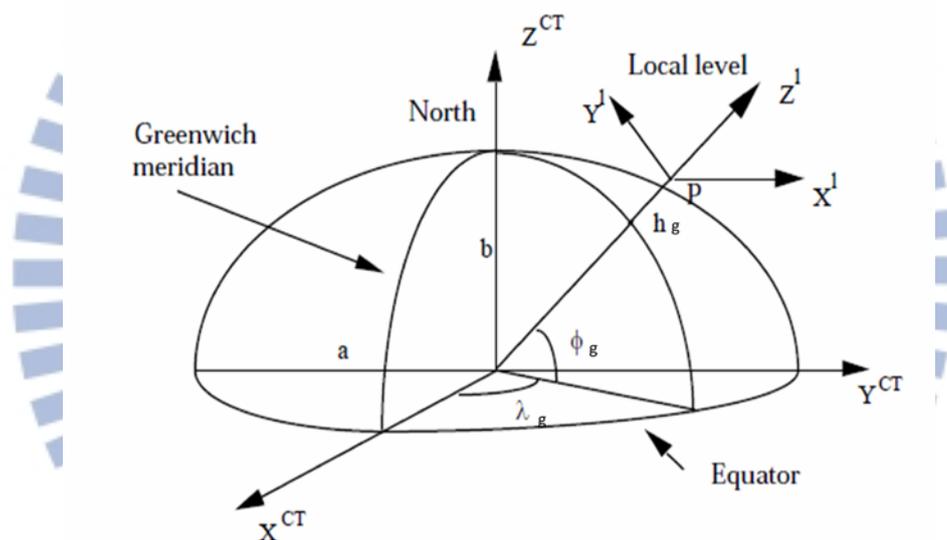


圖 2.1 當地水平座標框架(Local level frame coordinate system)示意圖

### 2.1.3 載體座標框架(Vehicle frame coordinate system, VF)

載體座標框架為一正交的座標框架，本文中所使用之載體為船，其X軸、Y軸分別指向載體的右側與前方，Z軸則與X軸、Y軸構成一右旋座標系統，此三軸即為載體的三正交軸，分別對應的旋轉角分別稱為pitch、roll及yaw(heading)，定義逆時鐘方向為正，如圖 2.2 所示。

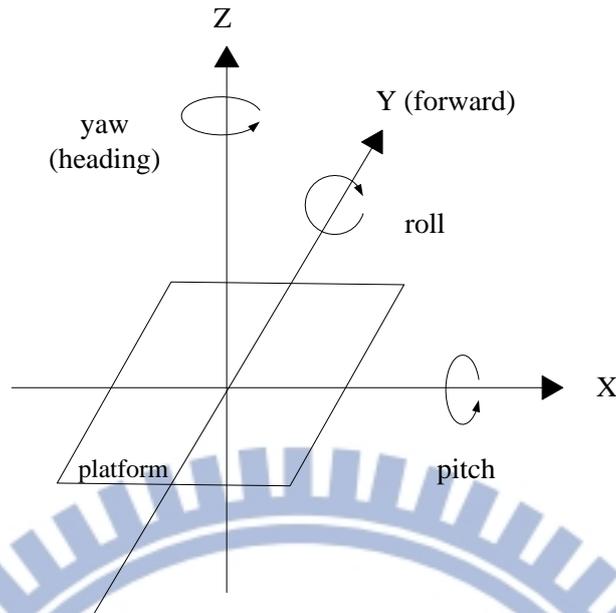


圖 2.2 載體座標框架(The vehicle frame coordinate system)示意圖

### 2.1.4 天線座標框架(Antenna body frame coordinate system, ABF)

基於空間中三個點可以定義一平面，天線座標框架就是選定三個 GPS 天線來組成一個面，當天線平面組成後，就可以定義出天線座標系統。假設載具上架設了三個 GPS 接收儀(天線)，分別為 Antenna 1(Ant1)、Antenna 2(Ant2)和 Antenna 3(Ant3)，將原點設定在 Ant1，意即其座標為(0, 0, 0)；Y 軸為沿 Ant1 至 Ant2 組成的基線(baseline)方向，因此 Ant2 之座標為(0,  $L_{12}$ , 0)，當中  $L_{12}$  為 Ant1 至 Ant2 之長度；X 軸則是在由 Ant1、Ant2 和 Ant3 組成的平面上，正交於 Y 軸並指向右方，Ant3 之座標是由向量  $\mathbf{Ant1Ant2}$ 、 $\mathbf{Ant1Ant3}$  及餘弦定理求出  $\alpha$  角後定義出而得( $L_{13}\sin\alpha$ ,  $L_{13}\cos\alpha$ , 0)；最後 Z 軸與上述 X 軸、Y 軸組成一右旋座標系統。這個座標系統也稱作自體座標框架(body frame coordinate system)。圖 2.3 為天線座標框架示意圖。

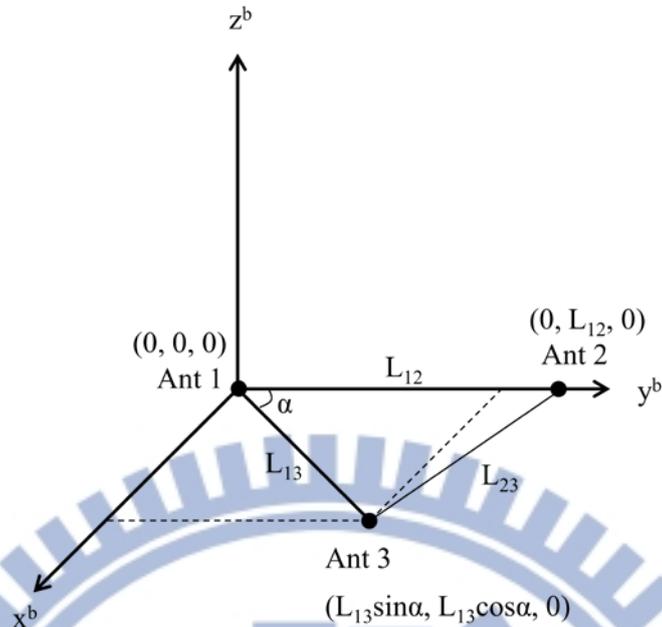


圖 2.3 天線座標框架(Antenna body frame coordinate system)示意圖

## 2.2 座標框架轉換

在慣性導航中，座標框架的轉換非常重要。本研究中所使用之 GPS 與 IMU 皆須經由座標框架的轉換，而後進行各種解算與比較。如本研究以 TRACK 所解算出之地心地固座標需轉換至當地水平座標框架下並利用天線座標系統才能進行姿態角的解算，而後修正海水面高時則須要使用到載體座標系統之概念。IMU 所量測到的值為慣性導航中最原始的觀測量  $f^b$ 、 $\omega_{ib}^b$ ，其所使用的座標框架為感測器座標系統，但在導航中，習慣上將座標轉換到當地水平座標框架或是地心地固座標框架上。

### 2.2.1 旋轉矩陣介紹與區域水平座標框架、天線座標框架轉換

本研究中所使用之座標系統皆為卡氏座標系統(Cartesian coordinates system)，要將兩個卡氏座標系統結合需經過兩種轉換，一是平移(translation)，另一是旋轉(rotation)，在姿態角的解算中，平移對座標系統的三軸方向不會有任何影響，故非此研究所關注之重點；旋轉則是座標軸系統轉換和求解姿態角的關鍵。以下將針對座標軸轉換的旋轉矩陣(rotation matrix)進行介紹。

假設兩卡氏座標系統原點相重合，但各自之三軸皆指向不同方向，兩者可透過 3 個旋轉矩陣分別針對三軸進行座標系統旋轉以達成目標 (Wertz et al., 1978; Schwarz and Krynski, 1992)

$$R_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \text{ 對 } x \text{ 軸旋轉} \quad (2.1a)$$

$$R_2(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \text{ 對 } y \text{ 軸旋轉} \quad (2.1b)$$

$$R_3(\theta_3) = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 對 } z \text{ 軸旋轉} \quad (2.1c)$$

(2.1a)、(2.1b)及(2.1c)分別為針對右旋系統之  $x$ 、 $y$  及  $z$  軸的旋轉矩陣依照旋轉順序的不同可以有各種旋轉矩陣。舉例來說，先對  $x$  軸做旋轉，接著對  $y'$  軸旋轉，最後對  $z''$  軸旋轉，這組旋轉矩陣以 1-2-3 ( $R_{123}$ ) 為名，即  $R_1(\theta_1)R_2(\theta_2)R_3(\theta_3)$ 。而在本研究中所使用之旋轉矩陣之排序為 3-1-2( $R_{312}$ )，這是在航海上及慣性導航中被廣泛使用的(Loncarevic, 1993; Wong, 1988)：

$$R_{312}(\psi, \phi, \lambda) = R_2(\lambda)R_1(\phi)R_3(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\lambda)\cos(\psi) - \sin(\lambda)\sin(\phi)\sin(\psi) & \cos(\lambda)\sin(\psi) + \sin(\lambda)\sin(\phi)\sin(\psi) & -\sin(\lambda)\cos(\phi) \\ -\cos(\phi)\sin(\psi) & \cos(\phi)\cos(\psi) & \sin(\phi) \\ \sin(\lambda)\cos(\psi) + \cos(\lambda)\sin(\phi)\sin(\psi) & \sin(\lambda)\sin(\psi) - \cos(\lambda)\sin(\phi)\cos(\psi) & \cos(\lambda)\cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

其中的旋轉角  $\phi$ 、 $\lambda$ 、 $\psi$  分別為尤拉角(Euler angles)中的俯仰角  $\phi$  (pitch)、側傾角  $\lambda$  (roll)、航向角  $\psi$  (yaw or heading)。

而各旋轉角與旋轉矩陣中元素  $R(i, j)$  之間的關係為：

$$\psi = -\tan^{-1}\left(\frac{R(2,1)}{R(2,2)}\right) \quad (2.3a)$$

$$\phi = \sin^{-1}(R(2,3)) \quad (2.3b)$$

$$\lambda = -\tan^{-1}\left(\frac{R(1,3)}{R(3,3)}\right) \quad (2.3c)$$

旋轉矩陣(2.2)可將參考座標中之向量轉換至目標座標系當中，譬如以區域水平座標系(LLF)之  $\begin{bmatrix} x^l & y^l & z^l \end{bmatrix}^T$  乘上旋轉矩陣後即可重合至自體座標框架(BF)上

$\begin{bmatrix} x^b & y^b & z^b \end{bmatrix}^T$ ，即：

$$\begin{bmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{bmatrix} = R_2(\lambda)R_1(\phi)R_3(\psi) \begin{bmatrix} x^l \\ y^l \\ z^l \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

旋轉矩陣有各種組合方式，但它們有共通的特性：正交性(Orthogonality)

$$R(\psi, \phi, \lambda)R^T(\psi, \phi, \lambda) = I \quad ; \quad R^{-1}(\psi, \phi, \lambda) = R^T(\psi, \phi, \lambda) \quad (2.5)$$

由其正交性可以清楚的知道旋轉矩陣中的 3 個元素  $\phi$ 、 $\lambda$  及  $\psi$  皆獨立，且其逆矩陣與轉置矩陣相等。若  $R(\psi, \phi, \lambda)$  為將參考座標系轉至體座標系之旋轉矩陣，

$R^T(\psi, \phi, \lambda)$  即為將體座標系轉至參考座標系之旋轉矩陣。

此外，旋轉矩陣之乘積亦為正交矩陣，如(2.6)所示：

$$R_H^I = R_G^I R_H^G \quad (2.6)$$

當中  $R'_G$  為將 G 座標框架轉至 I 座標框架之旋轉矩陣， $R^G_H$  為將 H 座標框架轉至 G 座標框架之旋轉矩陣，而  $R^I_H$  即是將 H 座標框架轉至 I 座標框架。

## 2.2.2 地心地固座標框架之直角坐標系、大地坐標系轉換

地面任一點之地固座標皆可以直角坐標系與大地坐標系展現，一般直角坐標系以  $(X, Y, Z)$  表示；大地座標系以  $(\phi_g, \lambda_g, h_g)$  表示，兩者轉換關係如下：

$$\begin{aligned} X &= (N+h) \cos \phi_g \cos \lambda_g \\ Y &= (N+h_g) \cos \phi_g \sin \lambda_g \\ Z &= [N(1-e^2) + \phi_g] \sin \phi_g \end{aligned} \quad (2.7)$$

當中  $N$  為參考橢球之卯酉圈曲率半徑， $e$  為參考橢球的第一偏心率：

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (2.8)$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_g)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.9)$$

$a$ 、 $b$  分別為參考橢球之長、短半徑。

直角座標轉換為大地座標：

$$\begin{aligned} \phi_g &= \tan^{-1} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} (1 - e^2 \frac{N}{N+h})^{-1} \\ \lambda_g &= \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ h_g &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \phi} - N \end{aligned} \quad (2.10)$$

其中  $\phi_g$  與  $h_g$  需漸進疊代計算。

### 2.2.3 地心地固座標框架與區域水平座標框架轉換

從地心地固座標框架轉換到區域水平座標框架如(2.11)：

$$R_{ECEF}^{LLF} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \varphi \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda & -\sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

由旋轉矩陣正交性可得區域水平座標框架至地心地固座標框架：

$$R_{LLF}^{ECEF} = (R_{ECEF}^{LLF})^T = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & -\cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

### 2.3 姿態角解算：直接解法(Direct Computation Formulas, DCF)

依照 2.1.2.1 節所示，解算姿態角參數於數學理論上的必要條件為每條基線都要有一組參考座標系和組成一天線座標系。GPS 多天線系統解算載具姿態，所使用的參考座標系統為區域水平座標系統，由 GPS 動態差分定位完成後轉換所得，而天線座標系統則是如 2.1.1.5 節定義一主天線為原點，再由另兩個 GPS 接收天線共同組成天線座標框架。在公式的推導上需要區域座標系及天線座標系，然而在實際解算上將只需要區域座標系之定位座標，此節將詳細解說。

此節中以  $A_i^b = [x_i^b \ y_i^b \ z_i^b]^T$  代表天線座標框架之座標、 $A_i^l = [x_i^l \ y_i^l \ z_i^l]^T$  代表區域水平座標框架之座標。天線座標框架的定義如 2.1.1.節及圖 2.X 所示，乃以 Antenna 1 為原點、Antenna 1 至 Antenna 2 基線方向為 y 軸；區域水平座標框架之定義則如 2.1.1.3 節中所述，東、北、天(East-North-Up, ENU)的右旋座標系統。而根據以上座標框架定義可得：

$$A_2^b = [x_2^b \quad y_2^b \quad z_2^b]^T = [0 \quad L_{12} \quad 0]^T$$

$$A_3^b = [x_3^b \quad y_3^b \quad z_3^b]^T = [L_{13} \sin(\alpha) \quad L_{13} \cos(\alpha) \quad 0]^T$$

$$A_2^l = [x_2^l \quad y_2^l \quad z_2^l]^T = [E_2 \quad N_2 \quad U_2]^T$$

$$A_3^l = [x_3^l \quad y_3^l \quad z_3^l]^T = [E_3 \quad N_3 \quad U_3]^T$$

此兩座標系之間的轉換則如(2.13)所示：

$$A_i^b = R_2(\lambda)R_1(\phi)R_3(\psi)A_i^l \quad (2.13)$$

將  $A_2^b$  及  $A_2^l$  帶入(2.13)後可得到下式

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ N_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\phi) \sin(\psi) L_{12} \\ \cos(\phi) \cos(\psi) L_{12} \\ \sin(\phi) L_{12} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

由(2.14)中可推得航向角  $\psi$  及俯仰角  $\phi$  之公式：

$$\psi = -\tan^{-1}(E_2 / N_2) \quad (2.15)$$

$$\phi = -\tan^{-1}(U_2 / \sqrt{E_2^2 + N_2^2}) \quad (2.16)$$

當航向角  $\psi$  及俯仰角  $\phi$  求得後，接著以  $A_3^l R_3(\psi)$  將  $A_3^l$  對  $z$  軸旋轉  $\psi$  得  $A_3''$ ，而後以  $A_3'' R_1(\phi)$  對  $x'$  軸旋轉  $\phi$  得  $A_3''' = [E_3'' \quad N_3''' \quad U_3'' ]^T$ ，最後將  $A_3'''$  乘以  $R_2(\lambda)$  便可

得到  $A_3^b = [L_{13} \sin(\alpha) \quad L_{13} \cos(\alpha) \quad 0]^T$ ，而由於  $R_1(\phi)$ 、 $R_2(\lambda)$  及  $R_3(\psi)$  同樣皆為正交矩陣，故  $R_2^{-1}(\lambda) = R_2^T(\lambda)$ ，由此得：

$$\begin{bmatrix} E_3'' \\ N_3'' \\ U_3'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\lambda)L_{13} \sin(\alpha) \\ L_{12} \cos(\alpha) \\ -\sin(\lambda)L_{13} \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\lambda = -\tan^{-1}(U_3'' / E_3'') \quad (2.18)$$

方程式(2.15)、(2.16)及(2.18)即為求解姿態角之直接解法(DCF)。

## 2.4 姿態角改正天線垂距

船載 GPS 對海水面高之測量需要經過各種改正，包括定位精度的確定、海潮模式改正、固體潮改正及天線垂距改正等。本研究著重於增進天線垂距改正，以求改善海面高之測量成果。

現今一般處理天線垂距改正的方法是於船出航前對 GPS 天線相位中心至海水面之距離進行量測，而後以此量測所得之值為一常數定值作為天線垂距改正依據，這在理想狀況上是可行的；然而實際上，儘管船在航行施測期間已維持慢且穩定之船速，仍會因風浪造成船隻有幅度大小不一的擺動。三維空間中的擺動共分三方向：改變航行方向所造成的 Z 軸航向角  $\psi$  旋轉變化、因風浪及航行造成船身於 X 軸俯仰角  $\phi$ 、Y 軸側傾角  $\lambda$  的旋轉，如圖 2.4 所示。當中航向角  $\psi$  的變動並不會影響天線垂距，然而俯仰角  $\phi$  和側傾角  $\lambda$  則會使得 GPS 天線相對 Z-X 平面及 Z-Y 平面產生變動，進而改變真實天線垂距。

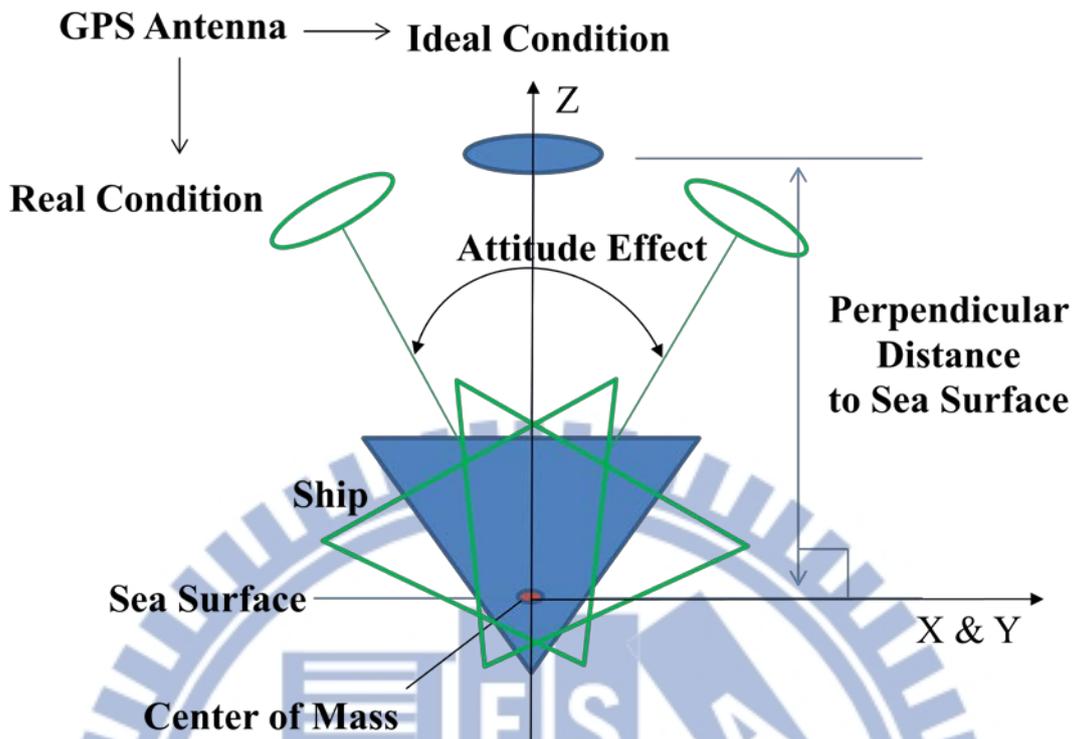


圖 2.4 船載 GPS 天線垂距示意圖

一般求海面高(SSH)的天線改正公式：

$$SSH = h - H^{con} \quad (2.19)$$

當中  $h$  為大地座標系之橢球高，即 TRACK 動態差分解算所得； $H^{con}$  表示船出航前所量得之天線垂距定值改正常數。而實際上船隻在運動狀態時，其天線垂距不可能為一定值，因此本研究藉由多天線 GPS 系統求得姿態角參數後，便可對天線垂距進行改正以取得各時刻之真實天線垂距，其改正示意圖如圖 2.5， $H^{con}$  表示船出航前所量得之天線垂距定值常數， $H_i^{att}$  則是經過姿態角修正後之天線垂距，紅色天線為該時刻 GPS 天線真實狀況，與 Z 軸有一夾角  $\theta$ ，而  $\theta$  為天線經過姿態角  $\phi$ 、 $\lambda$  的旋轉後與 Z 軸之夾角，黑色天線則表示船出航前之狀況。以下將論述如何透過船隻運動姿態角對天線垂距進行改正進而求得正確海面高(Jekeli,

2001) :

$$SSH_i^{corr} = h - H_i^{att} \quad (2.20)$$

$$H_i^{att} = [0 \ 0 \ 1][R_{312}E] = H^{con} \cos(\lambda) \cos(\phi) \quad (2.21)$$

$SSH_i^{corr}$  : 第  $i$  秒之改正後(corrected)海水面高，是利用橢球高  $h$  減掉第  $i$  秒經姿態角改正之天線垂距  $H_i^{att}$  後所得； $R_{312}$  為公式(2.2)之  $3 \times 3$  旋轉矩陣； $E$  :

$[0 \ 0 \ H^{con}]^T$ 。將(2.21)帶入(2.20)後得：

$$SSH_i^{corr} = h - H^{con} \cos(\lambda) \cos(\phi) \quad (2.22)$$

本研究在求得姿態角後即是利用(2.22)進行每一時刻之真實天線垂距改正，改正所得海面高成果將於第五章進行分析討論。

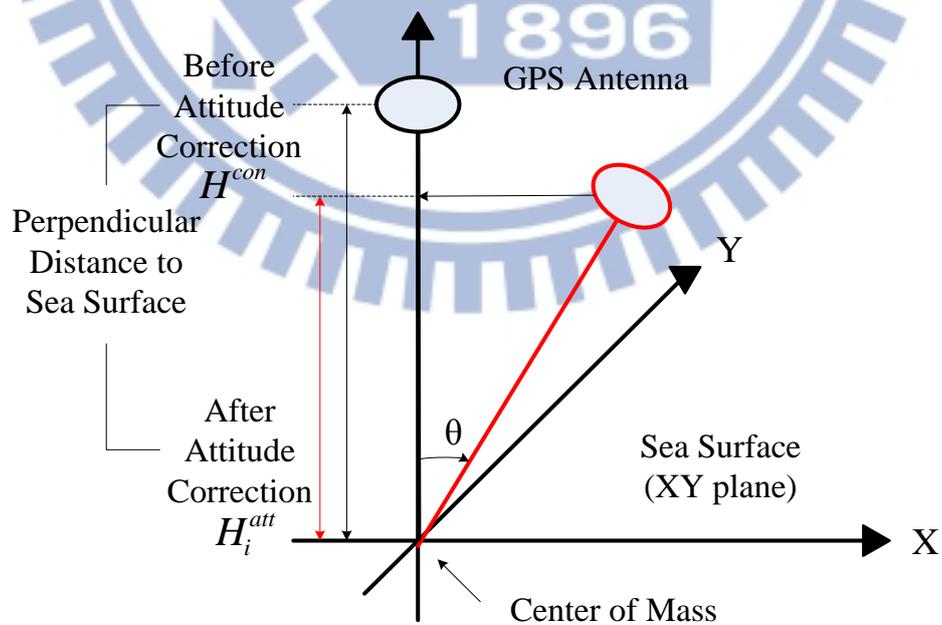


圖 2.5 GPS 姿態角改正天線垂距示意圖

## 第三章 船動態定位原理與方法

### 3.1 全球衛星定位系統

全球衛星定位系統 GPS(Global Positioning System)為美國國防部為軍事目地所發展之全球定位系統，而後開放給學術和商業等方面進行研究與應用，目前由 30 顆衛星分佈於 6 軌道面組成系統，其中 24 顆為操作衛星，6 顆為主動備用(active spare)衛星，意即除主衛星失效和加強星群幾何分佈的任務外，平時也可以由此 6 顆衛星的訊號進行定位。GPS 的定位原理是由地面接收儀接收 GPS 衛星所發射的無線電訊號，進行單程測距，解算未知點(接收儀)之三維空間座標。由於 GPS 定位除三維座標外，還有衛星和接收儀間的時錶誤差共 4 個未知數，因此至少需同時觀測 4 顆衛星才能用空間後方交會法進行求解，而 GPS 衛星的軌道設計正可使全球各地在任何時刻同時收到 4 顆衛星的訊號。

GPS 衛星到接收儀天線間的距離可由兩種訊號進行解算：電碼和載波相位。電碼觀測是利用衛星發射電碼訊號到接收儀間的時間差，得到衛星和接收儀天線之間的距離(Leick, 1994)。時間是利用接收儀自行產生與衛星發射訊號相同的虛擬訊號(Pseudo-Random Noise, PRN)，與接收衛星的訊號進行相關分配，當兩訊號達到最大相關時，將得到傳播訊號的時間延遲(time delay)，距離可由光速與所得知時間差的乘積得到。另一方面，距離也可利用載波訊號從衛星到接收儀間所傳遞的總波數，包含整數部分與非整數部分，與波長的乘積獲得(Langley, 1993)。非整數部分的波數可由接收儀接收的衛星訊號及接收儀內部振盪器的相位差得知。由衛星到接收器波數之整數部份我們稱之為整數週波值，為一未知且必須求得的數。若接收儀同時有載波及電碼訊號，通常兩者都會使用。

電碼與載波的頻率皆由基本頻率 10.23MHz 而來。P 電碼隻頻率為基本頻率；C/A 電碼(Coarse/Acquisition)則為基本頻率的十分之一(1.023MHz)。載波訊號 L1 頻率為基本頻率的 154 倍；L2 則為基本頻率的 120 倍。因此，C/A 電碼波長約為 293 公尺，P 電碼波長則為 29.3 公尺。載波訊號 L1 及 L2 之波長分別為 19 公

分及 24 公分。由於載波訊號波長比較電碼訊號為短，因此載波訊號在較要求高精度的應用上是比較被選擇使用的(El-Rabbany, 2002)。

GPS 定位方法有三大類：相對定位(relative positioning)，為本研究所使用之定位方法，將在 3.2 節中詳細介紹；單點定位(point positioning)，以單一觀測站所接收之衛星訊號進行定位，通常用於導航定位和即時定位。精密單點定位(Precise Point Positioning, PPP)是近來的一項趨勢，此技術廣泛應用於 GPS 動態定位中(Kouba and Heroux, 2001; Satirapod and Homniam, 2006; Ge et al., 2008)，使用了國際 GPS 服務機構(Global Navigation Satellite System, GNSS)所提供之 GPS 精密星曆和精密時錶誤差，以無電離層影響的載波相位和電碼組合觀測值為觀測資料，對測站的位置、接收儀時錶誤差、對流層延遲以及組合後的整數週波未定值等參數進行估算。使用者僅需使用一含雙頻雙碼 GPS 接收儀就可以作高精度的定位，唯 IGS 所提供之精密星曆需在數據接收後兩週才開放下載。PPP 必須採用精密的模型加以改正和使用輔助參數進行估計，例如衛星天線相位中心偏差修正、固體潮修正等。

GPS 之定位誤差來源共三大類，分別是衛星端誤差、訊號傳播誤差及接收設備相關誤差(包含人為)。衛星端誤差包含衛星軌道誤差及衛星時錶誤差，前者可透過使用高精度精密星曆消除，後者則透過差分運算消除。訊號傳播誤差包含電離層延遲誤差、對流層延遲誤差及多路徑效應，電離層延遲可利用雙頻觀測或軟體中的電離層模式進行消除；對流層延遲誤差又包含了乾、濕分量延遲，乾分量延遲約佔其中的 90%，一般的處理方法包括避免採用低角度之衛星觀測量，因此一般會設定在 15 度以上，另外會採用對流層數學模式加以修正；多路徑效應來自於接收天線週邊環境的反射訊號，透過架設天線時對周遭環境的注意、增加觀測時間或多餘觀測等即可將此誤差降低。接收設備誤差包含有觀測誤差、接收儀時錶誤差、週波未定值與週波脫落、天線相位中心位置偏差、天線高量測等，觀測誤差屬偶然誤差，透過適當增加觀測量即可減弱其影響；接收儀時錶誤差可由

差分處理消除；週波未定值與週波脫落經由 GPS 定位計算軟體即可偵測與解決；天線相位中心則須在施測前先行統一率定；天線高的測量是依靠人為觀測，只需小心觀測即可。

### 3.2 相對定位：動態差分定位

相對定位的基本原理在於使用兩部衛星訊號接收儀，其中一部需設置在已知座標點上，也就是衛星控制點，稱為主站或基站(base station)，而另一部則設置在待測座標點上，是為待測站或稱移動站(rover)。測得兩測站間的基線向量後，再根據主站的已知座標進行計算得到移動站座標，如圖 3.1 所示。若待測站在接收衛星訊號的過程中相對一固定點無任何位移量，即為靜態觀測；反之，若對一固定點處於運動狀態，即為動態觀測，此類差分定位稱為動態差分定位(Kinematic Relative Positioning, KRP)。

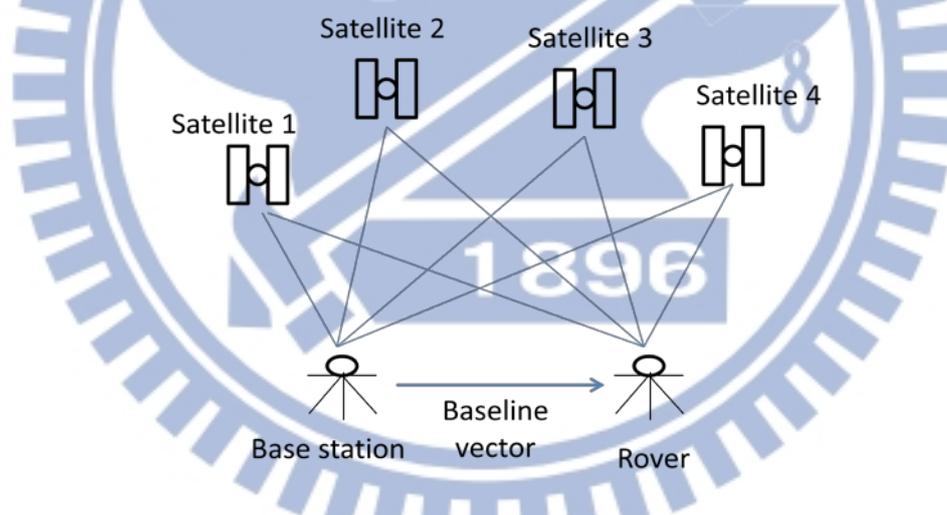


圖 3.6 GPS 相對定位示意圖

差分定位系統採用相對定位的原理，即同時對 2 個或 2 個以上的測點進行訊號接收和聯合解算，利用觀測方程式之間的相減消除多餘參數，如時錶誤差和電離層延遲誤差，再以此相減後之方程式進行必要參數的計算，如座標值，差方的方式可以藉此消除大部分測站間的共同誤差而獲得較高精度之定位成果。差分方式包含一次差、二次差、三次差，當中一次差可消除衛星時錶誤差及軌道誤差；二次差可更進一步消除接收儀時錶誤差；三次差則可消除週波未定值。以上差分

模式皆有助於減低固體潮影響、電離層以及對流層的延遲誤差(陳逸如, 2010)。而根據誤差改正量是即時或非即時傳給待測站,可分為即時動態差分 and 後處理動態差分,本研究所使用之方法即為後處理動態差分。

後處理動態差分將移動測站所收集之 GPS 數據寫入儲存設備,待測量任務完成後取出並使用軟體將基站與移動站之資料進行處理解算以達到差分目的。為了得到高精度的定位成果,可使用高精度的精密星曆進行解算,另外也可以對觀測資料的品質進行篩選,包括檢查載波相位資料品質、電碼資料品質、觀測資料平滑化、偵測週波脫落與週波脫落補償等(陳逸如, 2010)。本研究所使用之高精度精密星曆可由 IGS(International GNSS Service, <http://igsb.jpl.nasa.gov/>) 或 CODE(Center for Orbit Determination in Europe, <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>) 自行下載,IGS 及 CODE 免費提供各級精密星曆供各界使用,唯高精度精密星曆須於觀測當日起 12~18 日後方得下載。對於船載重力測量、地層下陷研究等非即時性但需要高精度的測量工作,後處理動態差分是較理想的選擇;其缺點為無及時通訊數據傳輸,無法即時獲得定位成果以檢視,意即若有操作疏失或數據資料品質不佳,沒辦法及時調整,必須重新施測。依據參考站數量分為兩類,單參考站及多參考站:單參考站為使用單一固定站作為相對定位的參考點(基站),與移動站進行二次差分解算,亦為本研究所使用之方法;多參考站為使用多個固定站作為相對定位的參考點,將觀測資料組成網形解算,此法有能夠穩定解算的特點,特別是在於靜態解算時能夠相當有效的提升待測點座標的精度,然而用於動態解算時,因待測站為持續移動變換座標位置之移動站,若要將所有移動路徑都組成網形進行解算,便會造成資料量龐大、運算耗時等問題(陳逸如, 2010)。

### 3.3 TRACK GPS 動態差分定位解算

本研究所使用之 GPS 定位解算軟體為 GAMIT/GLOBK 下之動態定位模組 TRACK。GAMIT/GLOBK 為美國麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)、美國加州大學聖地雅哥分校海洋科學研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)與 Harvard-Smithsonian 天文物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, CfA)共同研發之高精度 GPS 科學解算軟體(Herring et al., 2008)，而 TRACK 則是麻省理工學院地球、大氣與行星科學系(Department of Earth Atmospheric and Planetary Sciences, EAPS)所發展之解算動態 GPS 數據之後處理分析計算模組，作業環境需架構於 UNIX/Linux。所有 GAMIT、GLOBK 與 TRACK 相關使用資料與手冊皆可至其官網下載(<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>)。以下關於 TRACK 的介紹主要參考官網提供之文件檔並結合自行解算經驗。

TRACK 處理程序共分兩大部分，預處理與主要處理。TRACK 的執行是依靠一指令批次檔(command file)，預處理部分首先會需要讀取精密星曆檔(SP3/NAV file)以取得衛星軌道和時錶資訊，接著讀取觀測資料檔(Rinex Obs. file)處理其檔頭轉換為 TRACK 所需檔案格式並輸出 X file，接著先計算得一初步解以作後續應用；主要處理第一步先讀取觀測資料檔以及預處理中所得之 X file，而後先求解電碼解、週波未定值解算及週波脫落偵測、模式選定處理(AIR、SHORT、LONG)、載波相位求解、定位成果分析(Bad data)、成果輸出，最後除定位成果外同時也會有 TRACK 對解算成果之評估數據。處理流程如圖 3.2。

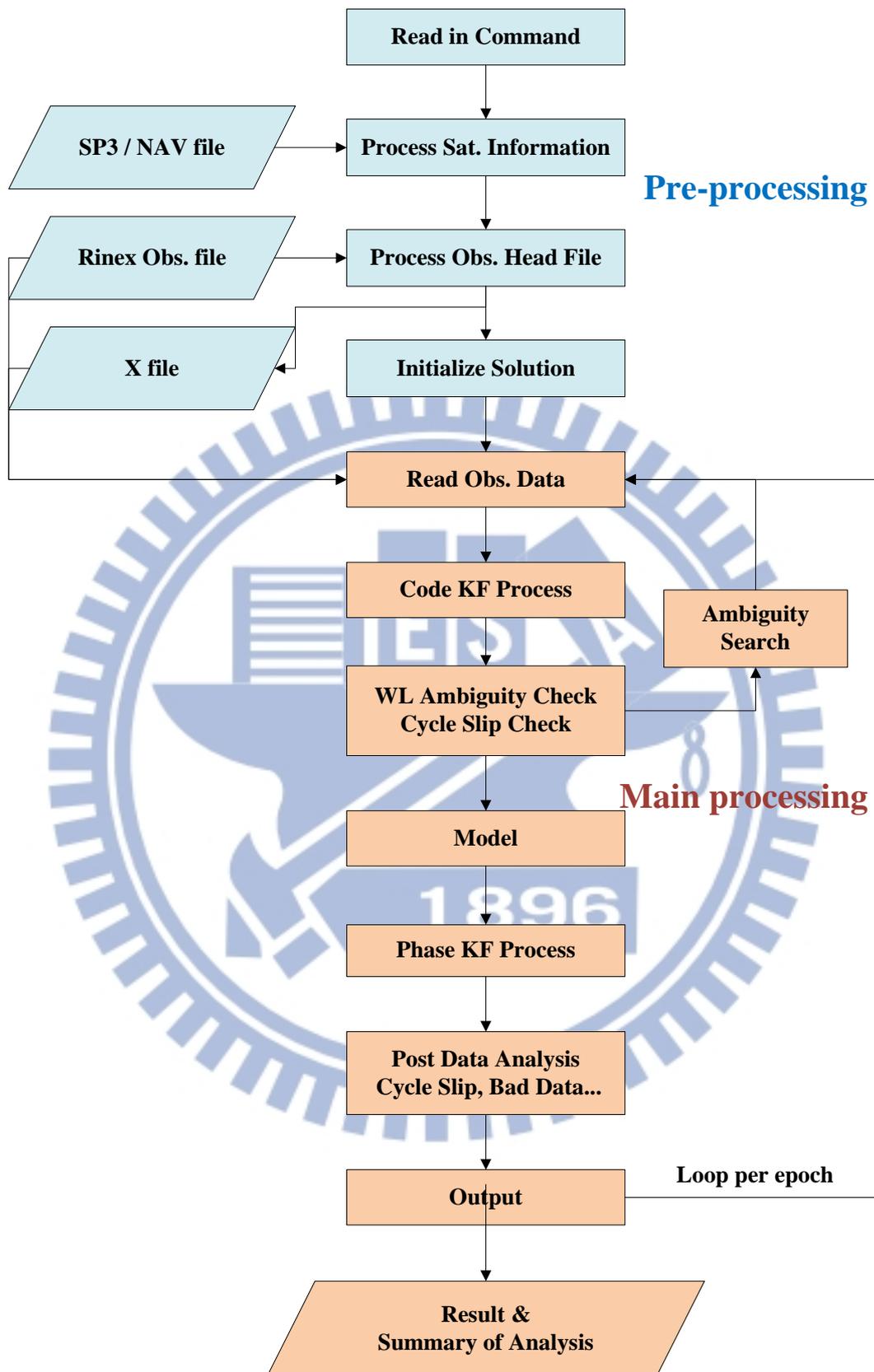


圖 3.7 TRACK 動態差分處理流程圖

TRACK 與其他 GPS 定位解算軟體的最大不同處在於它會預讀(pre-read)所有待處理數據資料，並透過這個步驟先進行快速求解，而後將此初步解用於卡曼濾波(Kalman Filter, KF)進行完整 GPS 動態資料解算。KF 主要原理為結合現在時刻的觀測量以及前一時刻對現在時刻的預測值，而後整合推估現在時刻未知數的最佳估計值，並遞迴更新估計值的變方矩陣，直至最末筆觀測資料。

動態差分的解算為使用一靜態基站座標解算待測之移動站座標，影響解算成功率的關鍵在於基站與待測站間之基線長度。一般而言，基線小於 10 km 者解算相當容易，因基站與移動站之大氣條件可視為相同，故其電離層誤差可設定為 0，而後分別求解 L1 與 L2 之整數週波未定值；而在基線大於 10 km 時，基站與移動站之大氣條件不在相同，而為了有效消除電離層延遲誤差，本研究以雙頻無電離層線性組合(Ionosphere Free Linear Combination, L3)觀測量進行相對差分定位，並使用軟體中 Melbourne-Wubena wide lane(MW-WL)模組進行 L1-L2 之整數週波未定值求解。本研究選擇使用 TRACK 的“relative-rank” (RR)演算法，並應用 Chi-squared 統計檢定方式訂定最佳的 L1 及 L2 整數週波未定值之接受門檻，再與次佳解進行比較，藉由統計測試過程決定最終的最佳解。Chi-squared 的統計測試將由以下二種指標決定：(1) LC (Linear Combination)線性組合的解；(2) MW-WL average value 寬巷平均值之解。對流層延遲誤差部分，TRACK 採用的大氣參數(條件)為標準大氣參數，其設定為溫度 25°C，壓力 1013.25 Mbar, 濕度 50%。而標準大氣模式未改正完善的部分，將由對流層修正模式之附加參數吸收(黃金維，2011)。

利用地面氣象資料(如壓力、溫度、濕度...等)代入初始的標準對流層折射誤差修正模式，如 Modified Hopfield、Saastmoinan...等，先進行對流層折射誤差的初步修正，而後選擇適當的歸算函數(Mapping Function)，配合附加適當數量的對流層附加參數吸收殘留的對流層誤差，將這些附加的參數與待求解的參數(點位坐標、速度及整數週波未定值)一起解算，可有效修正對流層折射誤差，提昇 GPS

高程測量的定位精度(Dodson, 1996)。本研究使用標準的 Modified Hopfield 改正模式(Goad and Goodman, 1974)，並引用附加對流層改正參數(每個測站每 1 小時附加 1 個改正參數)修正對流層折射之影響量，Modified Hopfield 改正模式如下：

$$\Delta \mathcal{G} = N_i^{Trop} \cdot \sum_{k=1}^9 \left( \frac{\alpha_{k,i}}{k} \cdot r_i^k \right) \cdot 10^{-6}, \quad i = 0 \sim 1 \quad (3.6)$$

其中， $\Delta \mathcal{G}$  為對流層誤差修正量， $N_i^{Trop}$ 、 $\alpha_{k,i}$ 、 $r_i^k$  分別為 Modified Hopfield Model 之使用參數。

因此，對觀測站  $k$  與衛星  $i$  而言，對流層折射延遲效應之修正量  $\Delta \mathcal{G}_k^i$  可表示成如下形式：

$$\Delta \mathcal{G}_{k,z=z_k^i}^i = f_{apr}(z_k^i) \cdot \Delta \mathcal{G}_{apr,k,z=0} + f(z_k^i) \cdot \Delta \mathcal{G}_{k,z=0}(t) \quad (3.7)$$

$\Delta \mathcal{G}_{apr,k,z=0}$ ：為初始模式於測站  $k$  天頂方向之修正量，如果使用標準的大氣資料(如標準氣壓、平均溫度、濕度等)，而未有實際之氣象資料，則此修正量與時間無關，僅與測站的高程有關。

$z_k^i$ ：為衛星  $i$  於測站  $k$  之天頂距。

$f_{apr}$ ：為初始模式的數學模式(Saastamoinen Model 或 Modified Hopfield Model)。

$\Delta \mathcal{G}_{k,z=0}(t)$ ：為測站  $k$  在天頂方向 Mapping Function 的附加參數，與時間有關。

$f(z_k^i)$ ：為 Mapping Function 的數學函數式(例如： $\frac{1}{\cos(z)}$ )。

(黃金維，2011)

### 3.4 TRACK 動態定位精度檢核分析

#### 3.4.1 靜態測試

為確立 TRACK 解算動態差分定位之能力，以確保其後續應用於本研究之可行性，故本研究選定 3 個一等衛星控制點進行靜態定位測試，分別為苗栗縣後龍(HL01)、新北市石門(SHMN)及彰化縣和美(VR01)，以新竹市南寮(SHJU)為主站進行解算，並分別就各自定位成果及組成基線長變化進行分析。所選用 GPS 資料時間為自 2012 年 DOY 135 之 00 時 00 分 00 秒開始約 6 小時 15 分鐘的數據，資料取樣頻率為 1 Hz。

各自定位成果乃指以所選各衛星控制點自身經 TRACK 解算所得之經度、緯度及橢球高評估每一控制點之定位精度。將以上各站、各項目與各自平均值相減得其殘差值(residual)後，殘差值中最大值(Max)、最小值(Min)、平均值(Mean)及 RMS 如表 3.1 所示。

表 3.2 HL01、SHMN、VR01、VR02 之經度(Lon)、緯度(Lat)及高(h)之殘差值統計

Station	Coordinate	Max	Min	Mean	RMS
HL01	Lon (degree)	3.155E-07	-3.045E-07	-6.772E-12	9.105E-08
	Lat (degree)	3.691E-07	-2.809E-07	-1.718E-12	9.805E-08
	h (m)	0.400	-0.215	3.607E-14	0.099
SHMN	Lon (degree)	3.859E-07	-3.640E-07	-4.085E-12	7.681E-08
	Lat (degree)	2.799E-07	-2.601E-07	-1.723E-12	9.900E-08
	h (m)	0.230	-0.166	-1.813E-13	0.070
VR01	Lon (degree)	4.115E-07	-3.685E-07	6.710E-11	1.178E-07
	Lat (degree)	4.932E-07	-3.768E-07	1.027E-10	1.086E-07
	h (m)	0.282	-0.267	-4.136E-05	0.083

將各站之間組成基線並計算基線長，得其平均基線長後再以每秒之成果與平均基線長相減得殘差分析如表 3.2 及圖 3.3 至 3.5 之成果。而由表 3.2 可知，在靜態狀況下，基線長度小於等於 169 公里左右時，其 RMS 表現都有 1 公分左右之精度。此部份成果將於下節中與船測動態成果作一綜合討論。

表 3.3 測站間組基線之基線長殘差值統計

Baseline	Mean Baseline Length (m)	Max (m)	Min (m)	Mean (m)	RMS (m)
VR01-SHMN	169115.456	0.039	-0.036	-4.546E-10	0.011
HL01-SHMN	107026.305	0.029	-0.038	-2.861E-09	0.008
HL01-VR01	65144.738	0.035	-0.033	-7.476E-11	0.011

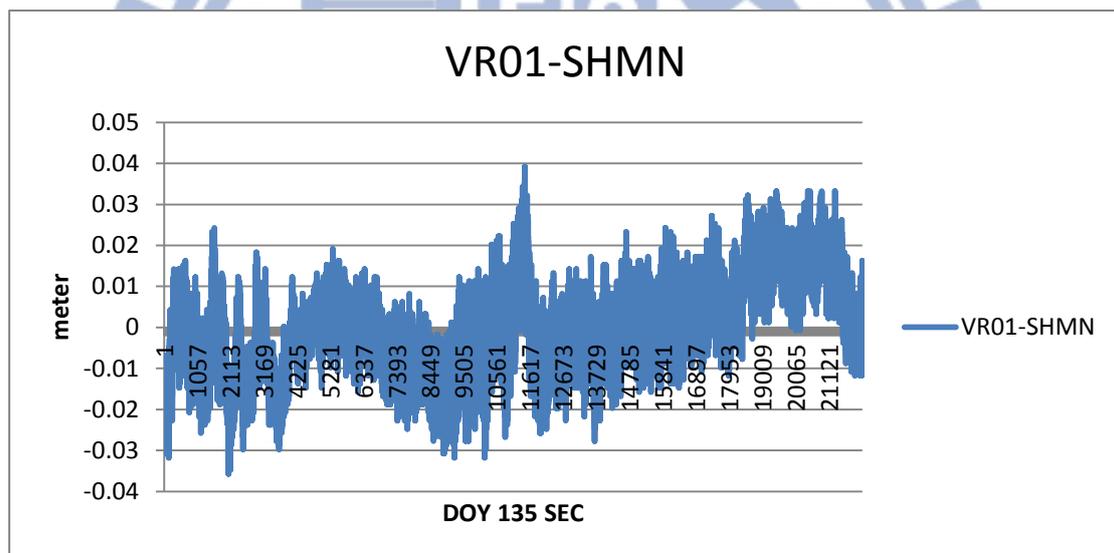


圖 3.8 2012 年 DOY135 基線 VR01-SHMN 之殘差

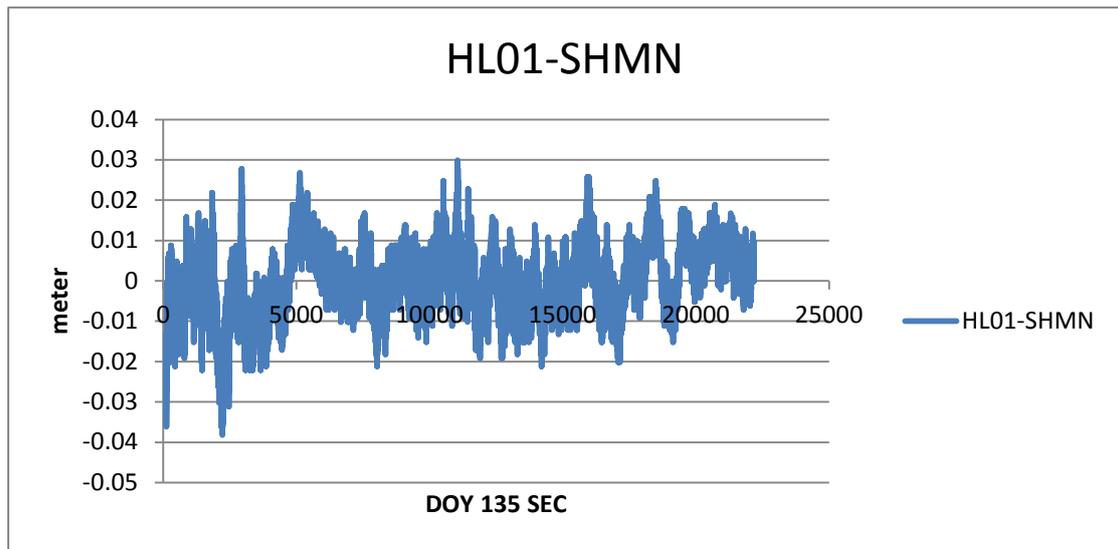


圖 3.9 2012 年 DOY135 基線 HL01-SHMN 之殘差

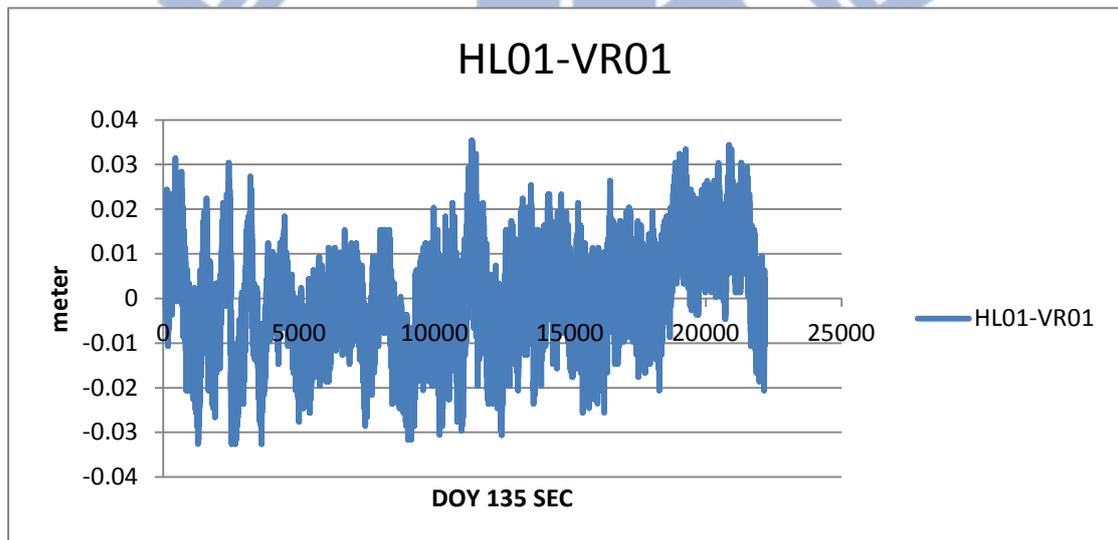


圖 3.10 2012 年 DOY135 基線 HL01-VR01 之殘差

### 3.4.2 外部精度評估

外部精度的驗證上，本研究以全測儀量測出的接收儀座標計算得出接收天線間的距離為比較基準。全測儀型號為 Trimble 601M，其測距精度為  $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ，經過如公式 3.8 的計算後可得出此次施測精度：

$$M = \pm(a + b \times D) \quad (3.8)$$

其中  $a$  為儀器固定誤差，即 2 mm，主要是由儀器加常數的測定誤差、對中誤差、測相誤差造成的，與測量的距離無關，意即不管施測的實際距離有多遠，全測儀都將存在不大於該值的固定誤差； $b \times D$  為比例誤差，即 2 ppm $\times$ D(km)，主要是由儀器頻率誤差、大氣折光差所引起， $D$  為全測儀實際施測的距離，單位為公里，即比例誤差會隨著實際施測距離以一定比例增加。本次實驗施測距離小於 10 公尺，經公式(3.8)的計算所得之施測精度約為 2.02 mm。

TRACK 的動態差分定位成果方面，將 2012 年 DOY135 至 DOY139 所得定位座標計算後得到 A、C、D 三天線相位中心之間的距離，共三個基線線段 DC、DA、AC，其平均值與全測儀量測之值約有 0.2~2.1 cm 的差值，由表 3.3 中可發現基線 DA 解算成果之平均值皆僅有 mm 級之差值，而基線 DC、AC 兩者解算成果之平均值卻與全測儀所得普遍有 1cm 以上的差異，因此推測可能是接收儀 C 所得資料品質稍差於 A 和 D。與比較基準(全測儀)相減後得到之殘差分析如表 3.4，RMS 的表現介於 1.6 cm 至 3.4 cm，平均約 2.1 cm；標準差則介於 1.3 cm 至 2.6 cm，平均約 1.9 cm，由此分析可知其精度可達公分級。圖 3.6 至圖 3.8 分別為 DOY135~DOY139 共 5 日由 TRACK 定位成果計算所得 DC、DA 及 AC 基線長減去全測儀觀測量之殘差值。

將 3.4.1 節中靜態長基線(百公里以上)之成果與此節動態短基線的成果作一比較分析：靜態長基線之 RMS 精度約為 1 公分，而動態短基線之 RMS 則約 2 公分，比較得短基線之成果較長基線差，這與一般長短基線解算成果之比較相反，推估原因為長基線雖達 169 公里，但其為靜態觀測，反觀短基線卻是在船載動態的狀況下，每一時刻皆在變動，因此使得短基線的精度表現不如長基線，也說明動態觀測條件下，精度表現會受到影響。

表 3.4 全測儀基線長、TRACK 平均基線長、兩者差值

Baseline	DOY	Total Station (m)	TRACK mean value (m)	Difference (m)
DC	135	1.989	2.007	0.018
	136		2.004	0.015
	137		2.002	0.013
	138		1.999	0.010
	139		2.000	0.011
DA	135	3.312	3.310	-0.002
	136		3.309	-0.003
	137		3.307	-0.004
	138		3.307	-0.005
	139		3.308	-0.004
AC	135	2.075	2.054	-0.021
	136		2.057	-0.018
	137		2.056	-0.019
	138		2.080	-0.012
	139		2.060	-0.015

表 3.5 TRACK 基線長與全測儀所得基線長差異值統計

DOY	Baseline	Max	Min	Mean	Std.	RMS
DOY135	DC	0.110	-0.053	0.018	0.013	0.022
	DA	0.062	-0.086	0.002	0.018	0.018
	AC	0.092	-0.125	-0.021	0.021	0.030
DOY136	DC	0.149	-0.083	0.015	0.014	0.020
	DA	0.171	-0.131	-0.003	0.016	0.022
	AC	0.246	-0.178	-0.018	0.023	0.025
DOY137	DC	0.082	-0.076	0.013	0.014	0.015
	DA	0.114	-0.103	-0.004	0.017	0.021
	AC	0.090	-0.155	0.019	0.023	0.024
DOY138	DC	0.097	-0.078	0.016	0.015	0.020
	DA	0.066	-0.109	0.005	0.019	0.020
	AC	0.090	-0.145	0.005	0.026	0.034
DOY139	DC	0.058	-0.067	0.011	0.014	0.017
	DA	0.069	-0.073	-0.004	0.015	0.016
	AC	0.064	-0.104	-0.015	0.018	0.024

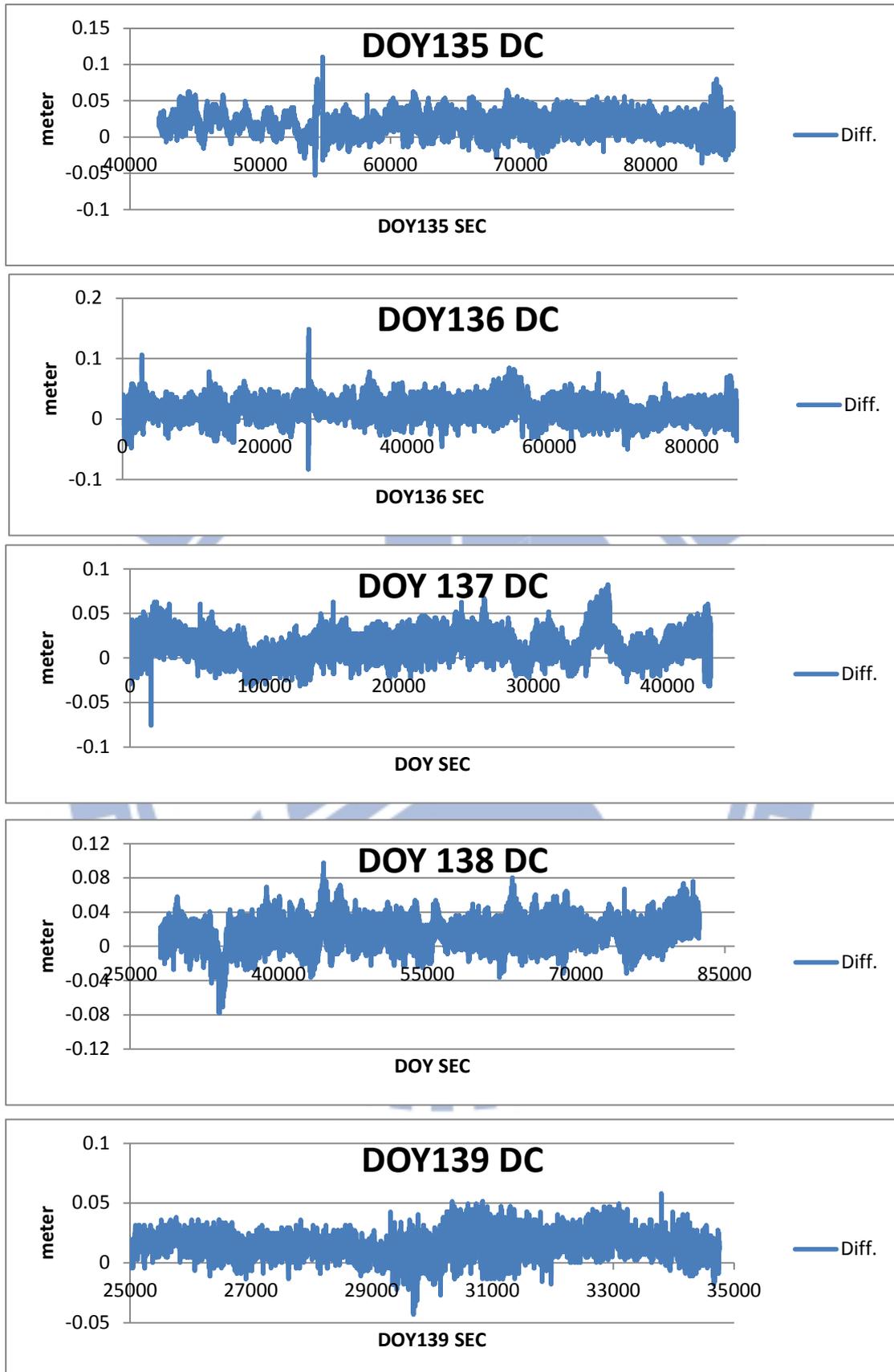


圖 3.11 TRACK 定位成果計算所得 DC 基線長與全測儀觀測值之差異。  
由上至下為 DOY135~DOY139。

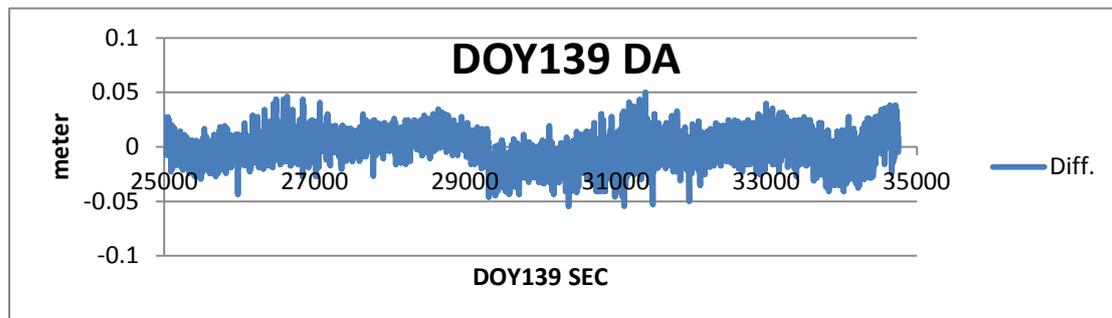
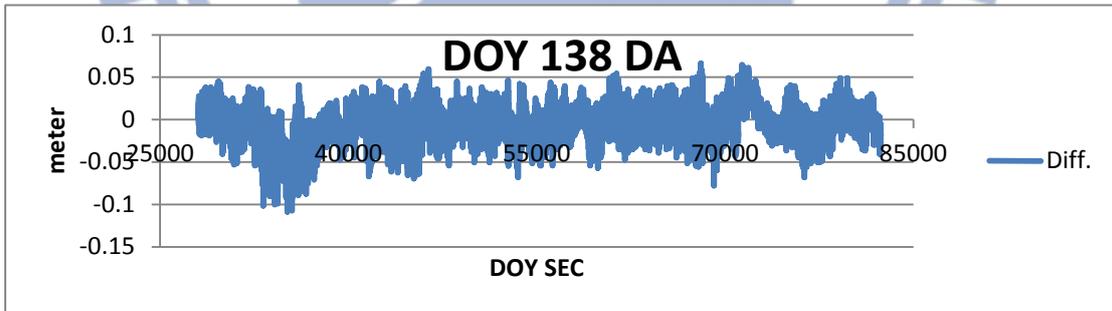
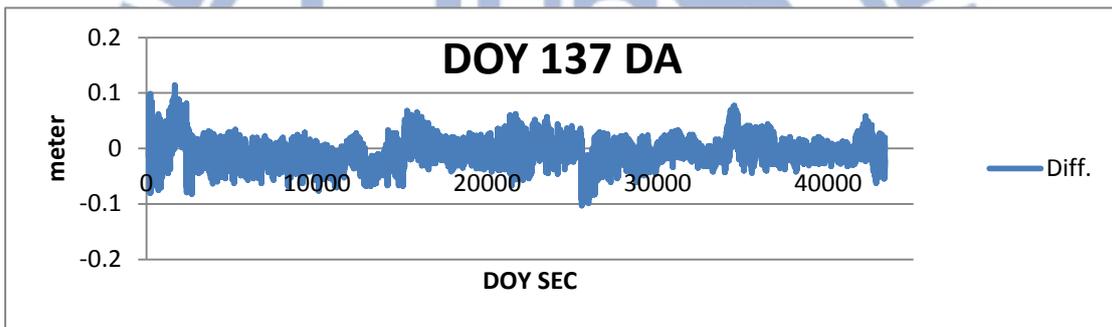
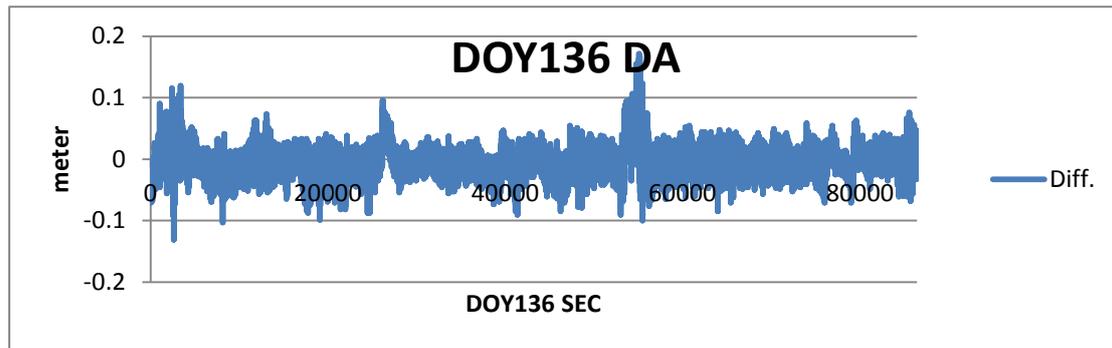
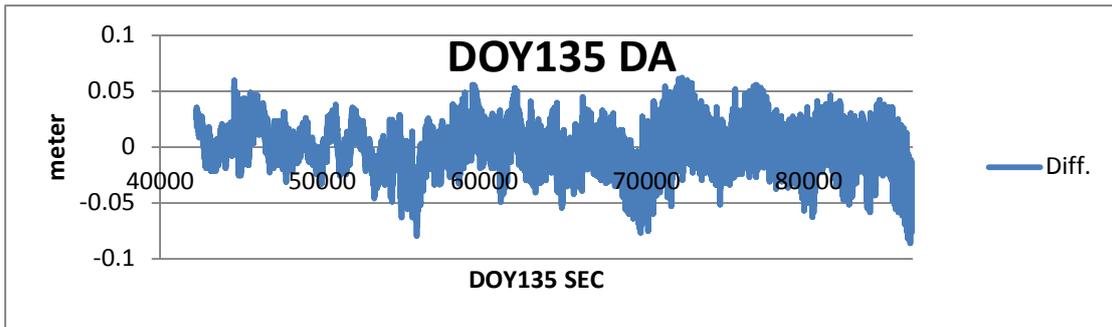


圖 3.12 TRACK 定位成果計算所得 DA 基線長與全測儀觀測值之差異。  
由上至下為 DOY135~DOY139。

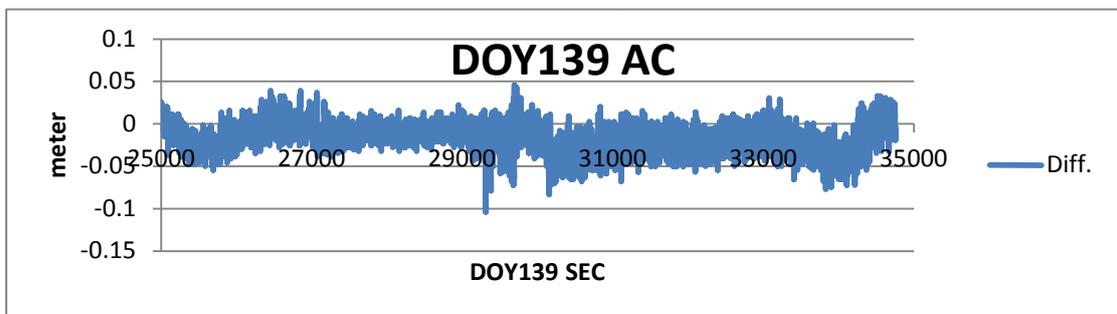
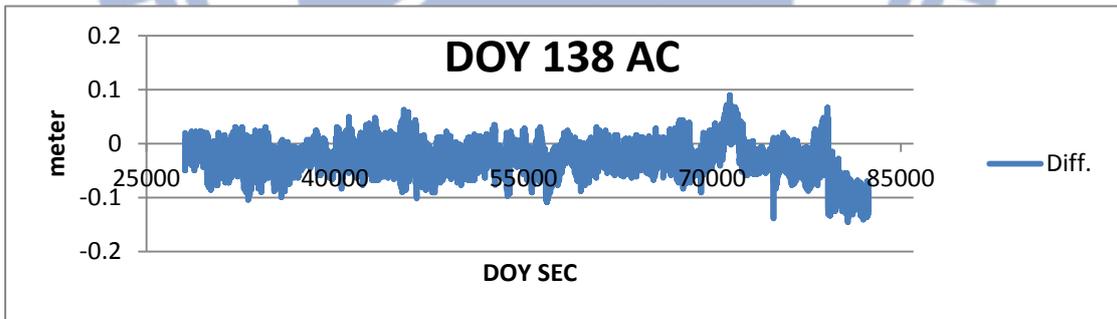
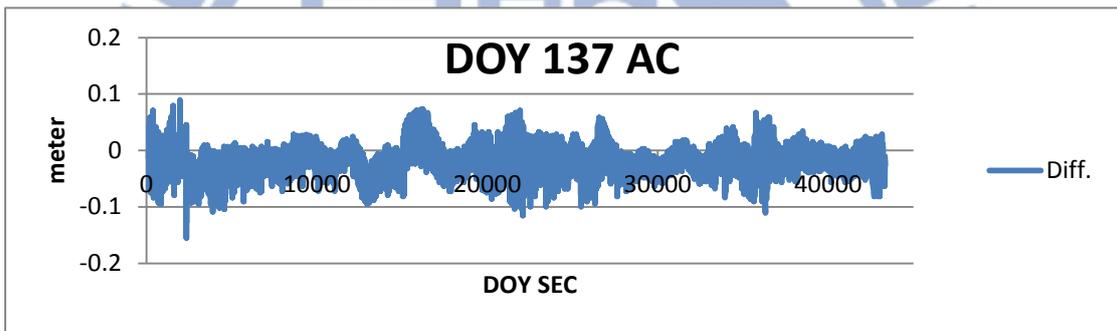
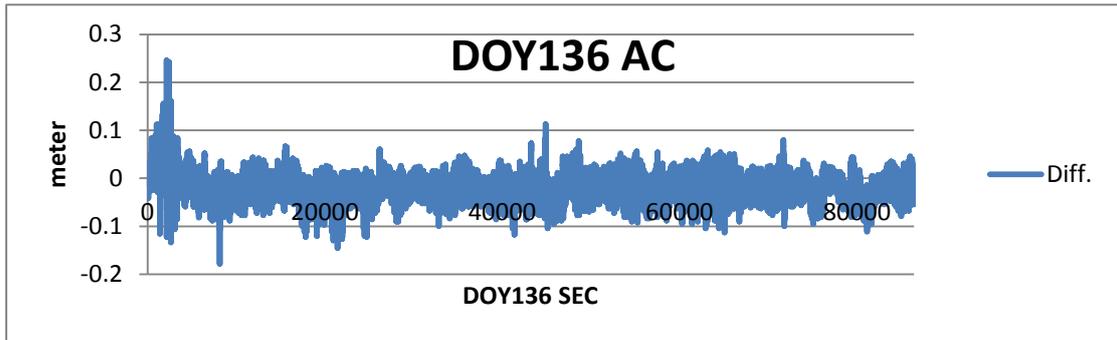
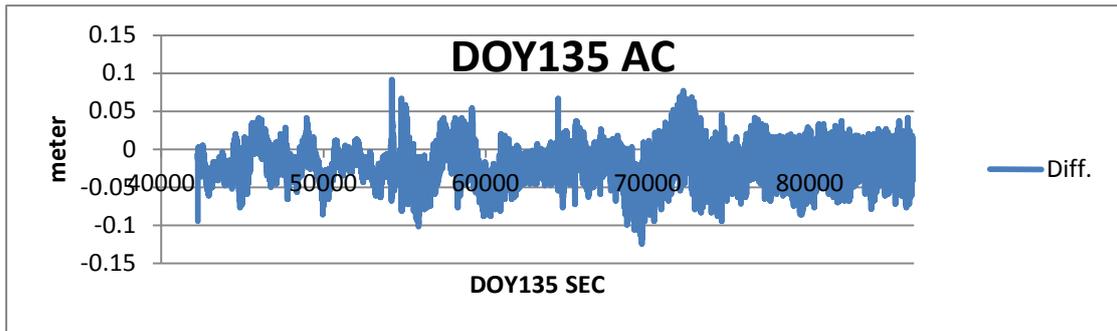


圖 3.13 TRACK 定位成果計算所得 AC 基線長與全測儀觀測值之差異。  
由上至下為 DOY135~DOY139。

### 3.4.3 TRACK 內部精度評估

本研究將 4 組 GPS 接收儀安裝於船載重力測量的船上，取樣頻率為 1Hz。解算時以連續航線為計算單位，以獲得每連續航線的 GPS 動態橢球高資訊及其精度值，並輸出估計天頂方向的對流層附加參數值與訊號延遲誤差量，並藉此延遲誤差判斷 TRACK 動態解算成果之合理性。

對流層延遲誤差由空氣中的乾延遲量與溼延遲量共同組成，乾延遲量由乾燥的氣體所引起，其在天頂方向造成的延遲量約為 2.3 m，約占對流層總延遲量的 90%，乾空氣之密度會隨其表面壓力的改變而變化，由於其變化較為平緩穩定，故可藉由量測大氣的溫度、溼度、壓力將此乾延遲量予以模式化並求解；而溼延遲量則與大氣的水氣分壓有關，由於水氣會隨著時間與空間高度之改變而變化，因此不易利用數學模式予以準確估計，在溼度較高的地區，溼延遲量可高達 35 cm(Bevis et al., 1992)，故若求解得的對流層總延遲量介於 2~3 m 之間、平面定位精度介於 2~4 cm、高程定位精度介於 5~10 cm 之間，即可視該計算成果為合理的結果(陳逸如, 2010)。此節以 2012 年 DOY136 之 TRACK 解算成果為例。

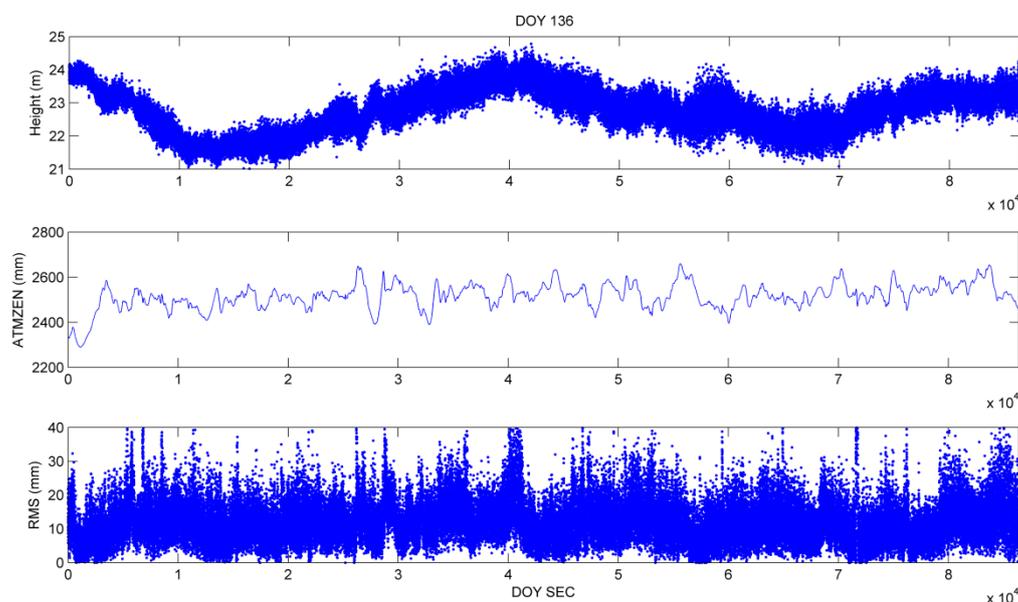


圖 3.14 TRACK 解算 2012 DOY136 之橢球高、天頂距對流層延遲量及軟體內部  
精度

## 3.5 改正模式

### 3.5.1 海潮改正模式

NAO.99b 及 NAO.99Jb 為 National Astronomical Observatory in Japan 研製短週期海潮模型，分別為全球性以及區域性海潮模型。NAO.99b 涵蓋範圍由經度  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ；北緯  $90^{\circ}$ -南緯  $90^{\circ}$ ，解析度為  $0.5$  度，它結合了五年的 TOPEX/POSEIDON 測高儀之海潮資料(cycle 9-198)以及水文動力模型；NAO.99Jb 為一日本區域性海潮模型，以 NAO.99b 結合 TOPEX/POSEIDON 資料，提供 16 個分潮：2N2, J1, K1, K2, L2, M1, M2, MU2, N2, NU2, O1, OO1, P1, Q1, S2, T2。在日本附近海域(東經  $110^{\circ}$ ~ $165^{\circ}$ ；北緯  $20^{\circ}$ ~ $65^{\circ}$ ，包含臺灣地區)結合日本沿岸驗潮站同化資料以發展 NAO.99Jb 模式，其空間解析度為 5 分，其中提供 16 個分潮調和常數，並以 Matsumoto et al.編撰的電腦程式完成 16 個分潮調和常數的載入(Matsumoto et al., 2000)。本研究使用 NAO.99Jb 模型進行海潮改正。然於不同的參考文獻當中發現與岸邊驗潮站所蒐集之潮位資料結合，也是常見的海潮改正方法之一(Foster, 2009; Bonnefond, 2003)。

### 3.5.2 固體潮改正模式

地球表面會因太空中攝動天體(如月球、太陽)對彈性地球的引力作用而產生週期性漲落的現象，稱為固體潮現象。此現象之概略描述為在地球地心與攝動天體之連線方向上會被拉長，而連線垂直方向則趨於扁平，其對地表面之影響包含長期性偏移以及週期性偏移，前者與緯度有關，後者由日週期和半日週期組成。經由一天的靜態觀測，週期性偏移之影響大部分都可平滑消除，可觀測到的位移量可達約 40 公分(Lambeck, 1988)，而長期性偏移方面，即使進行長時間觀測，殘餘誤差最多仍可達 10 公分左右。在相對定位方法中，一百公里以內的基線二測站固體潮影響可視為一致，可以差分方法消除。

### 3.5.3 濾波

本研究所使用 Gaussian filter 對研究中所有計算出的海面高資料進行濾波，而此濾波主要是針對船航行時的風浪，而非船速可能產生的誤差，原因是一般船行速度較高的情況下，對海水面高訂定有 5~10 公分甚至更高的誤差可能產生，但當船速低於 3 m/s 情況時，行進速度對海面高訂定的影響小於一公分 (Bonfond, 2003)，本研究航行船速控制在 3 m/s 左右，故船速對海面高影響忽略不計。本研究使用之 Gaussian filter (Hwang et al., 2006) 是以離選定資料越近而權重越重的加權方法平滑化所有資料，以期平滑化後能夠消除船行進間姿態角因風浪影響而擺幅過大等高頻誤差。由前人實驗發現 120 秒罩窗所得海水面高精度比 60 秒罩窗於平差後 RMS 值改善約一公分(陳逸如, 2010)，而本次研究中亦由無濾波、60 秒、120 秒和 360 秒罩窗的成果發現 120 秒罩窗成果在本研究中表現最好，於是選定 120 秒罩窗為處理本次研究的罩窗大小。

## 第四章 GPS 與 INS/GPS 資料計算

### 4.1 研究區域簡介

#### 4.1.1 施測範圍、儀器、測量船隻簡介

本研究為臺灣船載重力計畫之一部分，此為一 2011 年起之 4 年期之計畫，研究中所使用之研究數據為 2012 年 5 月至 6 月期間所蒐集，施測範圍為臺灣西部近岸 12 海里(約 19.6 km)海域，涵蓋區域南起台中梧棲漁港、北迄新北市富基漁港，規劃航線如圖 4.1 所示，實際施測航線以 TRACK 動態差分解算成果繪製，如圖 4.2 所示。



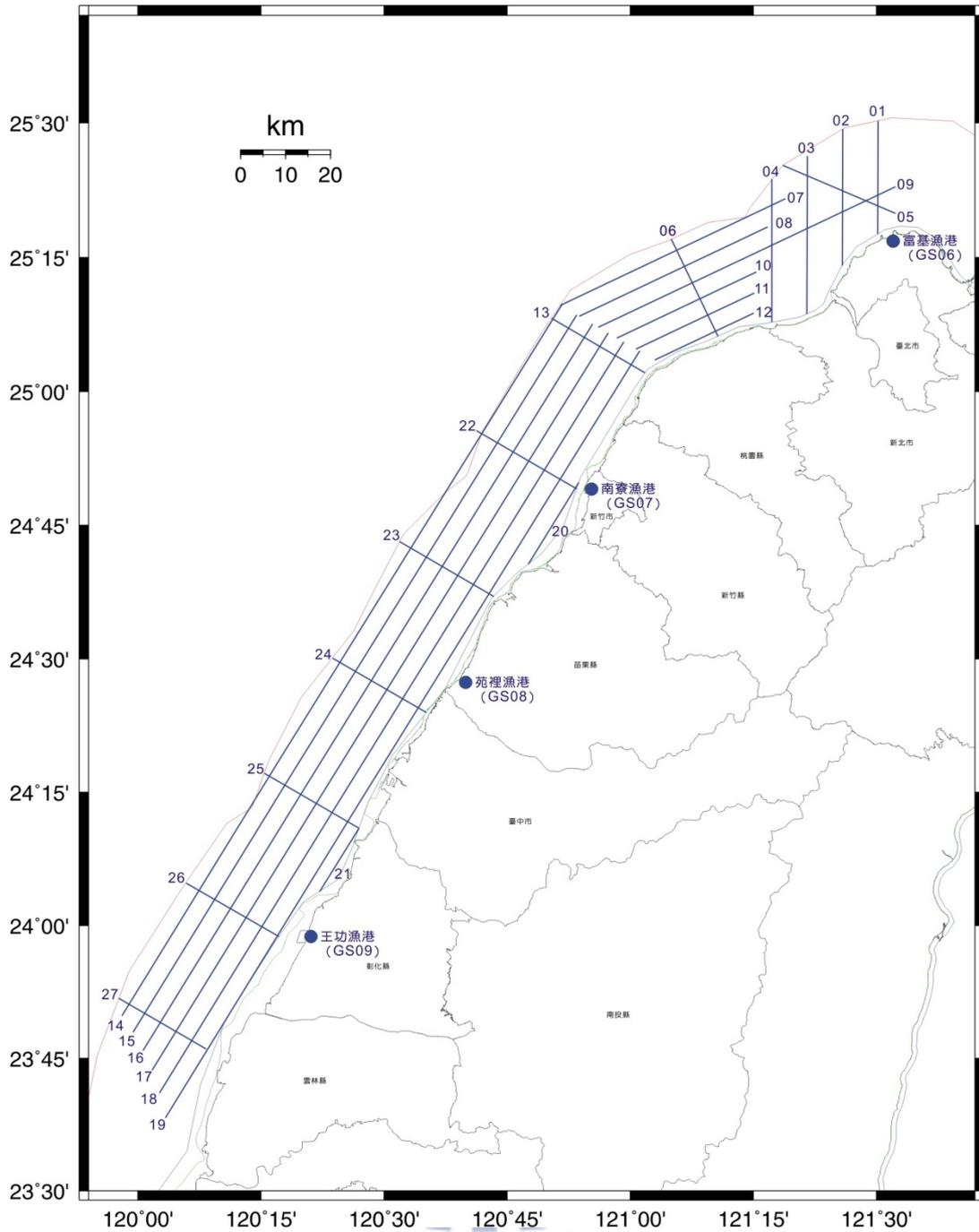


圖 4.15 2012 年近岸船載重力計畫航線規劃圖(摘自內政部 101 年度臺灣本島近岸  
船載重力計畫書)

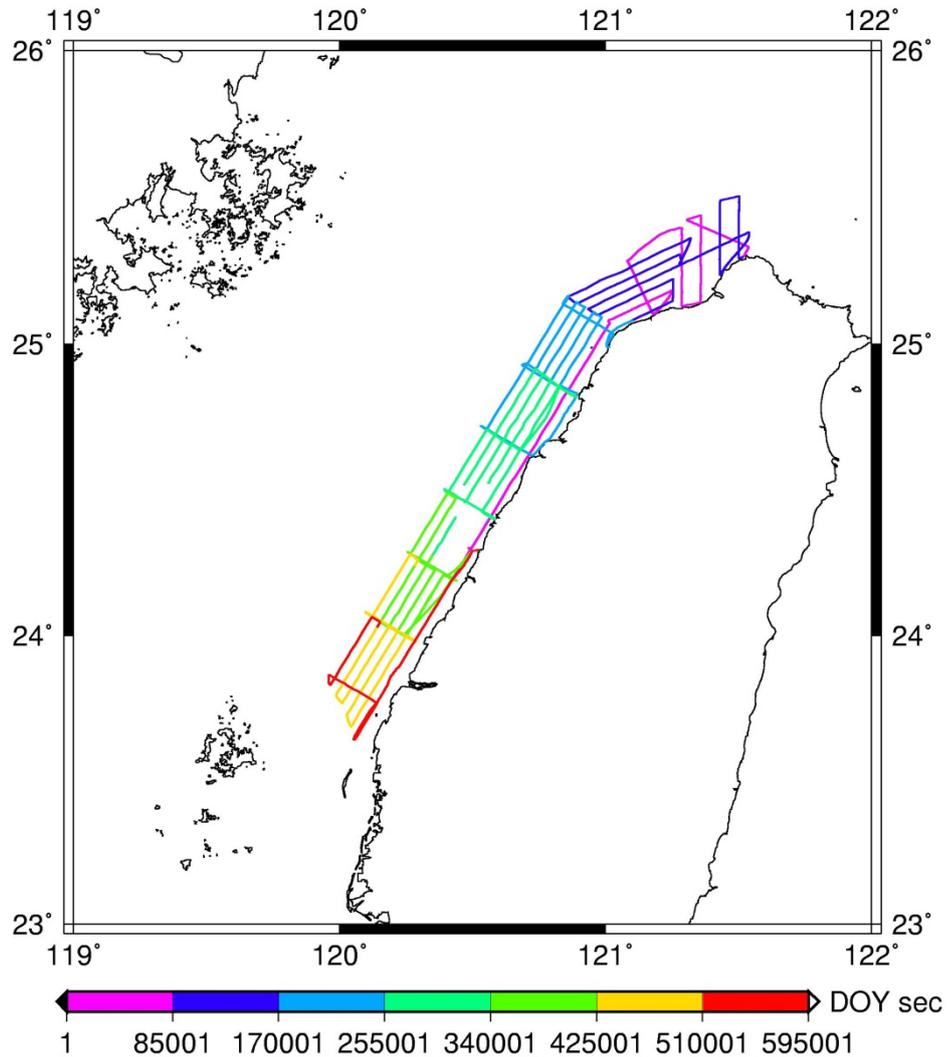


圖 4.16 2012 年近岸船載重力計畫實際施測航線圖

在考量計畫施測範圍、航線及航期規畫後，針對船隻續航力、連續作業能力、船體穩定度及作業安全等因素，計畫所選用之船隻為 CT2 等級之尖再發號，船隻規格表如表 4.1，船隻外觀如圖 4.3。多天線 GPS 系統方面，所使用之儀器為大地測量型 GPS 接收儀 Trimble 5700，天線盤型號 TRM42149.00，架設位置如圖 4.4 中藍色圓圈及標記 A、B、C、D 部分；GPS/INS 整合系統方面，慣性測量儀(Inertial Measurements Unit, IMU)的型號為 LITEF LCI 戰術等級 IMU，並搭配架設 NovAtel Propak 雙系統雙頻 GNSS 大地等級接收儀，架設位置如圖 4.4 兩個

綠色圓圈部分。

表 4.6 船載重力計畫選用船隻—尖再發號

項目	內容
船長(註冊尺度)	10.14 公尺
船寬(註冊尺度)	3.40 公尺
總噸位	15.75 公噸
淨噸位	4.73 公噸
油櫃容量	1600 公升
馬力	279 KW (380 PS)
船殼材質	玻璃纖維強化塑膠

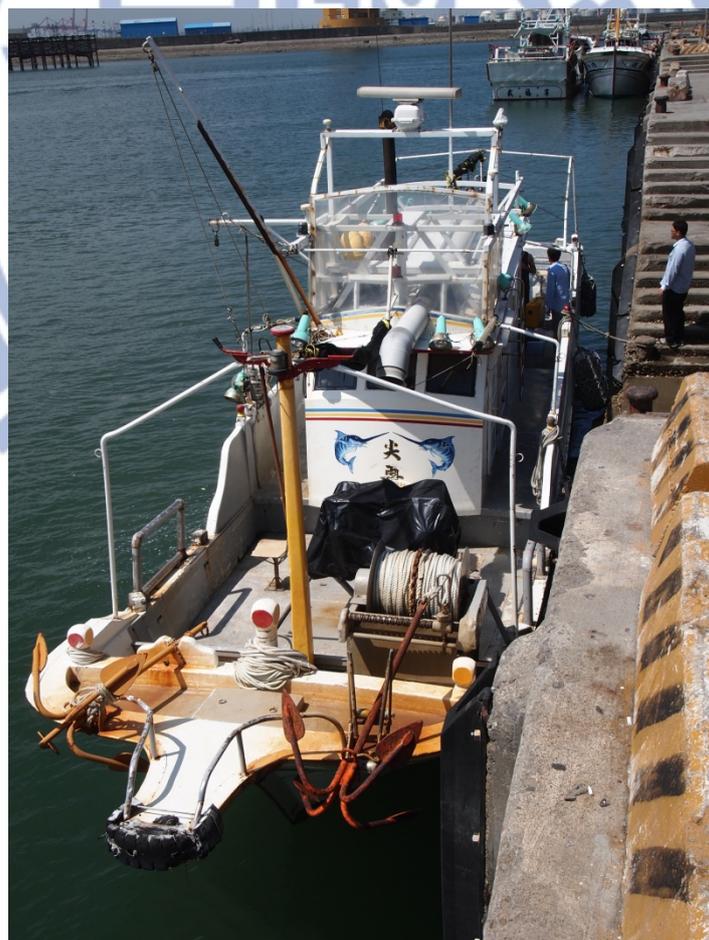


圖 4.17 尖再發號船體外觀

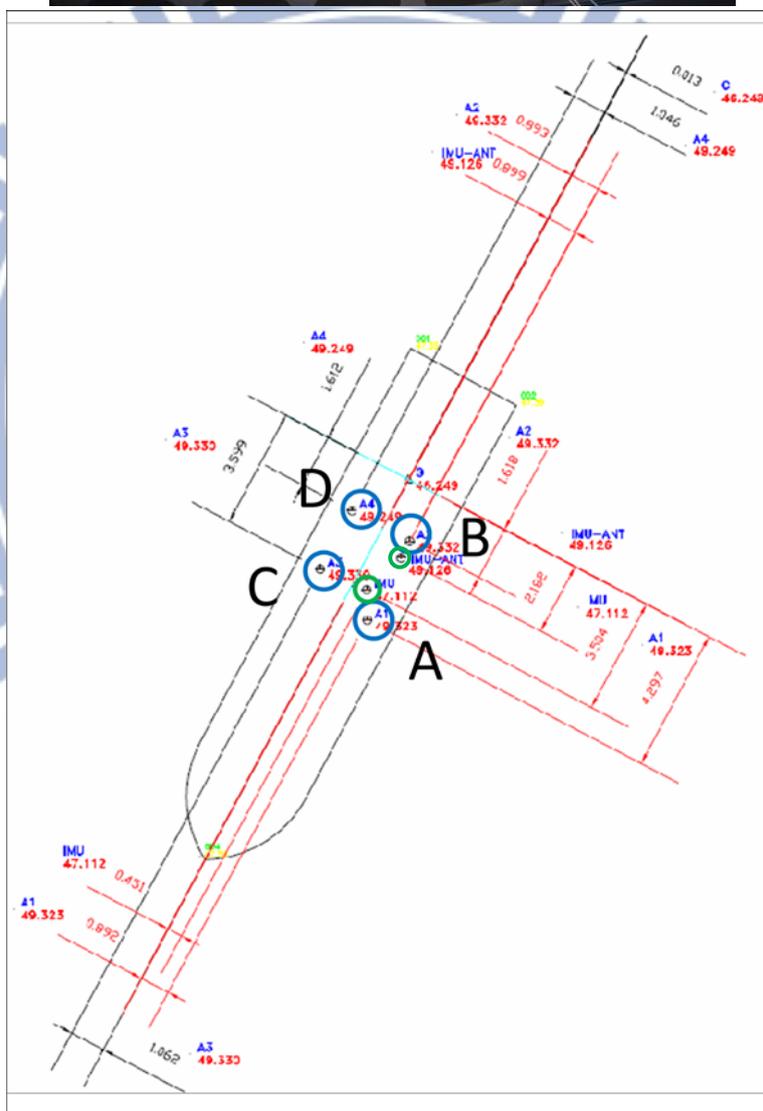
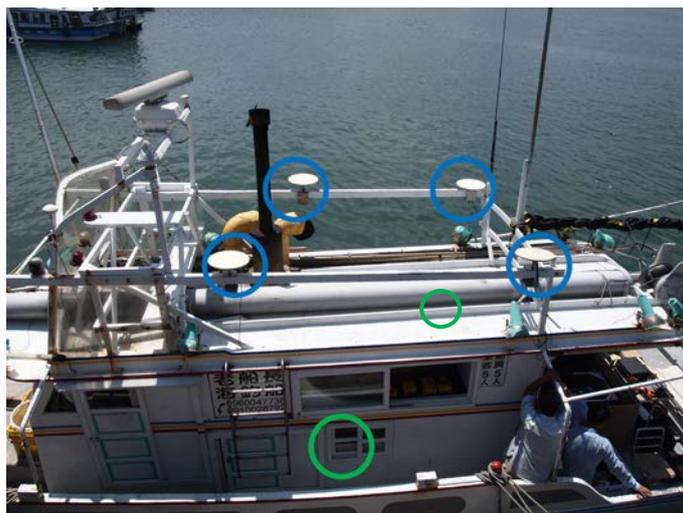


圖 4.18 上為實驗儀器於船隻上架設位置圖、下為全測儀施測數據圖，紅色圓圈及 A、B、C、D 為 GPS 接收天線位置，2 綠色圓圈為 IMU 及其 GNSS 天線位置。

## 4.2 施測與計算方法

### 4.2.1 GPS

2012 年船載重力計畫依地理位置由北至南共編有 27 條航線，其各自起迄座標如表 4.2 所示。而各停靠港口分別為新北市富基漁港、新竹市南寮漁港、苗栗縣苑裡漁港及彰化縣王功漁港，於每一出海港口均設置一基準點作為岸基 GPS 主站與重力基準點(GS06~GS09)，岸基控制點皆埋設樁標如圖 4.5 所示；除上述 GPS 主站外，此次施測也併同國土測繪中心 e-GPS 主站共同作為岸基主站(內政部國土資訊中心, <http://www.egps.nlsc.gov.tw/index.html>)，由北至南共 10 站，包括 SHMN(石門)、GS10(竹圍國中)、KYIN(觀音)、SHJU(南寮)、HL01(後龍)、TASO(通霄)、TACH(台中港)、VR01(和美)、VR02(二林)及 TASI(台西)。

表 4.7 測線起迄座標(摘自內政部 101 年度臺灣本島近岸船載重力計畫書)

測線編號	起點		終點	
	經度	緯度	經度	緯度
1	121.502287	25.293356	121.503159	25.503958
2	121.430581	25.234733	121.431482	25.488744
3	121.358852	25.144406	121.359719	25.438879
4	121.287404	25.129340	121.288032	25.395852
5	121.538205	25.331721	121.309351	25.421543
6	121.083157	25.283933	121.178019	25.102955
7	120.858076	25.160706	121.314978	25.359391
8	120.896455	25.140344	121.279135	25.306497
9	120.934822	25.119973	121.538425	25.381239
10	120.973175	25.099592	121.256231	25.222490
11	121.011516	25.079200	121.251720	25.183485
12	121.049845	25.058799	121.250868	25.146064
13	120.840132	25.136724	121.030205	25.034720
14	120.862610	25.164002	119.967421	23.829492
15	120.891508	25.142970	119.990004	23.798630
16	120.923274	25.126106	120.010606	23.764642
17	120.955032	25.109235	120.028901	23.727010
18	120.986780	25.092358	120.043989	23.684310
19	121.019000	25.076169	120.056218	23.637090
20	120.895803	24.830436	120.792619	24.677457

21	120.449129	24.182583	120.369340	24.063723
22	120.687346	24.927462	120.891135	24.818172
23	120.531600	24.719901	120.722655	24.617544
24	120.395341	24.502041	120.586083	24.399898
25	120.256588	24.285642	120.449129	24.182583
26	120.098525	24.079676	120.286443	23.979184
27	119.961381	23.862665	120.138783	23.767847



圖 4.19 岸基站樁標埋設示意圖

本研究共於船上共裝設 4 組 GPS 接收儀，收儀接收每秒一筆(1 Hz)之雙頻相位觀測量，經定位解算獲得橢球高，而透過天線垂距、海潮、固體潮等改正後，將可以獲得與衛星測高相當性質的海水面高(Sea Surface High, SSH)。研究使用動態差分方法解算 GPS 定位，GPS 整體資料處理流程如圖 4.6 所示。定位解算軟體為第三章中所述美國麻省理工學院開發之 GPS 資料處理模組 TRACK。定位解算結果共兩部分：(1)固定站使用動態流程解算之靜態定位結果；(2)船隻經緯度位置、海水面高程之動態差分定位結果。GPS 之解算成果以 WGS84 座標系統為基準，轉換至 ITRF 參考框架。定位解算完成後，將 4 組 GPS 定位資料進行資料比對，取出同年同日(DOY)同秒之資料以便進行後續應用，包括繪製航行軌跡、航線萃取及編號、載體運動姿態角解算、天線垂距改正、濾波、海潮改正，最後取得海水面高，而後進行交叉點分析、與 DTU10 平均海水面模式進行比較，其流程如圖 4.7 所示。成果分析共兩部分，其一為針對姿態角解算成果與整合式 INS/GPS 系統所得姿態角成果進行討論；其二為比較不同垂距修正法所得之海水面高，分別為多天線 GPS 系統解算所得之姿態角修正天線垂距與將天線垂距設

為定值之兩方法。本研究撰寫了一 FORTRAN 程式(Attitude.exe)，處理資料時間比對、解算天線相位中心間距離、解算船隻運動姿態、使用姿態成果取得時變天線垂距並以其改正海面高。

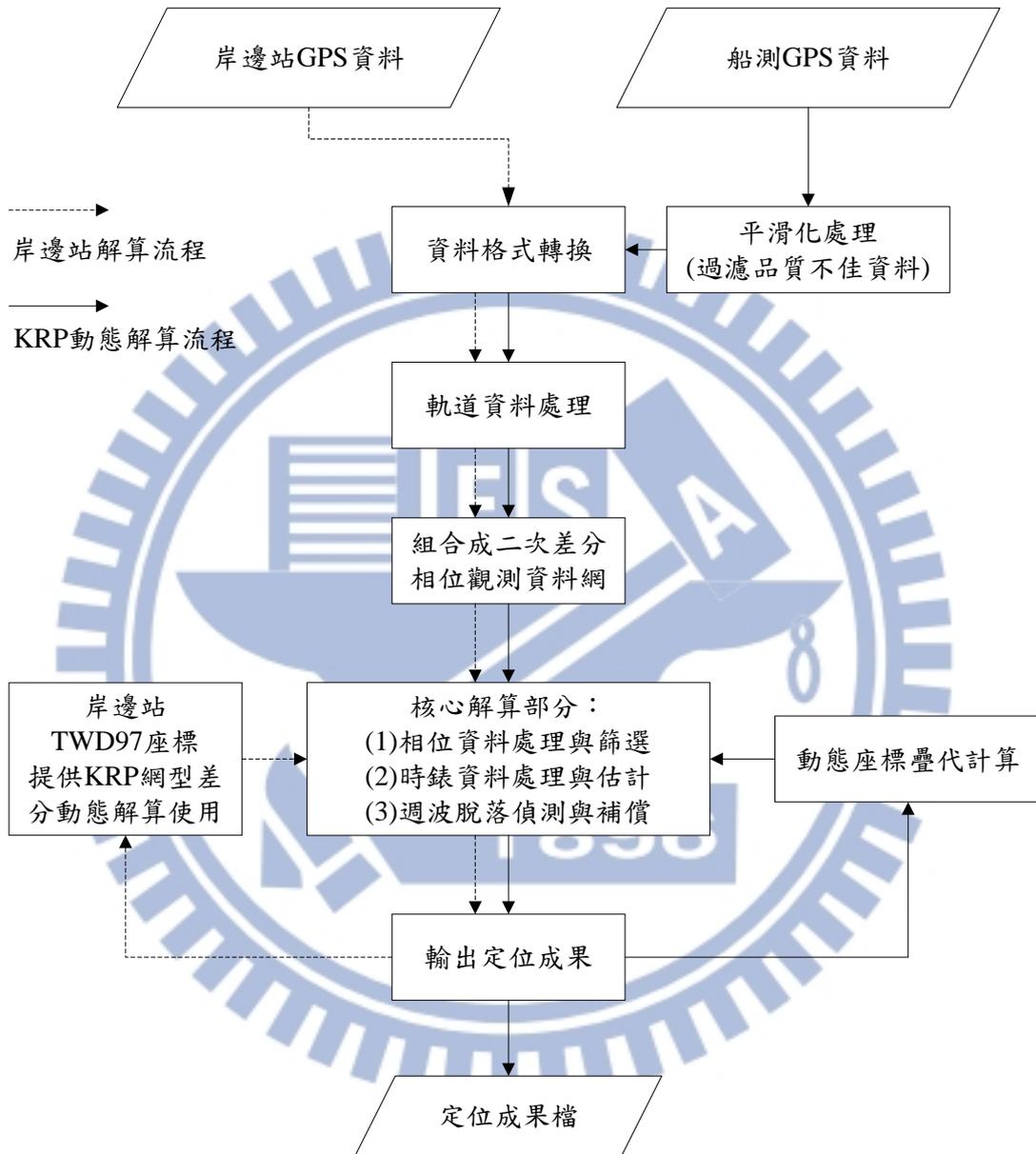


圖 4.20 GPS 資料處理流程圖

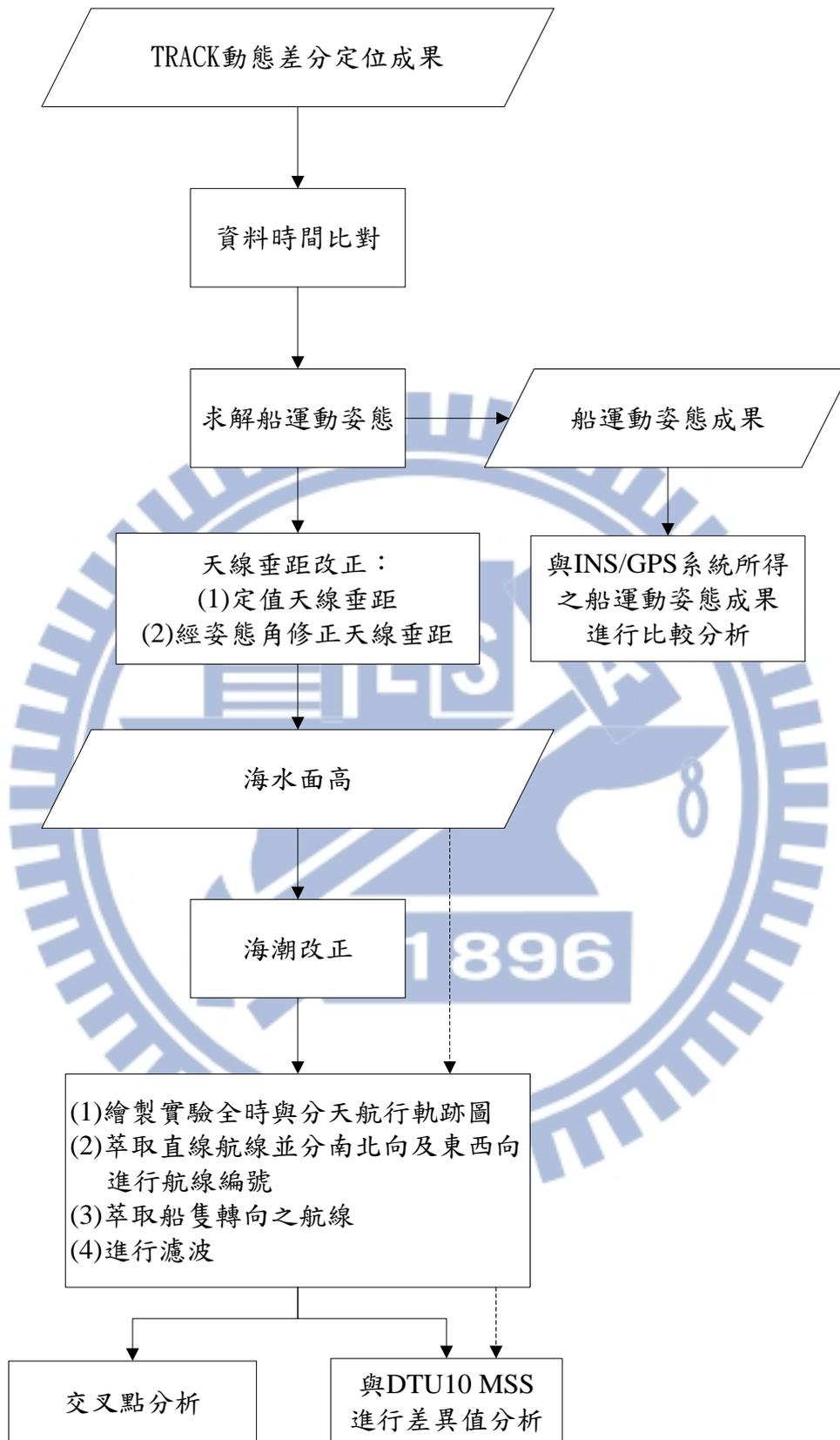


圖 4.21 GPS 動態定位成果應用、改正及分析流程

## 4.2.2 整合式 INS/GPS 系統

本次實驗於 2012 年 DOY135 日起之船載重力施測計畫即已裝設 INS/GPS 整合系統於施測船隻上，戰術等級 IMU(LITEF LCI IMU)架設於船艙內一平台，與其搭配之 GNSS 天線則與多天線 GPS 系統之天線同架設於船頂。LITEF LCI IMU 之採樣頻率達 200Hz，其陀螺飄儀穩定性為每小時 0.1 度、尺度因子為 200ppm。以下將就本研中所使用之 GPS/INS 整合系統數據來源、原理進行簡介。

慣性導航系統(Inertial Navigation System, INS)與 GPS 各有其優缺點，且相互間具有明顯互補性(表 4.3)，故若能將兩者加以整合以相互補足其各自運作時不足之處，便能得到一更優越之導航系統，整合式 INS/GPS 系統即是由此概念出發之研究。

表 4.8 GPS、INS 及 INS/GPS 整合系統之特色比較

	GPS	INS	INS/GPS
優點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.長時間觀測獲得高精定之位置、速度</li> <li>2.無關乎時間，精度皆一致</li> <li>3.不易受重力影響</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.短時間內可獲取高精度位置、速度</li> <li>2.準確的姿態資訊</li> <li>3.獨立運作系統</li> <li>4.無訊號遮蔽問題</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.位置與速度皆有高精度</li> <li>2.準確之姿態數據</li> <li>3.當 GPS 短暫遮蔽或失鎖仍能有導航輸出</li> </ol>
缺點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.姿態雜訊量高</li> <li>2.低取樣頻率(1 Hz)</li> <li>3.非獨立運作</li> <li>4.週波脫落和失鎖</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.精度隨時間下降</li> <li>2.受重力影響</li> <li>3.需初始對準、率定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>4.GPS 訊號搜尋時間降低</li> <li>5.高取樣率</li> </ol>

卡曼濾波器理論(Kalman,1960)在 INS/GPS 整合定位定向演算法之發展過程中至關重要，它提供了整合式導航系統重要的理論基礎。卡曼濾波器廣泛的被使用在導航及控制等相關領域。該濾波器由一系列預測器 (predictor) 與補償器 (corrector) 以及將估計後狀態參數之變方最小化的數學式所構成。在導航及動態定位的領域中，它被公認為是目前在整合系統開發過程中核心演算法的唯一選擇(羅貽駢, 2008)。導航過程中慣性感測器所含的誤差必須要經過補償才能確保定位定向解之正確性，建立適當的動態誤差模型並利用卡曼濾波器可以幫助修正

導航解的誤差。表 4.4 為目前文獻記載之 INS/GNSS 整合架構之簡單比較(Chiang, 2004)，鬆耦合架構將 INS 及 GNSS 視為兩個獨立的系統，INS 利用導航方程式；GNSS 有獨立的卡曼濾波器求導航解，最後以負責整合的擴張卡曼濾波器與平滑器以獲取最佳的整合解，其結構簡單故為目前各商用軟體所採用。而緊耦合架構，基本上將兩系統在觀測量的部分就做整合，換句話說，緊耦合不再像是鬆耦合系統般，將兩系統視為獨立運作的導航系統，個別得到導航解之後再進行整合，取而代之的是緊密地將 INS/GNSS 視為同一個系統，一同進行定位定向解之計算，此種架構整合的最大的優點在於當 GNSS 訊號薄弱時，系統只要能收到一顆衛星的正常訊號，即可進行定位定向解之計算；然其數學模式較為複雜，故尚未全面取代鬆耦合架構。而超緊耦合架構之實現門檻較高，且其對移動遙測製圖技術並未有突破性的助益，故尚未有任何商用定位定向系統採用此架構(江凱偉, 2012)。在傳統卡曼濾波器的使用上有擴張卡曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF) (Bucy and Senne, 1971)及線性化卡曼濾波器可供選擇(Linearized Kalman Filter, LKF)(Brown and Huang, 1992)，本研究中採用擴張卡曼濾波器。

表 4.9 一般 INS/GNSS 整合架構的簡易比較(Chiang, 2004)

應用	優點	缺點
無耦合 Uncoupled	簡易之整合演算法。	無 GNSS 時，系統精度銳減。
鬆耦合 (分散式) Loosely Couple (decentralized)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.INS 和 GNSS 卡曼濾波器分開應用。</li> <li>2.個別的卡曼濾波器規模小。</li> <li>3.具有適應性的模組結合。</li> <li>4.適合平行處理，具可靠性。</li> <li>5.較少的計算複雜度。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.次佳化的設計。</li> <li>2.至少需四顆衛星求穩定解。</li> <li>3.INS 資料並不用來做模糊估算。</li> </ol>
緊耦合 (集中式) Tightly coupled (centralized)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.最佳化的設計。</li> <li>2.少於四顆衛星的 GNS 觀測量亦能使用。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.誤差狀態矩陣龐大。</li> <li>2.運算處理複雜。</li> </ol>
超緊耦合 (深) Ultra-tightly coupled (deep)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.INS 資訊可提升動態追蹤軌跡精度。</li> <li>2.降低 GNSS 接收儀的動態熱雜訊影響。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.此組合原理需要特別硬體和取得相關 GNSS 接收儀的模組套件。</li> <li>2.硬體需求高。</li> </ol>

平滑器是利用全部過去、現在和未來的觀測量以後處理模式來找出一個理想估算解，而全部的平滑演算法皆須根據所得之濾波解來運算，因此，好的濾波解才有好的平滑解。平滑器問題分類成三種：固定延遲平滑、固定點平滑和固定區間平滑(Gelb, 1974)。逆向平滑器(Rauch-Tung-Striebel, RTS)演算法為一固定區間平滑器，是目前最為被廣泛使用的平滑方式(羅貽駢, 2008)，此演算法也正是本研究中所使用之平滑方法。本研究中解算 INS/GPS 整合系統之軟體為成功大學江凱偉老師研究室所開發之 CAINS-21，圖 4.8 為其改良閉合式鬆耦合處理架構。

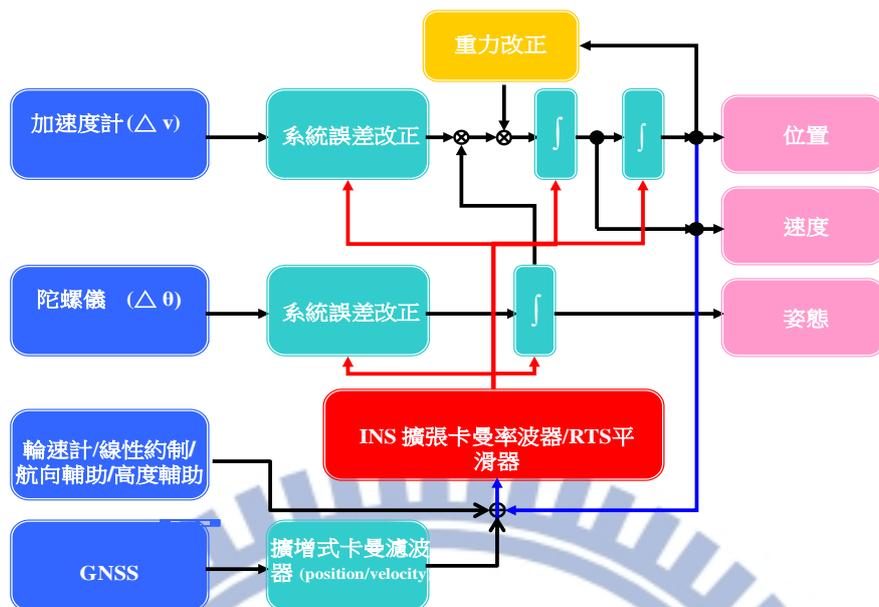


圖 4.22 CAINS-21 軟體使用之改良閉合式鬆耦合架構(摘自內政部 100 年度發展與應用多平台遙測製圖技術工作案總報告書，江凱偉等人，2011)

### 4.3 GPS船載海面高

船載測高與衛星測高的目的一致，主要為測定海洋大地水準面與海洋地形等資訊。如圖4.9所示，衛星測高的原理為應用衛星測高儀取得瞬間海水面至衛星之間的高度，在選定一固定的參考橢球體之後，經過海潮改正，則可以獲得海水面與參考橢球體之間的海面高度(SSH)，應用此海面高度以及海洋大地水準面之模式，即可以推算海洋地形(sea surface terrain, SST)：

$$SST = SSH - N \quad (4.1)$$

其中， $N$  為大地起伏值(undulation)。

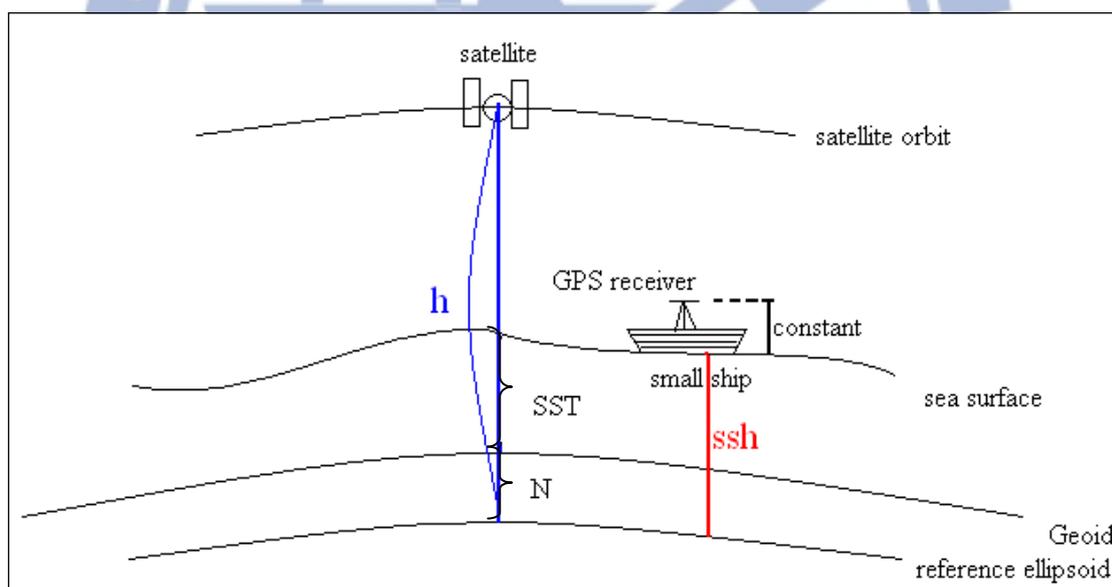


圖 4.23 船載海面高測量與衛星測高原理圖(陳逸如, 2010)

船載GPS獲得的橢球高度，經過天線垂距、海潮、固體潮等改正後，可以獲得與衛星測高相當性質的海面高。應用船載GPS資料測定海面高度的主要關鍵為GPS橢球高的定位精度，如何獲得高品質的GPS高程動態定位結果，是船載測高面臨的一項挑戰；除此之外，船隻航行間必定會因海象及船速影響而產生運動姿

態的改變，此變化通常以三個角度來描述，航向角、俯仰角和側傾角，總稱為姿態角，姿態角對天線垂距改正之影響和修正方法皆如第二章中2.4節所述，而本研究著重之重點便是此改正對於海面高之影響。由於衛星測高在近岸地區，雷達波的雜訊相對放大許多，導致近岸區域的測高品質不佳，而船載測高則無此項問題。所以，若能獲得品質佳的船載GPS測高資料並加之以運動姿態之修正，對於近岸海面高度、海洋地形以及海洋大地水準面等精度的提升，將有大幅的幫助。



## 第五章 研究成果及分析

### 5.1 姿態角解算成果

本節使用第二章所述直接解法撰寫程式解算船體出航時之運動姿態，所使用之資料為 2012 年 DOY135 至 DOY139 共 5 天之 TRACK 動態差分解算成果，將 4 個 GPS 接收儀資料進行時間匹配後獲得當中時間重合率最高之 3 具天線資料，而後以此時間匹配完成的資料做後續的姿態角解算，得船運動狀態之航向角 (yaw)、俯仰角 (pitch) 和側傾角 (roll)。本節首先將以航線圖對照航向角成果以確認解算成果正確性；另將以 GPS 姿態角解算成果與同時段 INS/GPS 整合系統所得進行比較，唯船測期間兩系統之座標系統並未整合於同一系統，僅 N 方向相同，E 及 U 方向皆未統合，意即兩系統只有航向角成果數值應高度相同，固本研究於兩系統的比較上僅著重於航向角，而在側傾角與俯仰角方面則是每 100 筆數據取樣一次得出平滑曲線以觀察其趨勢與航向角之間的關係。以下將就 DOY135 至 DOY139 之解算成果分別討論：

#### (1) DOY135

DOY135 之 GPS 數據經匹配後所得航線圖如圖 5.1；圖 5.2 至 5.3 為姿態角解算成果，橫軸皆為 DOY sec。由圖 5.2 之航向角成果對照航線圖，可知航向的改變正確的反應在解算所得之航向角上；此外，圖 5.2 中包括了與 INS/GPS 整合系統所得之航向角的比較，兩者趨勢相同，唯之間有約 8.9 度之系統偏差。由於 GPS 系統是在區域水平座標框架下進行姿態角解算，其正北指向與航向角正北相符合，而 INS/GPS 系統之正北則是由船測時 IMU 裝設之狀況而定，故推測應是 IMU 於 DOY135 施測時與 LLF 間有一夾角存在。圖 5.3 為船隻運動俯仰角解算成果，其值於 6 度至 -5 度間擺盪，由圖中可知船隻除高頻的俯仰震盪變化外，另由趨勢線可看出低頻的俯仰擺動。圖 5.4 為船隻側傾角解算成果，與俯仰角之不同處在於其低頻擺盪幅度較大，意即表示船隻在這段航程中側向之擺動較大。將

圖 5.3 和圖 5.4 綜合起來看，可以知道船隻約在 59,000 秒至 60,000 秒這段期間有較大幅度的擺動情形。

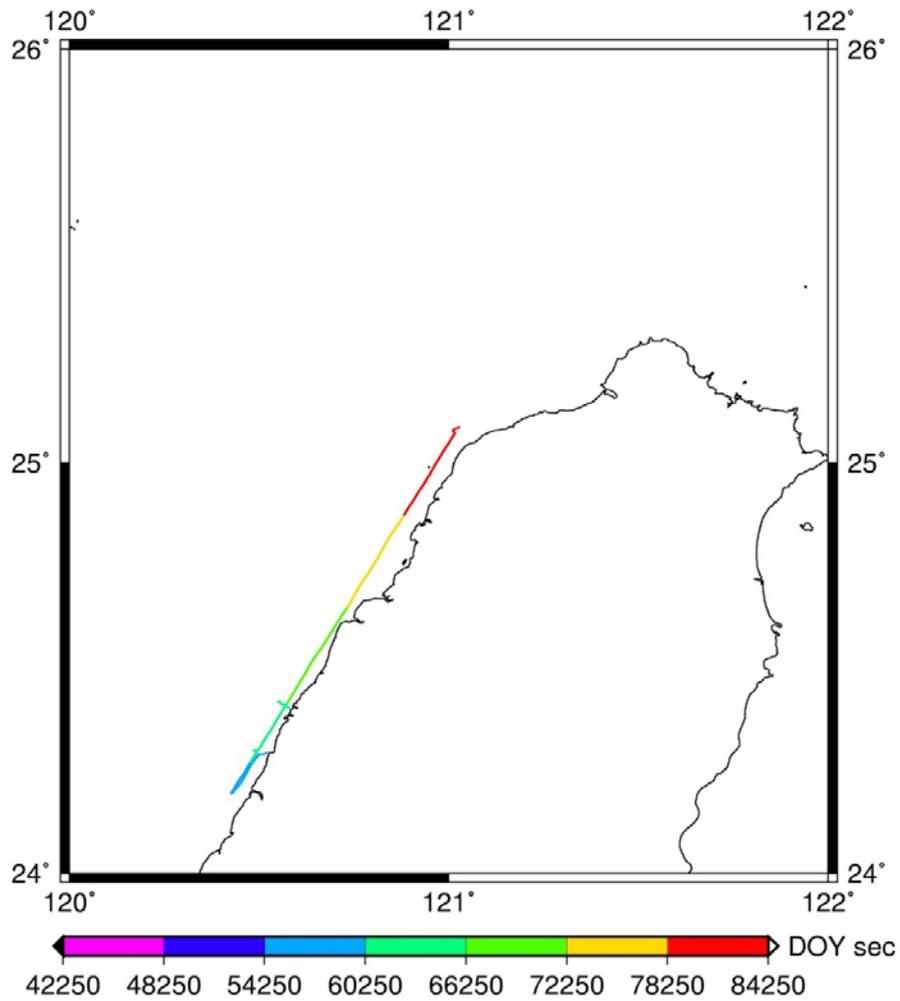


圖 5.1 DOY135 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖

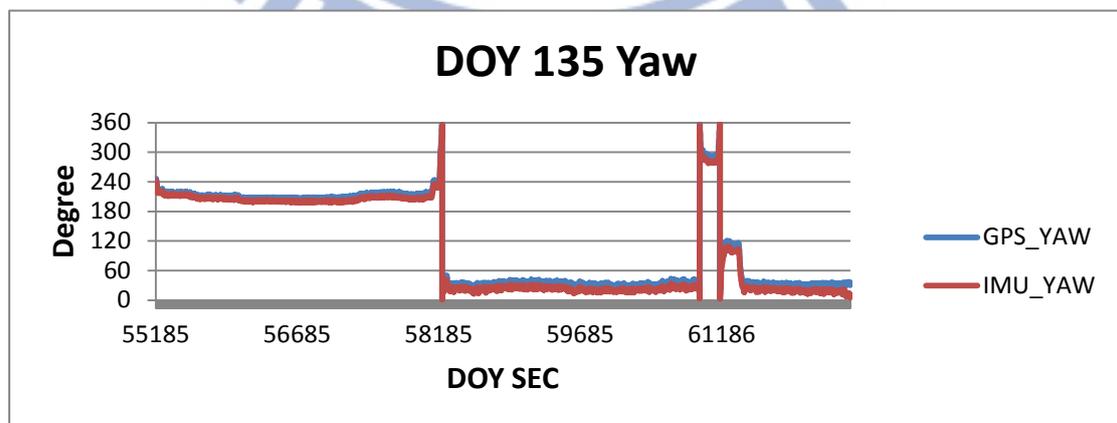


圖 5.2 DOY135 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得

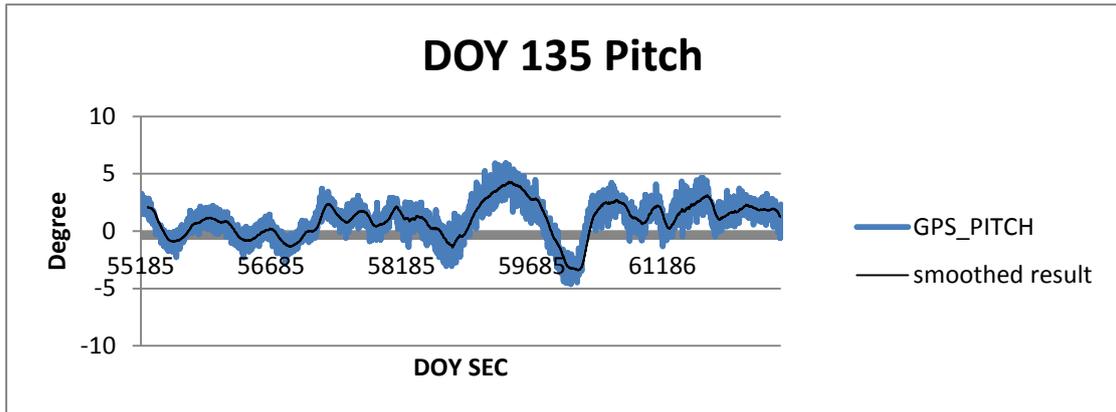


圖 5.3 DOY135 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角

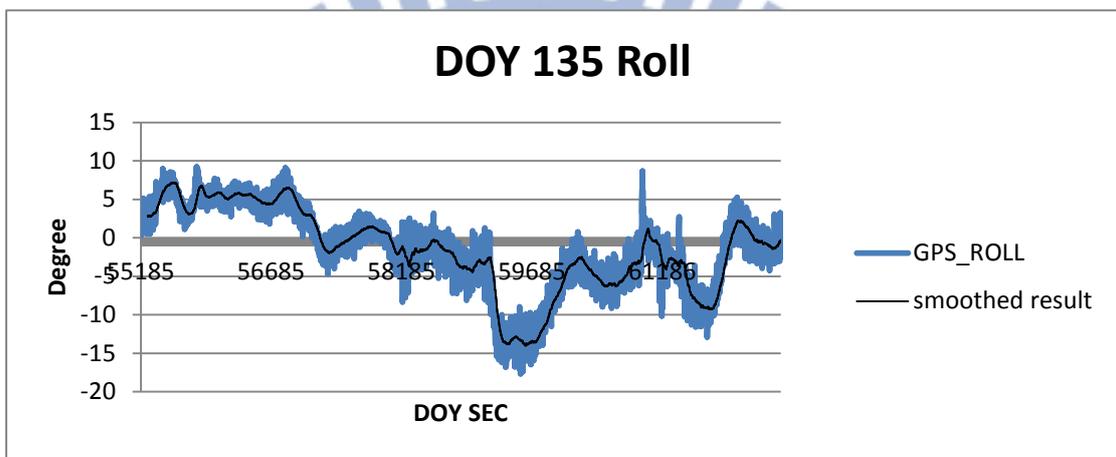


圖 5.4 DOY135 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

(2) DOY136

DOY136 之 GPS 數據經匹配後所得航線圖如圖 5.5;圖 5.6 至 5.8 為 DOY136 中第 1,935 秒至 23,519 秒之姿態角解算成果。將此段時間內所解得之航向角成果對照航線圖，可知航向角成果如實的反映了航向的改變；另由圖 5.6 中可清楚的知道 GPS 系統與 INS/GPS 整合系統所得之航向角成果趨勢及數值範圍相同。圖 5.7 與圖 5.8 分別為船隻運動俯仰角及側傾角解算成果，俯仰角約於 16 度至-12 度間擺盪，側傾角之擺動則是大約介於正負 20 度之間，由圖中可知船隻約在 1,935 至 2,500 秒間與 15,250 秒至 15,750 秒間有大幅度的擺動，此兩段時間之擺動對應圖 5.6 可發現都是在船隻大幅度改變航向時所發生。

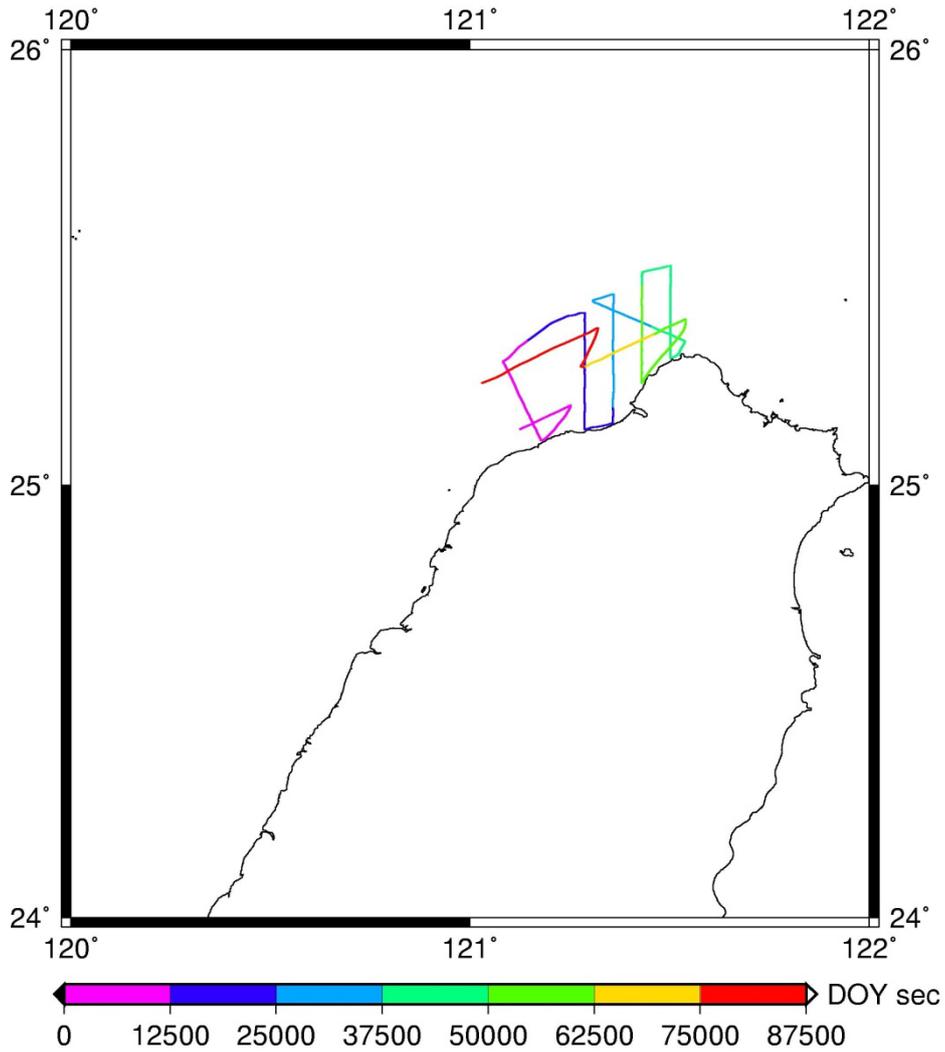


圖 5.5 DOY136 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖

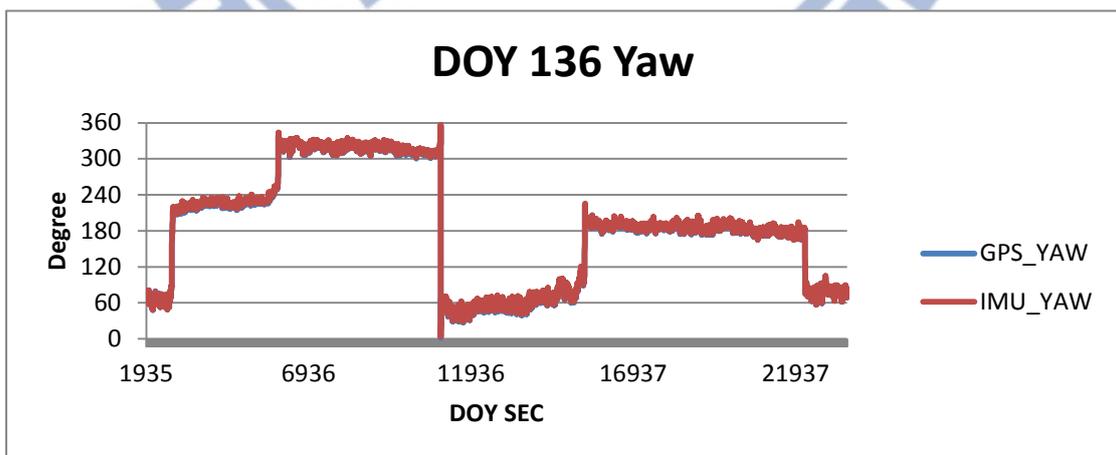


圖 5.6 DOY136 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得

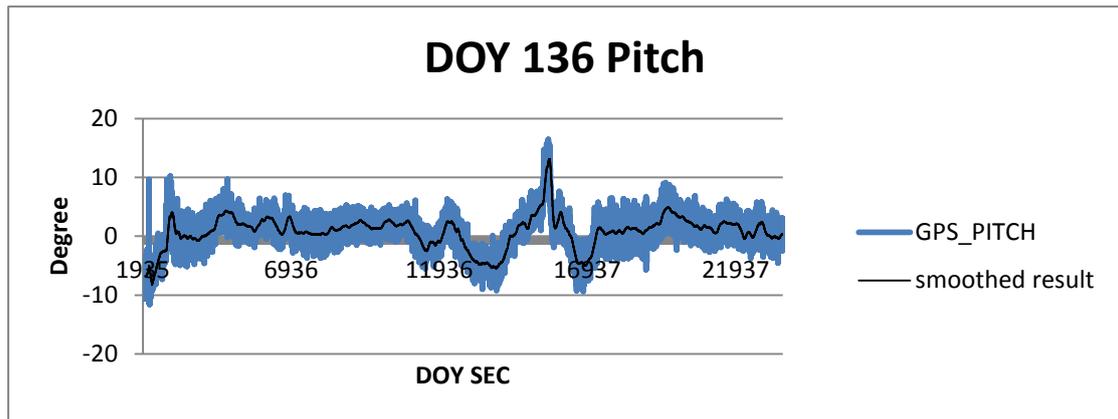


圖 5.7 DOY136 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角

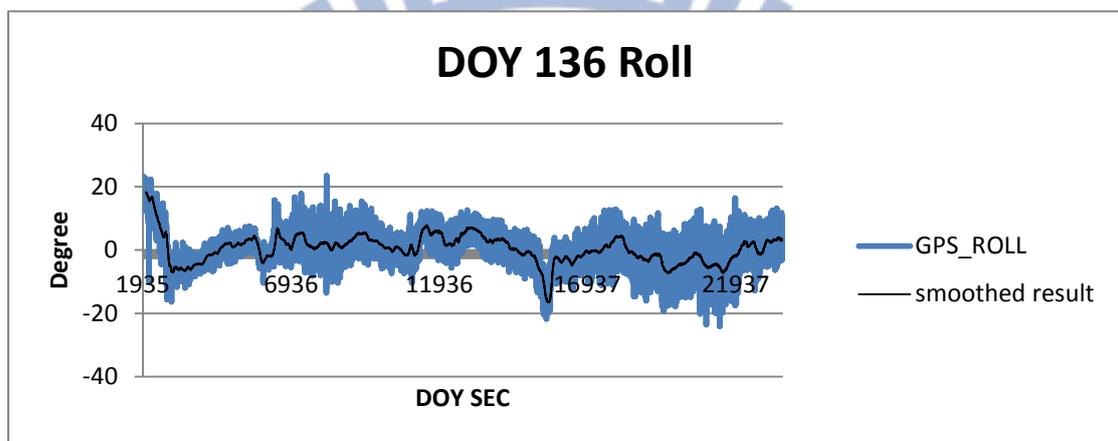


圖 5.8 DOY136 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

### (3) DOY137

DOY137之GPS數據經匹配後所得航線圖如圖5.9;圖5.10至5.12為DOY137中第8秒至21,244秒之姿態角解算成果。與DOY137之航線圖相較,可知此段時間內所解得之航向角正確的反映了航向的變化;圖5.10中GPS系統與INS/GPS整合系統所得之航向角成果趨勢及數值範圍相同。圖5.11與圖5.12分別為船隻運動俯仰角及側傾角之GPS系統解算成果,俯仰角之擺動約介於10度至-13度之間,側傾角之擺動則是大約介於20度至-15度之間,由圖中可知此段行程中船隻約在13,000秒至18,000秒間有較劇烈之擺動變化,對照圖5.10之航向角變化情形來看,航線的變化雖被包含於13,000秒至18,000秒中,但僅是當中的一部分。

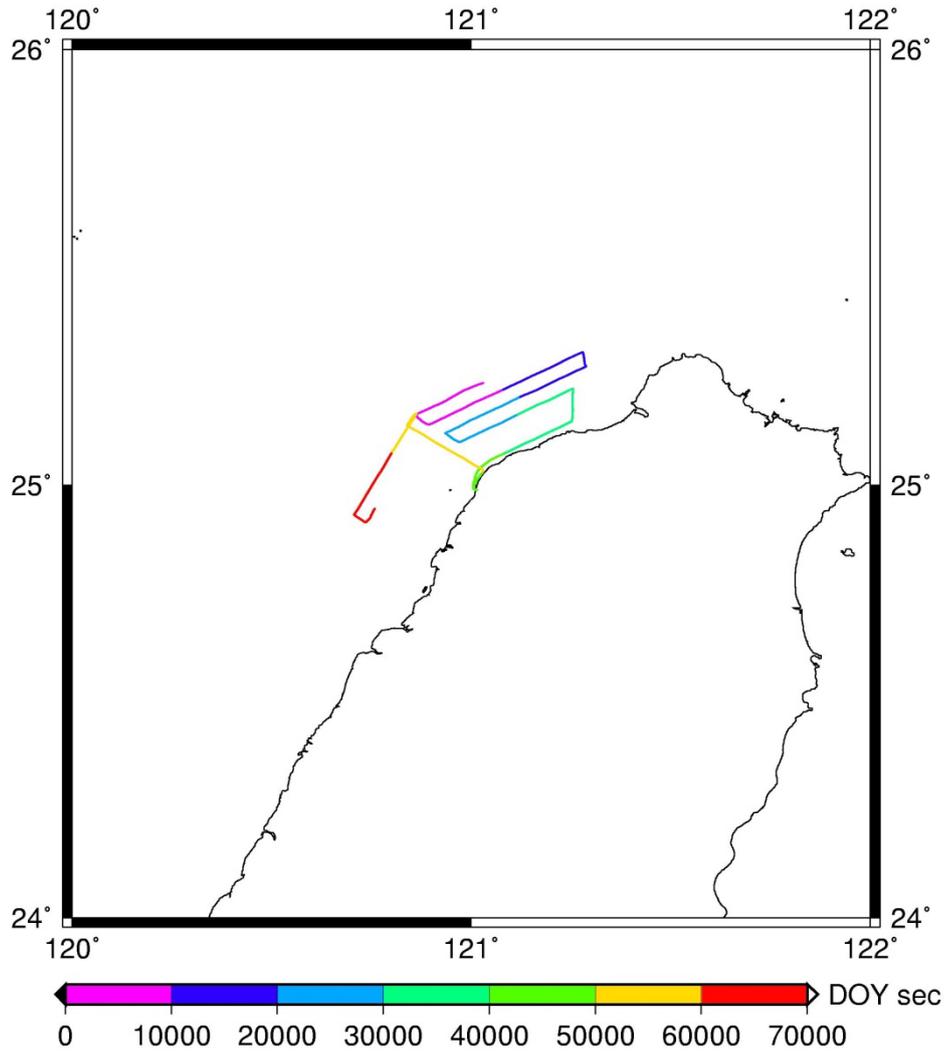


圖 5.9 DOY137 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖

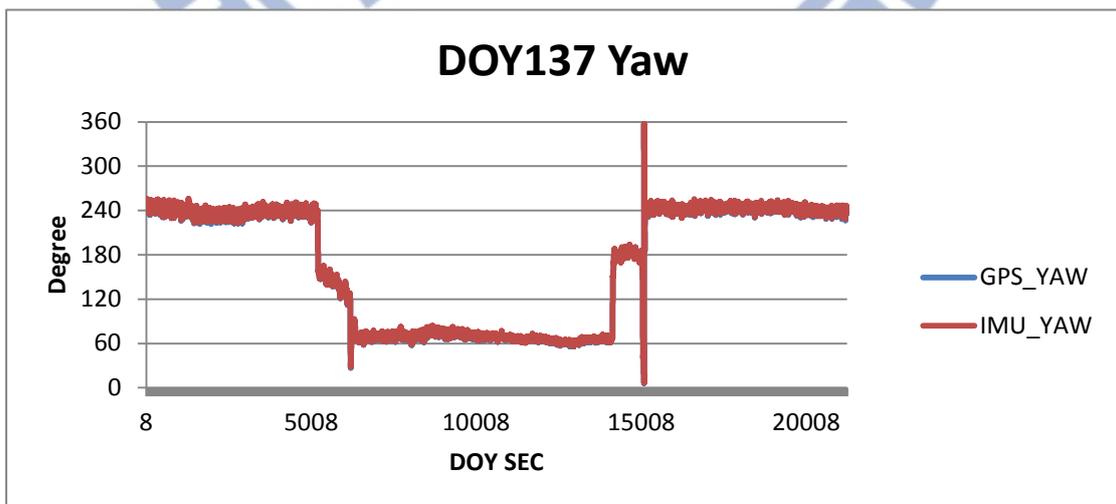


圖 5.10 DOY137 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得

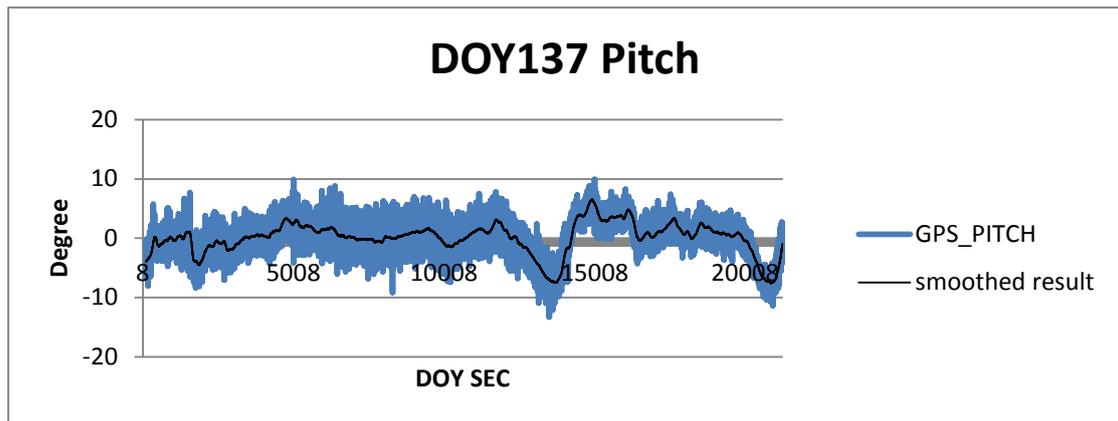


圖 5.11 DOY137 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

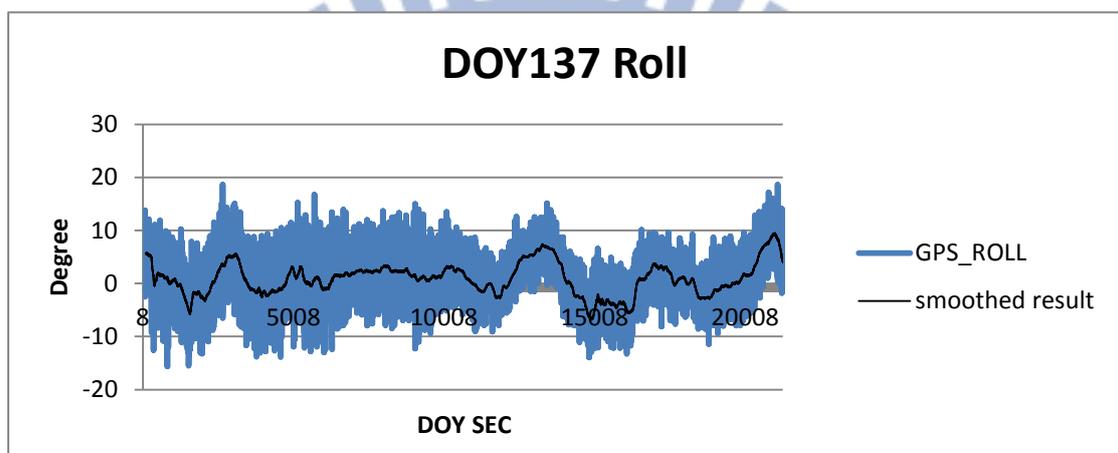


圖 5.12 DOY137 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

#### (4) DOY138

DOY138 之 GPS 數據經匹配後所得航線圖如圖 5.13；圖 5.14 至 5.16 為 DOY138 中第 28,546 秒至 50,022 秒之姿態角解算成果。在航向角成果方面，GPS 系統與 INS/GPS 整合系統所得之航向角成果趨勢及數值範圍相同；與 DOY138 之航線圖相較，可知此段時間內所解得之航向角正確的反映了航向的變化。圖 5.15 與圖 5.16 分別為船隻運動俯仰角及側傾角之 GPS 系統解算成果，俯仰角之擺動約介於 18 度至 -10 度間，側傾角之擺動則是大約介於正負 20 度間，由兩圖中的擺動趨勢線可知船隻在約 29,500 秒至 32,200 秒間有較大的擺動；另在 38,370 秒至 43,500 秒間有較高頻之擺動，與 DOY137 之成果類似，船隻改變航向之時間僅是被包含於其中。

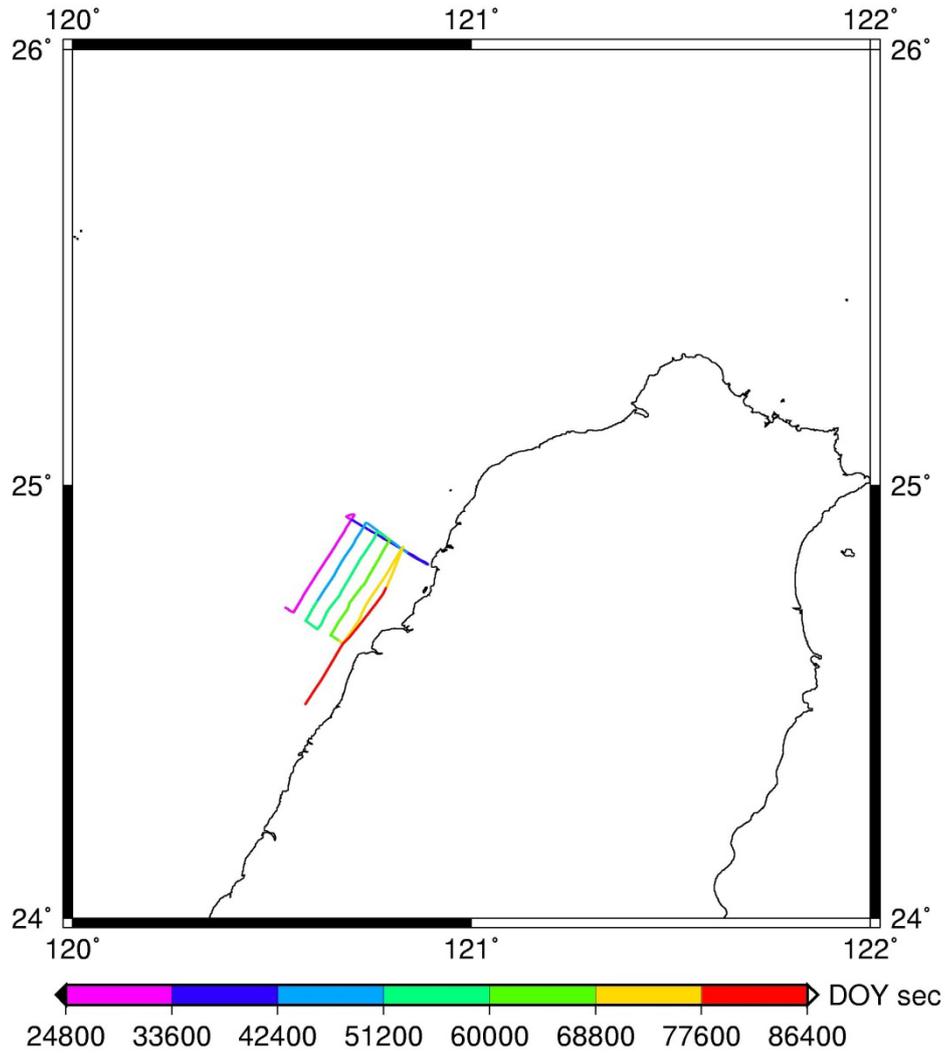


圖 5.13 DOY138 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖

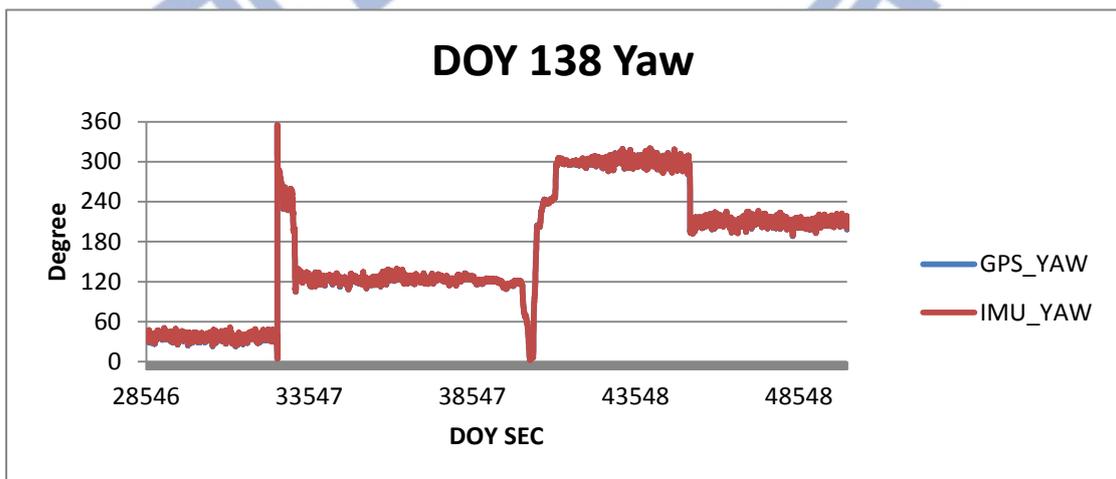


圖 5.14 DOY138 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得

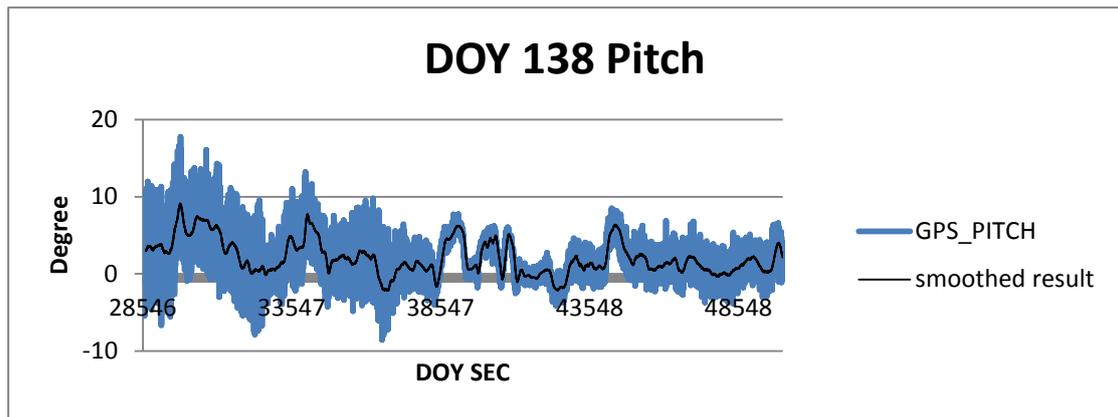


圖 5.15 DOY138 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角

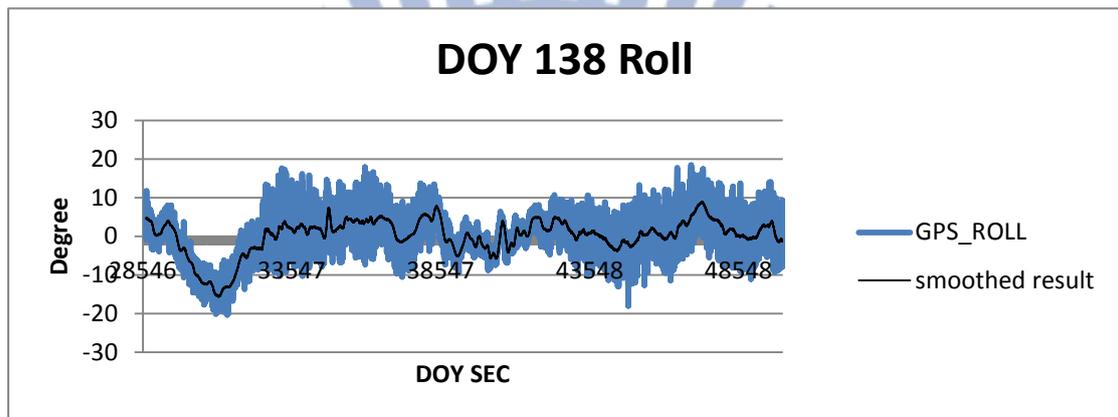


圖 5.16 DOY138 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

(5) DOY139

DOY139 之 GPS 數據經匹配後所得航線圖如圖 5.17；圖 5.18 至 5.20 為 DOY139 中第 28,605 秒至 34,754 秒之姿態角解算成果。GPS 系統與 INS/GPS 整合系統所得之航向角成果趨勢及數值範圍相同；與 DOY139 之航線圖相較，可知此段時間內解算所得之航向角正確的反映了航向的變化。圖 5.19 與圖 5.20 分別為船隻運動俯仰角及側傾角之 GPS 系統解算成果，俯仰角之擺動約介於 8 度至 -7 度間，側傾角之擺動則是大約介於正負 15 度間，此間震盪較劇之時段與圖 5.18 所示之航向變化時間相同。

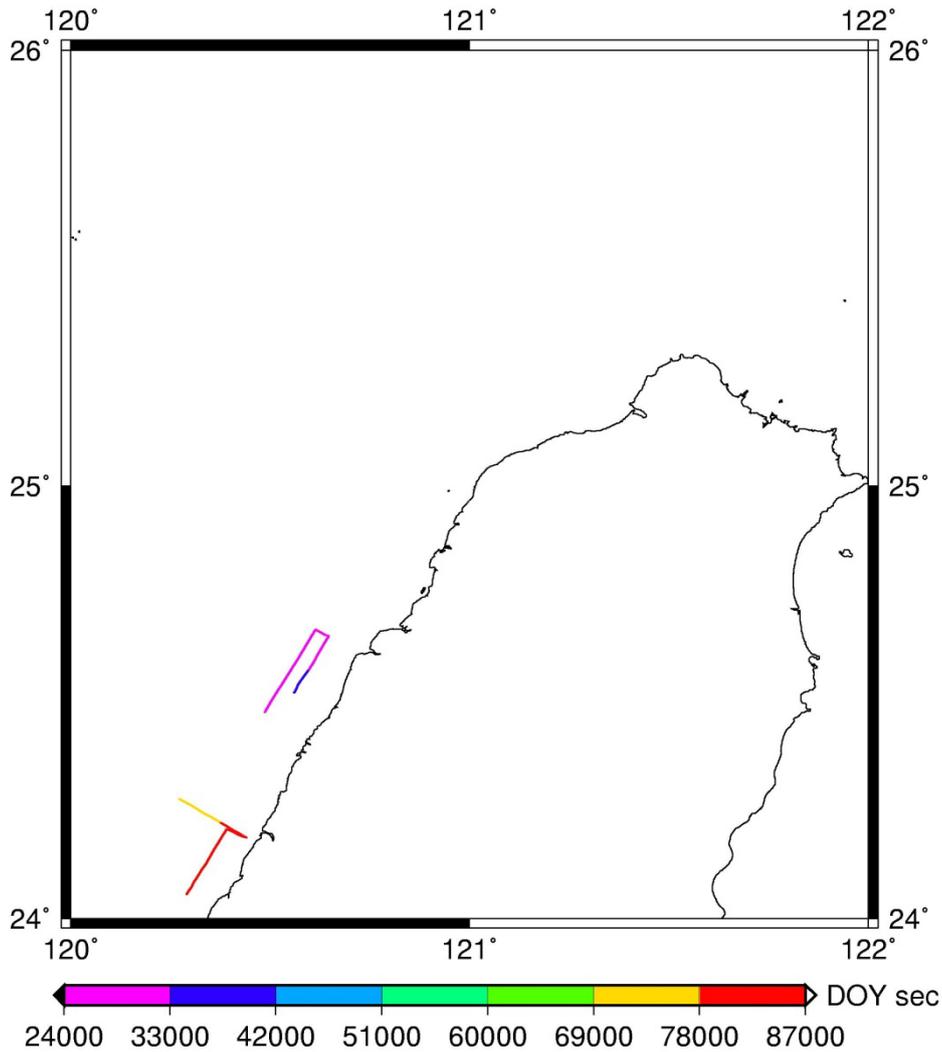


圖 5.17 DOY139 GPS 資料時間匹配後所繪航線圖

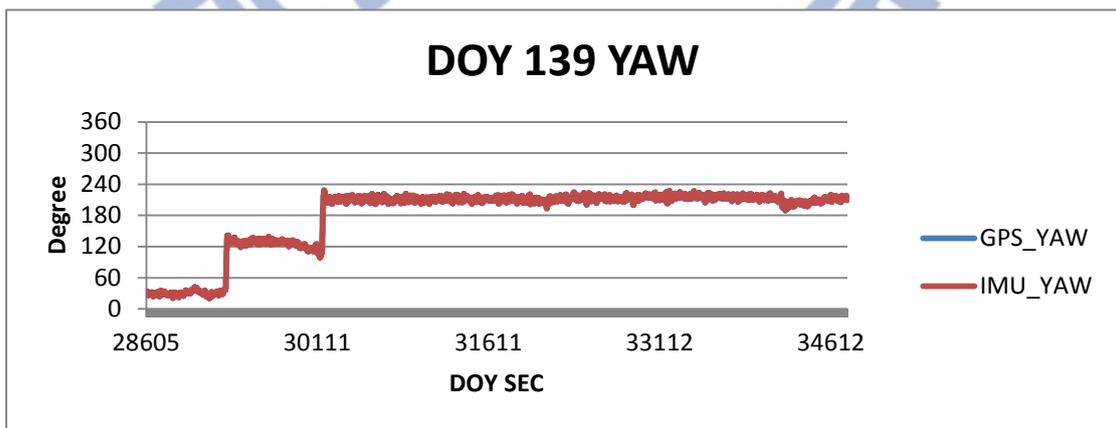


圖 5.18 DOY139 解算所得之船隻航向角：藍線為 GPS 系統解算所得；紅線為 INS/GPS 系統解算所得

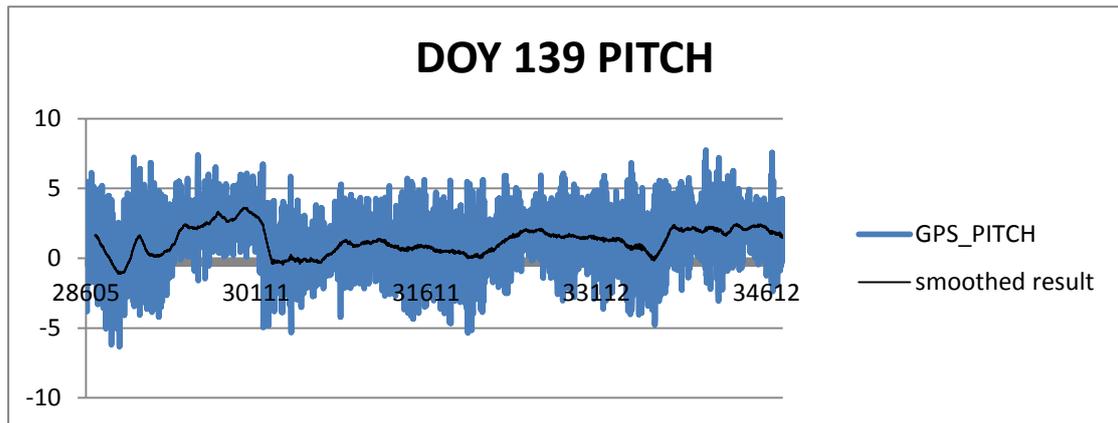


圖 5.19 DOY139 GPS 系統解算所得之船隻俯仰角

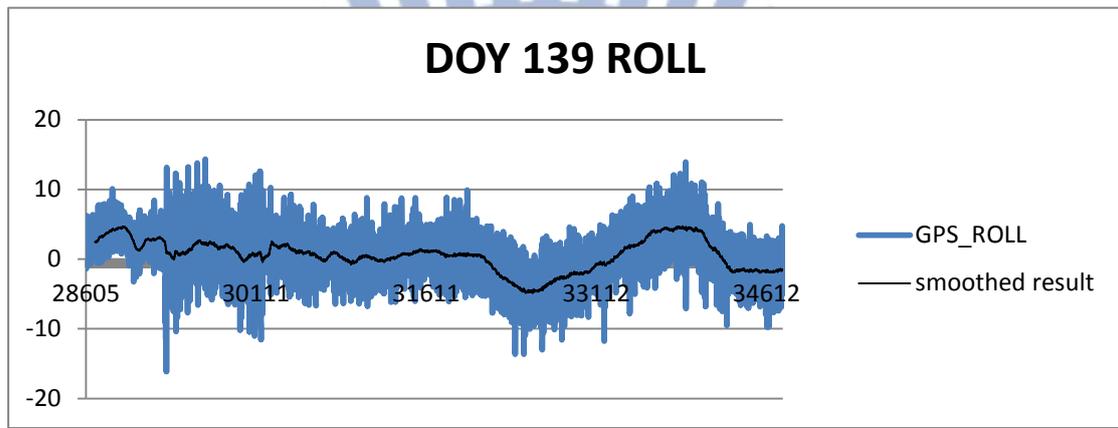


圖 5.20 DOY139 GPS 系統解算所得之船隻側傾角

綜合以上每日之成果討論：由航向角解算成果可確定以多天線 GPS 系統配合姿態角直接解法進行船隻運動姿態解算是可行的，由表 5.1 的統計數據結果與圖 5.21 至圖 5.25 可知，雖然有數值上的偏差，但卻非常集中，意即兩者間有高度相關的表現；在俯仰角及側傾角方面，得知船隻不只在航向改變時易有相對高頻的大幅度擺動，轉向前後定向航行時也同樣會有大幅度擺動產生，推測是因為船隻在一般航行狀況下，轉向前、後會分別會有減速、加速之舉，加上須對航行方向調整確認，以上種種因素都會使得船隻有不規則之晃動、傾斜，因此推斷主要影響俯仰角與側傾角的因素應是船隻航行時之狀況與當時的海況。

表 5.1 2012 年 DOY135~139 航向角(yaw) GPS 系統成果與 IMU 成果比較

DOY	Max	Min	Mean	Std.	RMS
DOY135	26.641	0.000	9.135	2.851	9.569
DOY136	14.573	-19.765	-1.410	1.824	2.306
DOY137	6.445	-3.359	-0.855	0.505	0.993
DOY138	10.922	-20.520	-0.375	1.914	1.950
DOY139	41.979	-19.313	-0.582	4.383	4.421

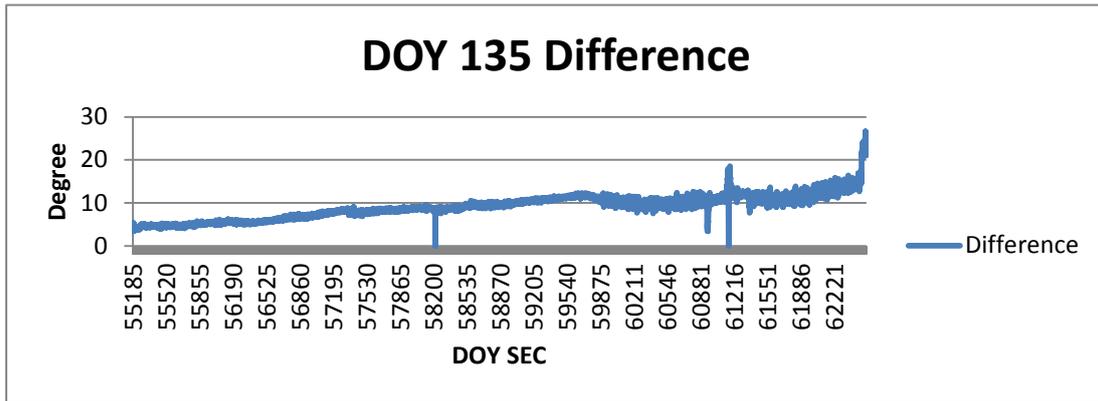


圖 5.21 DOY135 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值

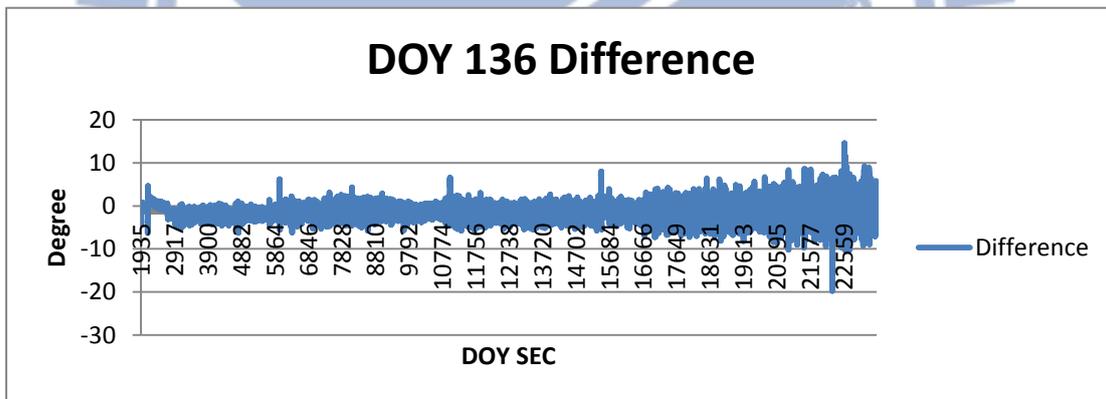


圖 5.22 DOY136 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值

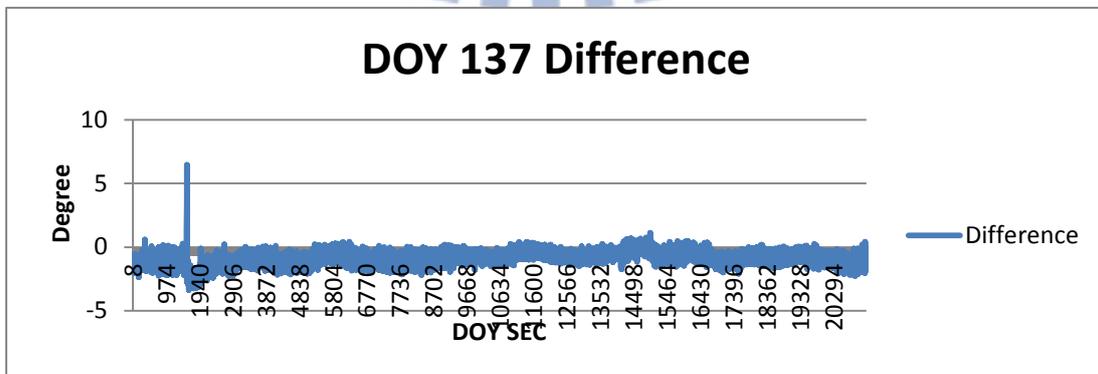


圖 5.23 DOY137 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值

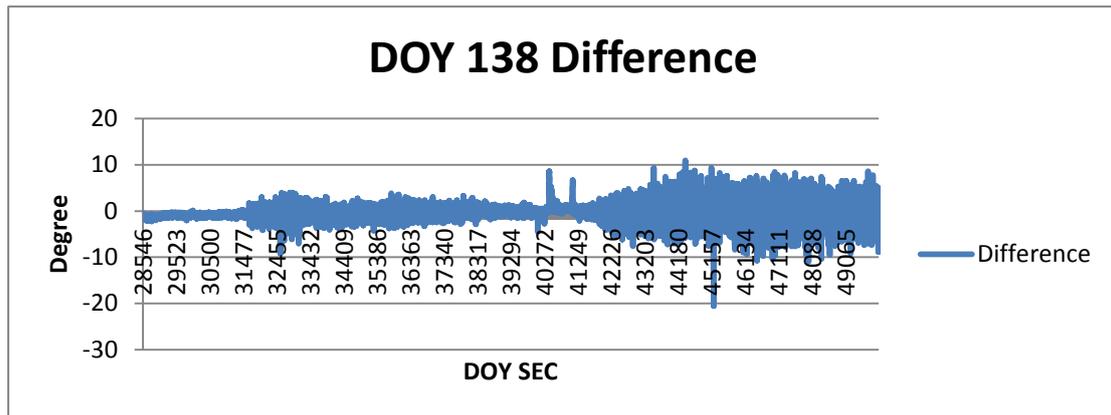


圖 5.24 DOY138 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值

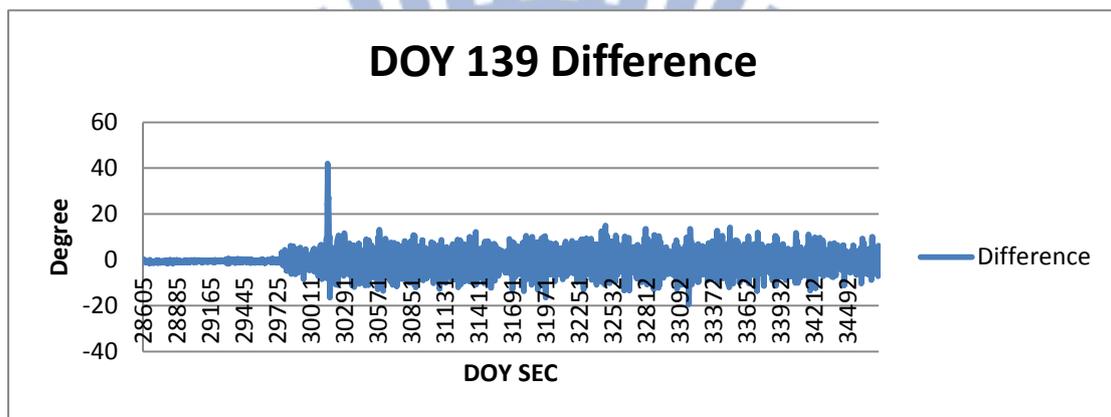


圖 5.25 DOY139 GPS 系統與 IMU 系統解算所得之航向角差值

## 5.2 海面高改正成果

過往在天線垂距改正方面，是於出航前先量測天線盤相位中心至海水面之垂直距離，接著在後續數據處理時，將出航前所量得之垂距視為一常數定值進行天線垂距改正。然而實際上船隻在航行過程中必定會隨著海潮晃動，除航向角外，俯仰角與側傾角皆會影響GPS接收天線至海水面間之垂直距離，天線垂距並不會真的維持一定值，因此本研究希望究透過船體航行中運動姿態的取得，提供另一天線垂距改正之方法，並分析此方法是否有助於海面高之修正。

### 5.2.1 與平均海水面模式DTU10 MSS 差異分析

DTU10 mean sea surface (MSS)為Danmarks Tekniske Universitet的Anderson et al. (2009)製作之1分全球平均海水面網格，其使用1993~2009共16年的T/P+Jason1j衛星測高資料，極區使用ERS-2、ICESAT、ENVISAT之衛星資料，在包含Topex/

Poseidon (T/P)、 Jason-1、 ERS-1、 ERS-2、 ENVISAT、 Geosat GM and GFO 衛星資料之組合下完成時間與空間的覆蓋。本研究解算所得之海面高共分兩類，一為定值天線垂距改正、一為經船姿態修正之天線垂距改正，兩者皆經NAO.99Jb海潮改正模式以及120秒罩窗濾波，而後與平均海水面模式DTU10進行比較。除比較有無姿態角改正之差異，本研究同時也比較分析姿態角的改正於船隻直線航行與轉向航行時所得海面高之表現。

### 5.2.1.1 直線航線

本節中，直線航行部分使用之船測數據為2012年DOY135至DOY136所得之數據，經截取編輯航線後得圖5.21之航線圖。本節將對有無海潮改正及姿態角改正天線垂距前後所得海水面高與DTU10參考場之差異值進行比較分析，分析成果如表5.1所示，共4種狀況：(i)無海潮改正、未經姿態角改正天線垂距之狀態下，標準偏差為0.863(m)、平均值為-1.110(m)；(ii)無海潮改正、經姿態角改正天線垂距之情況下，標準偏差為0.856(m)、平均值為-1.069(m)；(iii)有海潮改正、未經姿態角改正天線垂距之狀態下，標準偏差為0.203(m)、平均值為-1.145(m)；(iv)有海潮改正、經姿態角改正天線垂距之情況下，標準偏差為0.196(m)、平均值為-1.082(m)。綜合以上數值分析結果，可得到以下結論：

#### (1)

GPS所得海面高與DTU10 MSS間存一系統偏差，兩者參考橢球長半徑的不同對此偏差影響最大，GPS為6378137公尺，DTU10則是6378136.3公尺，差值為0.7公尺；此外，本研究的研究區域為近岸地區，DTU10在近岸部分之數據為內插所得，與本研究實地施測之1 Hz GPS資料不同，兩者之間會表現出相同的趨勢，但DTU10在絕對數值上的表現正確與否則有討論的空間，推測此為另一主要原因；最後一個可能造成偏差之原因為船出航前所量得之天線垂距造成，由於本研究之姿態改正式對於定值天線垂距的改正，故改正前後都會受此偏差影響。

(2)

海潮改正對標準偏差的表現貢獻很大，且為一系統性之改善。在無姿態角改正天線垂距的狀況下，標準偏差由海潮改正前的0.863(m)降至改正後的0.203(m)，減少了0.660(m)，約改善76.48%；而在有姿態角改正天下垂距的狀況下，則是由海潮改正前的0.856(m)降至改正後的0.196(m)，同樣也減少了0.660(m)，約改善77.10%。

(3)

船隻運動姿態改正天線垂距對平均值、標準偏差及均方根誤差之改善皆有貢獻，唯在平均值與均方根誤差兩項上有較顯著之改善成果：海潮改正前，姿態角修正天線垂距約可貢獻3~4(cm)之改善；海潮改正後，改善貢獻則約6.2(cm)。在無海潮改正的情況下，平均值由-1.110(m)降至-1.069(m)，之間差值為0.041(m)，改善約3.69%；均方根誤差由1.406(m)降至1.370(m)，之間差值為0.036(m)，改善約2.56%；標準差由0.863(m)降至0.856(m)，差值為0.007(m)，改善約0.81%。而在有海潮改正的狀況下，平均值由-1.145(m)降至-1.082(m)，之間差值為0.063(m)，改善約5.50%；均方根誤差由1.162(m)降至1.100(m)，之間差值為0.062(m)，改善約5.34%；標準差由0.203(m)降至0.196(m)，之間差值為0.007(m)，改善約3.45%。

為更清楚了解姿態角改正天線垂距之表現，圖5.22至圖5.42為各所選航線經海潮改正與姿態角改正天線垂距後之海面高成果，當中紅線部分為DTU10之海水面高、綠色線為加入姿態角改正天線垂距之海水面高、藍色線為未經姿態角改正天線垂距之海水面高。

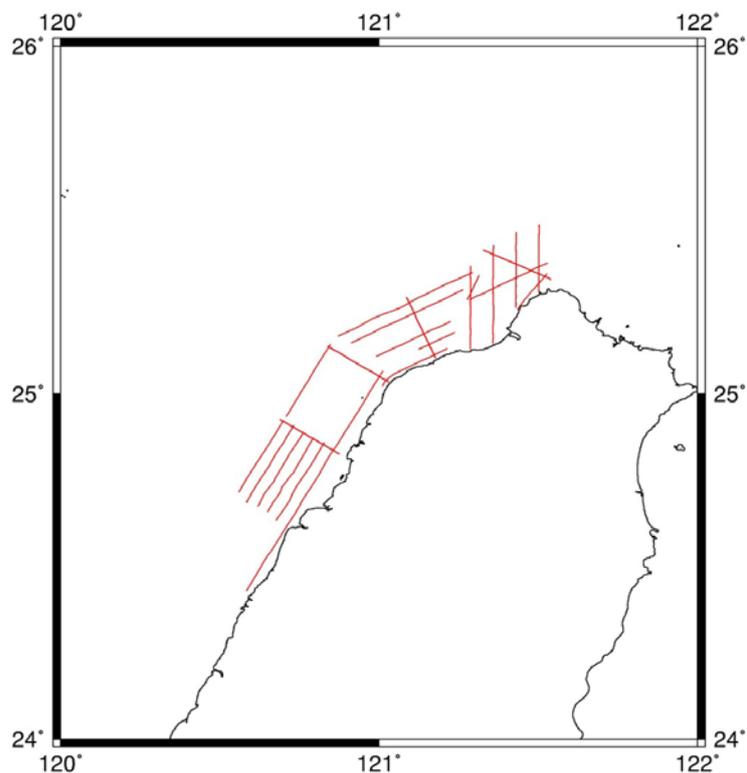


圖 5.26 2012 年 DOY135~139 船測編輯後所得直線航線圖

表 5.2 2012 年 DOY135~139 船測姿態角改正前後分析

海潮改正	Attitude Correction	Max (m)	Min (m)	Mean (m)	Std (m)	RMS (m)
無	Before	0.410	-3.360	-1.110	0.863	1.406
	After	0.700	-3.200	-1.069	0.856	1.370
有	Before	-0.490	-2.050	-1.145	0.203	1.162
	After	0.590	-1.420	-1.082	0.196	1.100

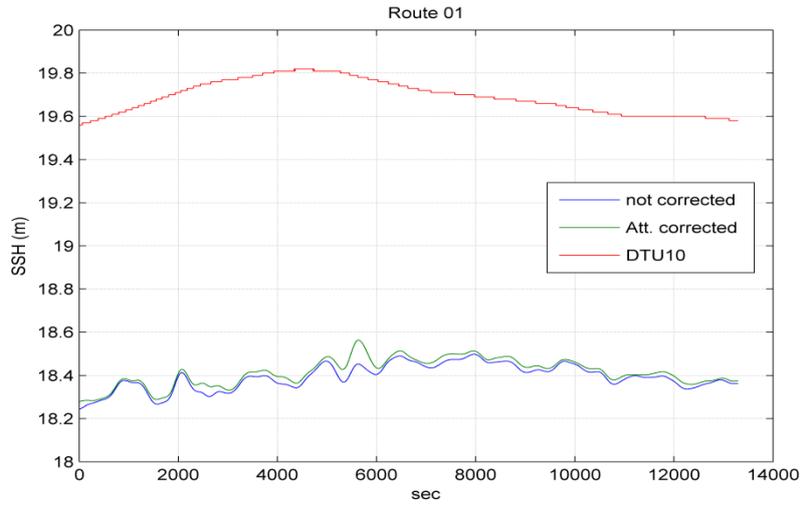


圖 5.27 所選航線 Route 01 經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

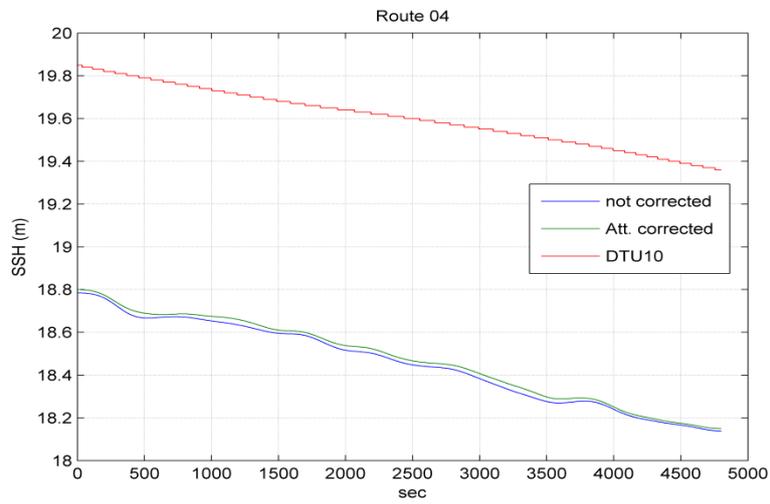


圖5.28 所選航線Route 04經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

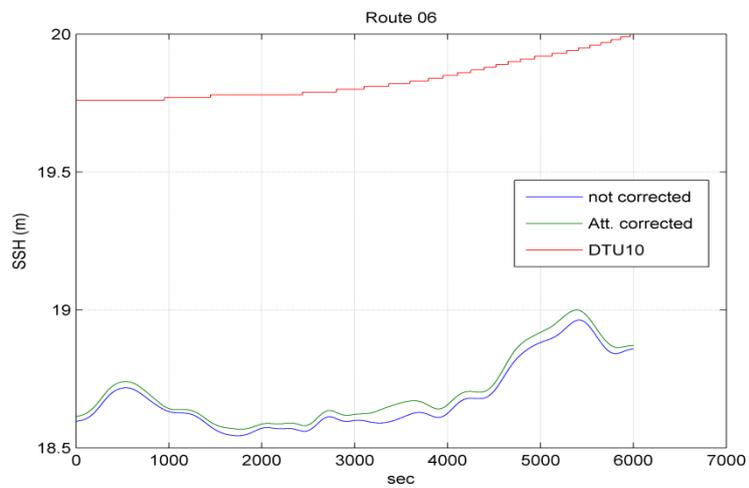


圖5.29 所選航線Route 06經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

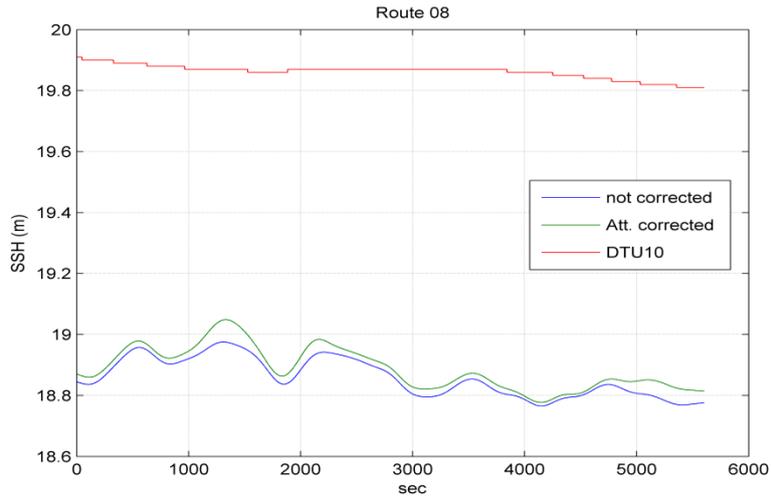


圖5.30 所選航線Route 08經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

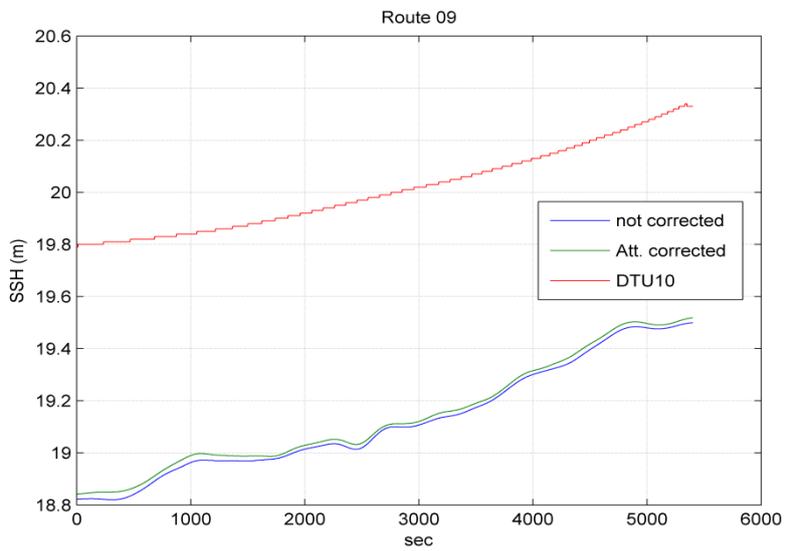


圖5.31 所選航線Route 09經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

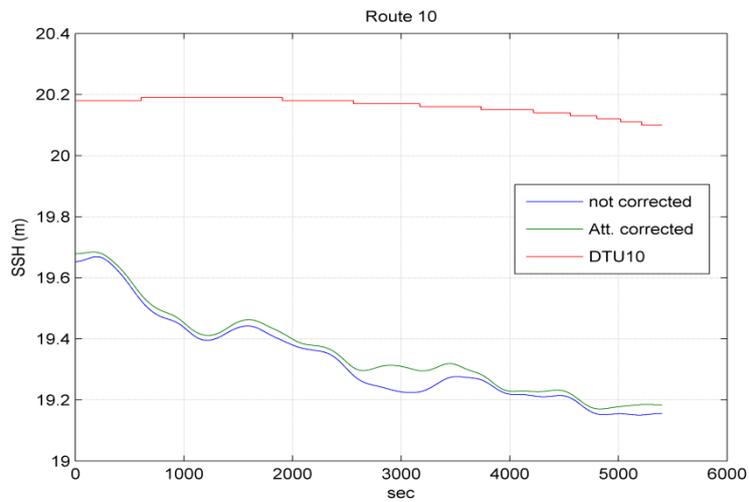


圖5.32 所選航線Route 10經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

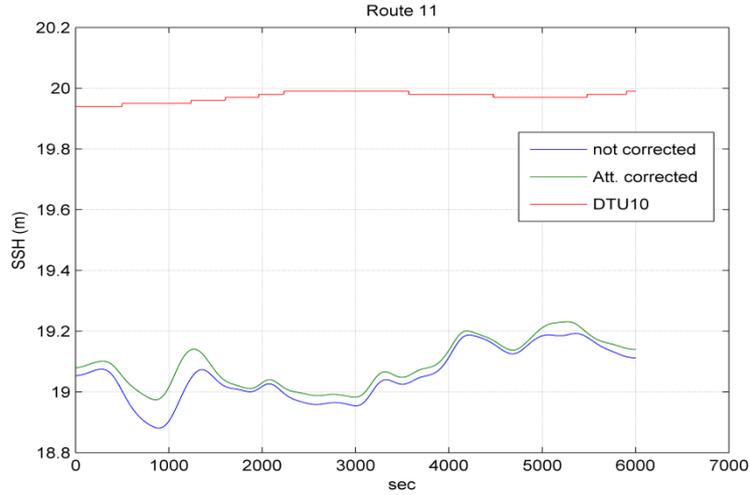


圖5.33 所選航線Route 11經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

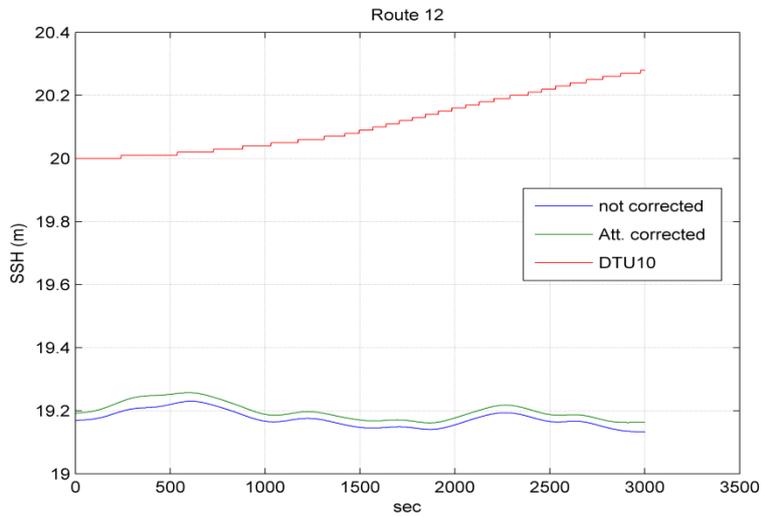


圖5.34 所選航線Route 12經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

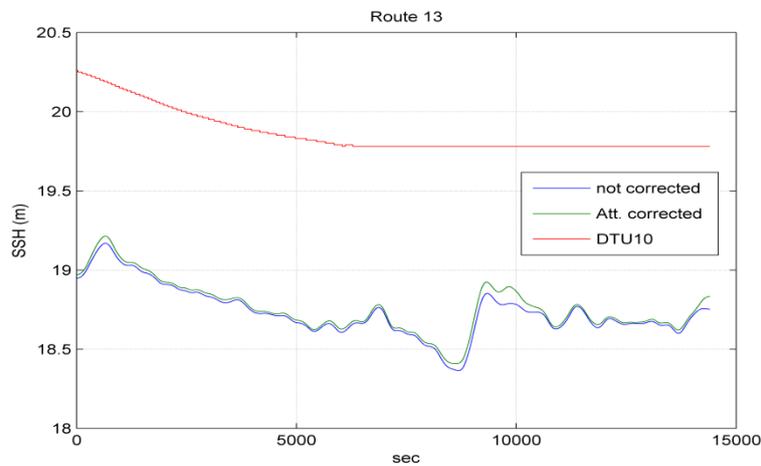


圖5.35 所選航線Route 13經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

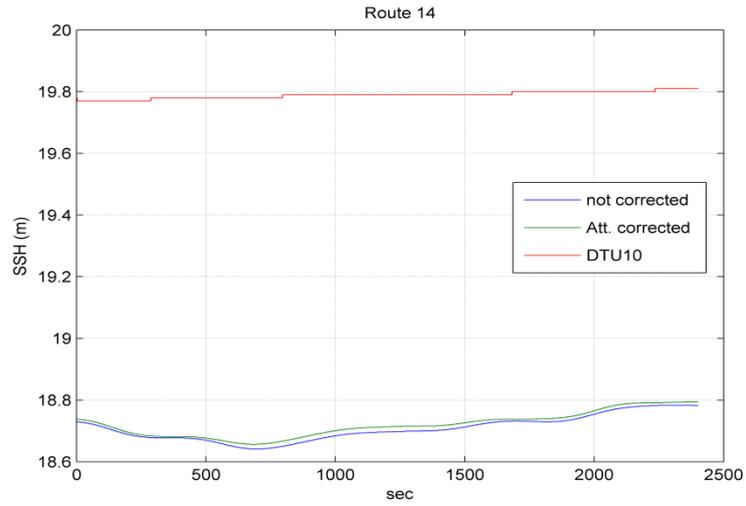


圖5.36 所選航線Route 14經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

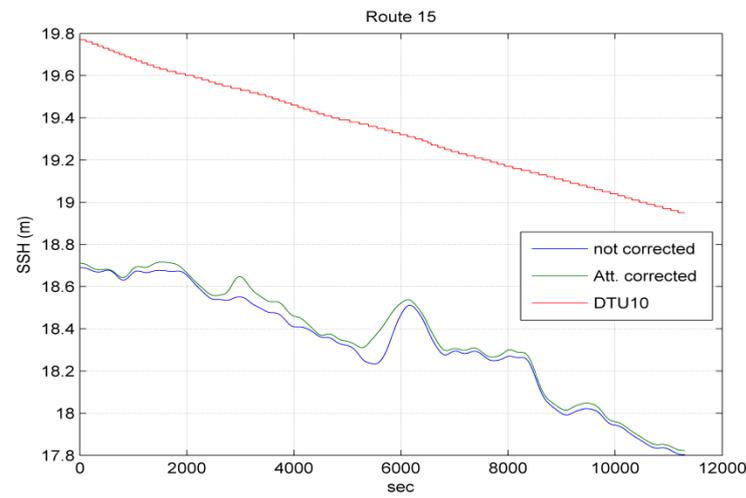


圖5.37 所選航線Route 15經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

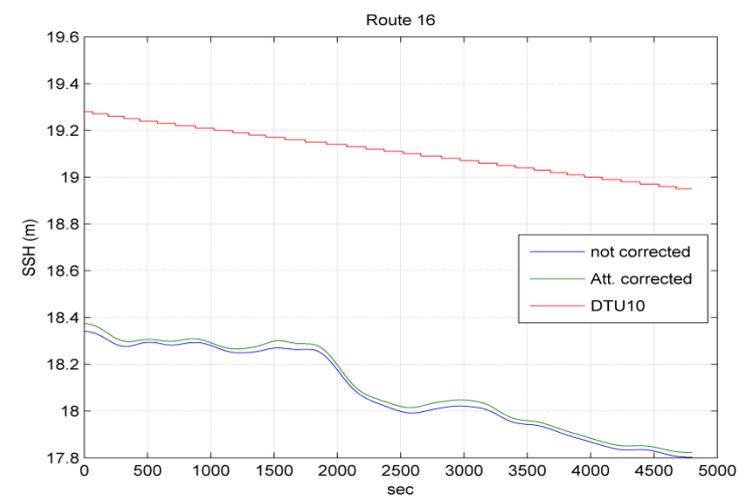


圖5.38 所選航線Route 16經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

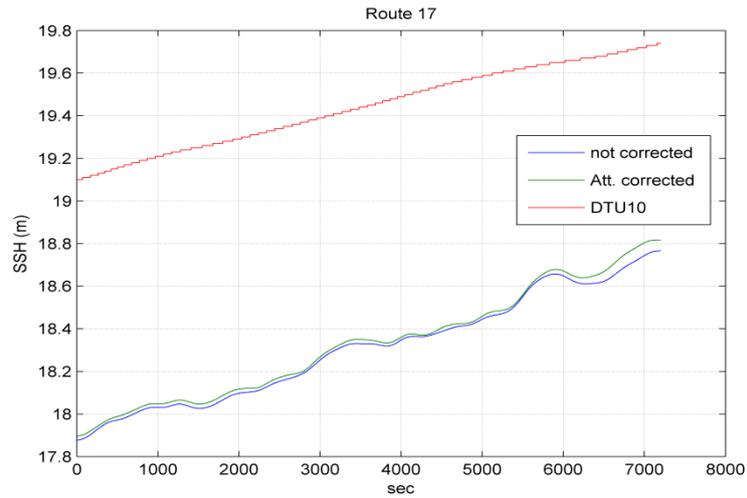


圖5.39 所選航線Route 17經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

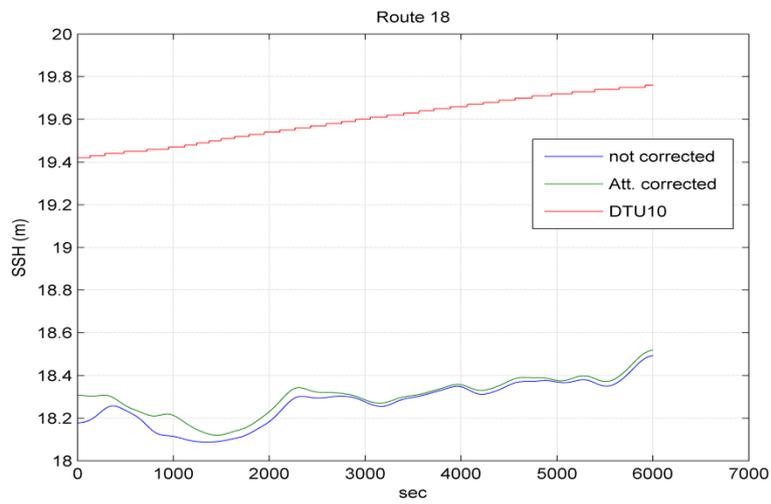


圖5.40 所選航線Route 18經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

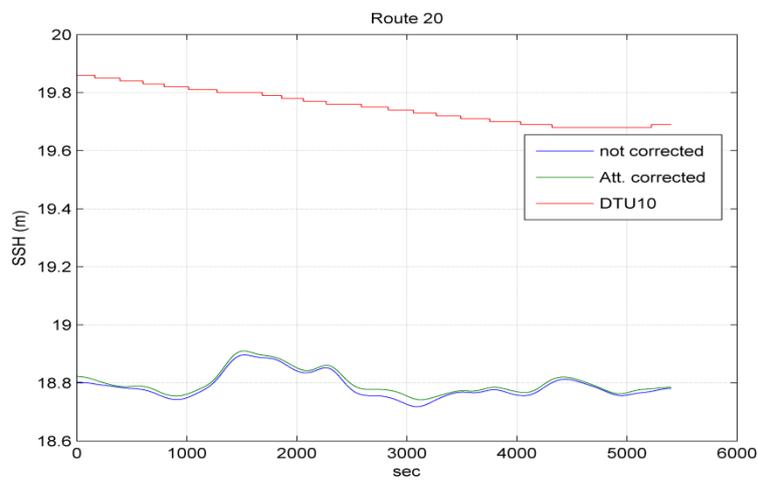


圖5.41 所選航線Route 20經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

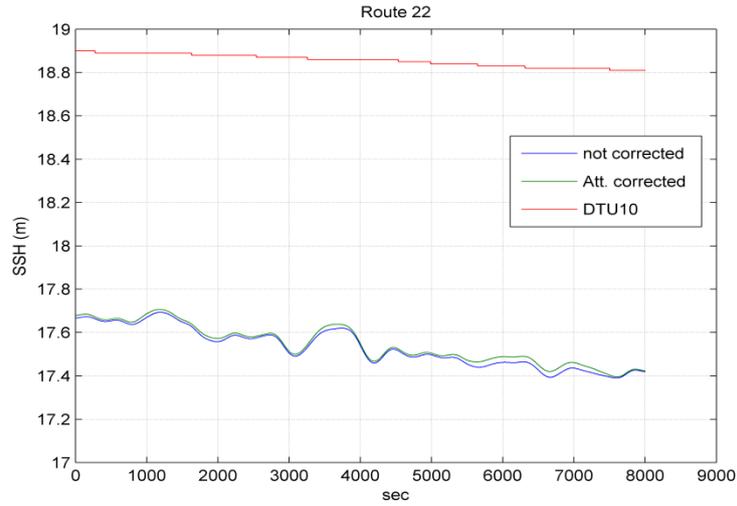


圖5.42 所選航線Route 22經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

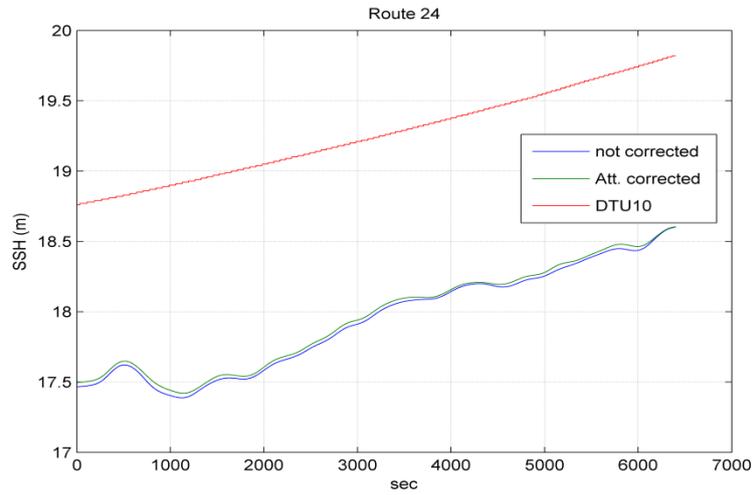


圖5.43 所選航線Route 24經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

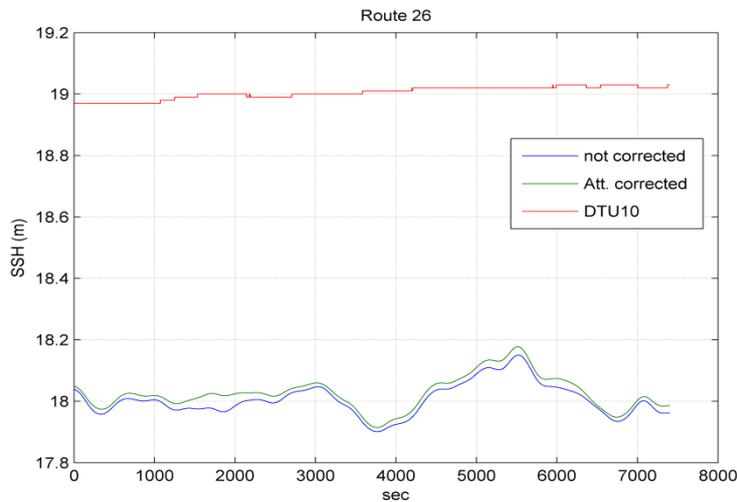


圖5.44 所選航線Route 26經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

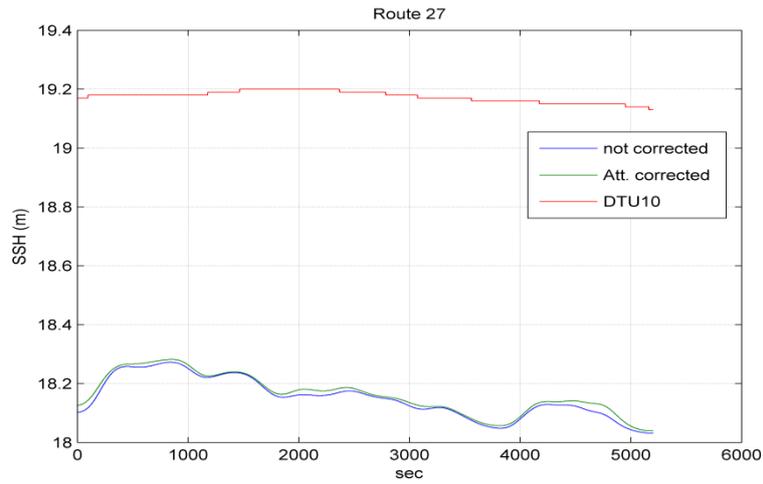


圖5.45 所選航線Route 27經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

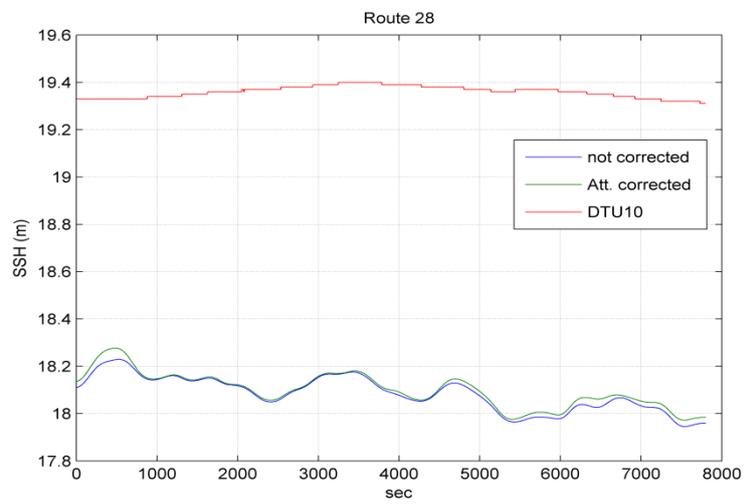


圖5.46 所選航線Route 28經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

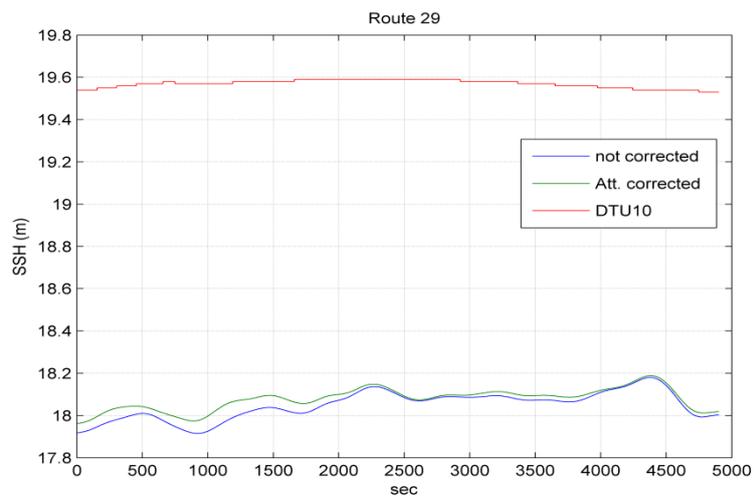


圖5.47 所選航線Route 29經姿態角改正天線垂距後所得之海水面高成果

### 5.2.1.2 轉向航線

轉向航行部分使用之數據為2012年DOY136之數據，航線截取編輯後如圖5.43所示。本節之將先就海潮改正後的狀況下、有無姿態角改正天線垂距的海面高成果與DTU10參考場之差異值進行比較分析，而後與5.2.1.1節之直線航行之成果比較。轉向航行分析成果如表5.2所示，共2種狀況：(i)未經姿態角改正天線垂距之狀態下，標準偏差為0.344(m)、方均根誤差為0.172(m)；(ii)經姿態角改正天線垂距之情況下，標準偏差為0.330(m)、方均根誤差為0.148(m)。綜合以上數值分析結果與前節直線航行部分比較，可得到以下結論：

在本節數據分析中，姿態角改正天線垂距前後之平均值由-1.022(m)降至-0.962(m)，之間差值為0.060(m)，改善約5.87%；標準偏差值由0.287(m)降至0.263(m)，之間差值為0.024(m)，改善約8.36%；方均根誤差由1.062(m)降至0.998(m)，之間差值為0.024(m)，改善約6.03%。而前節相同狀況下平均值改善約5.50%、標準差改善約3.45%及均方根誤差改善約5.34%，由此可知相較於直線航行，姿態角修正天線垂距於船隻轉彎處之海面高改善有更大比例的影響。

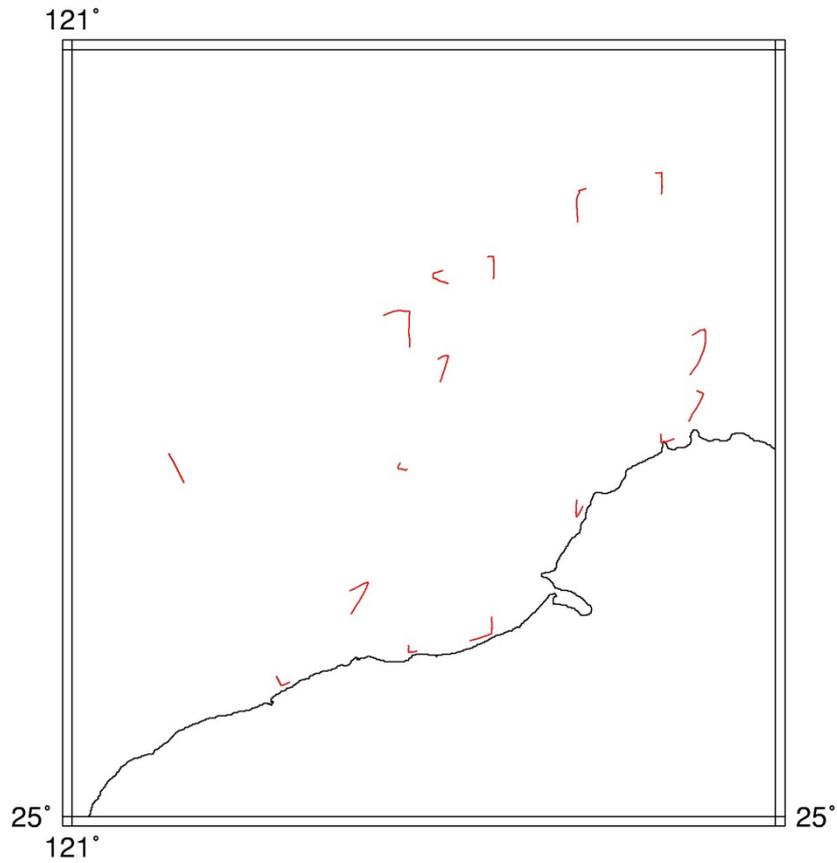


圖5.48 2012年DOY136船測編輯後所得船轉向航線圖

表 5.3 2012 年 DOY136 船測轉彎處姿態角改正成果分析

Attitude Correction	Max (m)	Min (m)	Mean (m)	Std (m)	RMS (m)
Before	0.380	-2.120	-1.022	0.287	1.062
After	0.400	-1.420	-0.962	0.263	0.998

## 5.2.2 交叉點分析

船載 GPS 的動態定位為一連續點的測量，船測航線具有不可重覆之特性，海面上也沒有固定之標點可進行重覆施測以評估其定位精度，因此只能藉由同次施測的船航行軌跡中，兩兩交叉航線交叉點的定位結果，進行差異值之分析。如圖5.44所示，在A航線與B航線上，交叉點位置的定位結果應一致。本節進行交叉點分析時，引入NAO.99Jb海潮模式進行海潮改正，固體潮為TRACK內部修正，並以120秒為單窗進行濾波，比較兩航線交叉點位置上高程定位結果的差異，以評估GPS定位成果精度，本節將比較加入姿態角改正天線垂距前後的海面高交叉點成果差異，分析結果如表5.3所示。

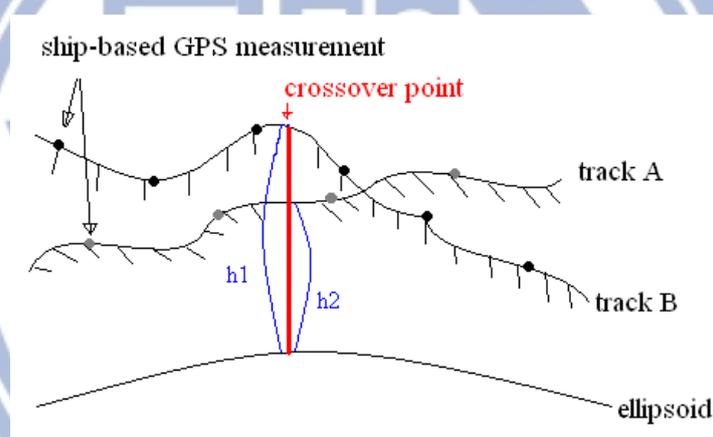


圖5.49 交叉點差異量分析示意圖

表5.4 姿態角改正天線垂距前後海面高交叉點分析成果

Attitude Correction	Max (m)	Min (m)	Mean (m)	Std (m)	RMS (m)
Before	0.330	-0.180	0.052	0.145	0.151
After	0.250	-0.20	0.046	0.142	0.146

此節共分析2種狀況：(i)未經姿態角改正天線垂距之狀態下，平均值為0.052(m)、標準偏差為0.145(m)、方均根誤差為0.151(m)；(ii)經姿態角改正天線垂距之情況下，平均值為0.046(m)、標準偏差為0.142(m)、方均根誤差為0.146(m)。綜合以上數值分析結果，可得到以下結論：

在本節數據分析中，姿態角改正天線垂距前後之交叉點差異平均值由0.052(m)降至0.046(m)，差值為0.006(m)，改善約11.53%；標準偏差值由0.145(m)降至0.142(m)，差值為0.003(m)，改善約2.07%；方均根誤差由0.151(m)降至0.146(m)，差值為0.005(m)，改善約3.31%。由以上數據顯示，相對而言，姿態角改正天線垂距大幅改善了交叉點平均值的表現。



## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

本文利用多天線GPS系統裝設於近岸船載重力計畫之船上進行資料收集，以此多天線GPS系統求解船隻出海施測時之運動姿態，而後以此運動姿態成果改正GPS天線垂距，並進而利用此時變天線垂距改善海面高之成果。綜合本研究之理論、過程與成果，可歸納出以下結論：

- (1) 船載測高無近岸雷達波波型不佳之問題，為近岸海面高測量及海洋重力測量可選用之方法。然若要有好的海面高成果，便必須要有良好之GPS定位精度與處理技術，本研究所使用之TRACK動態差分解算經靜態測試、外部精度評估與軟體內部評估後，得其精度表現為：靜態測試於高程方面約7~10公分、百公里以上基線約0.8~1.1公分；外部精度評估方面，以動態天線基線與全測儀所量得基線長作差異值分析，約1.5~3.5公分，平均為2.1公分；軟體內部精度評估之約1~4公分。
- (2) 本研究以多天線GPS系統並以直接解法解算船隻運動姿態，得到成果後與INS/GPS系統所得之航向角進行比較對照，兩者之航向角幾近完全相符，故可知此多天線GPS系統與姿態解直接解法在船隻運動姿態上求解是可行的。因兩系統之座標系統並未整合於同一系統，僅N方向相同，因此只能就航向角成果進行比較。
- (3) 由姿態角的成果觀察可以發現，船隻不只在航向改變時易有相對的大幅度擺動，於轉向前後定向航行時也同樣會有大幅度擺動產生，推測是因為船隻在一般航行狀況下，轉向前、後會分別會有減速、加速之舉，加上須對航行方向調整確認，以上種種因素都會使得船隻有不規則之晃動、傾斜，因此推斷主要影響俯仰角與側傾角的因素應是船隻航行時之狀況與當時的海況。
- (4) GPS所得海面高與DTU10 MSS間存一系統偏差，兩者參考橢球長半徑的不同對此偏差影響最大，GPS為6378137公尺，DTU10則是6378136.3公尺，差值

為0.7公尺；此外，本研究的研究區域為近岸地區，DTU10在近岸部分之數據為內插所得，與本研究實地施測之1 Hz GPS資料不同，兩者之間會表現出相同的趨勢，但DTU10在絕對數值上的表現正確與否則有討論的空間，推測此為另一主要原因；最後一個可能造成偏差之原因為船出航前所量得之天線垂距造成，由於本研究之姿態改正式對於定值天線垂距的改正，故改正前後都會受此偏差影響。

- (5) 直線航線之海面高改正成果共有兩個主要結論：其一是海潮改正對標準偏差的降低有所貢獻，約可將標準偏差改善77%；其二是船姿態改正天線垂距後對海面高平均值、標準偏差、RMS皆有貢獻，唯在平均值與均方根誤差兩項上有較顯著之改善成果，在有海潮改正的狀況下，平均值約改善5.50%、RMS約改善5.34%、標準差約改善3.45%。
- (6) 轉向航線之海面高改正成果，根據2012年DOY136之數據顯示，在有海潮改正之狀況下，姿態角改正天線垂距對海水面高的平均值約可改善5.87%、RMS約改善6.03%、標準偏差值約改善8.36%，相較於直線航線，轉向航線的改善幅度較大。
- (7) 交叉點分析方面，態角改正天線垂距對交叉點分析的標準偏差值約可改善2%、RMS約可改善3%、平均值則約可改善11.5%。由此數據可發現姿態角改正天線垂距大幅改善了交叉點平均值的表現；然標準偏差值與均方根誤差之改善比率皆與前節之直線航線成果較為接近，推估是因為交叉點位置皆分布於直線航線上，而非轉向航線，故其改善比率理當與直線航線之成果相接近。

## 6.2 建議

綜合上述結論，於本節提出以下建議：

- (1) 若未來仍要使用多天線GPS系統與INS/GPS系統進行姿態角成果的相互比較、檢核及應用，便應該於實驗之初設計一方法使得兩座標系統能夠吻合，例如訂製一正交之十字鋼座，將IMU置於十字交點上，GPS天線則安裝於十字之

四頂點，如此兩座標系統便可視為相同，能為後續比較應用上減少許多不確定性因素。

(2) 未來除將INS/GPS系統之成果用於檢核多天線GPS系統所得之姿態角成果外，希望能將兩者成果皆用於改正天線垂距以及之後的海面高改善，最後比較分析其間差異。

(3) 本研究主要是根據每一秒之GPS基線變化以求出船隻運動姿態，姿態成果的好壞取決於基線成果，而在4隻GPS天線皆為動態的狀況下，基線越長越容易取得相對較好的成果，在動態狀況下，GPS天線間的基線距離精度主要是



## 第七章 參考文獻

江凱偉，2011，100年度發展與應用多平台遙測製圖技術工作案總報告書，內政部。

邱冠維，2009，利用精密單點定位進行GPS浮標近即時精密定位，國立成功大學碩士論文，台南。

胡智祐，2009，發展低成本緊耦合示INS/GPS整合無縫車用導航系統之研究，國立成功大學碩士論文，台南。

施亘昶，2004，空載重力觀測系統，國立交通大學碩士論文，新竹。

黃金維，2011，100年度臺灣本島近岸船載重力測量作業期末報告，內政部國土測繪中心。

黃金維，2012，101年度臺灣本島近岸船載重力測量作業期初報告，內政部國土測繪中心。

陳逸如，2010，GPS船載海面高測量，國立交通大學碩士論文，新竹。

羅貽駢，2008，利用UKF發展UNS/GPS整合式定位演算法之評估，國立成功大學碩士論文，台南。

內政部國土資訊中心網頁。<http://www.egps.nlsc.gov.tw/index.html>

內政部地政司衛星測量中心網站。<http://www.moidlassc.gov.tw/>

Center for Orbit Determination in Europe, CODE. <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>

GAMIT-GLOBK. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>

International GNSS Service, IGS. <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>

Solid earth tide program. <http://home.comcast.net/~dmilbert/softs/solid.htm>

- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R.H. (1992), GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 97, 15,787–715,801.
- Bonnefond, P., Exertier, P., Laurain, O., Me´nard, Y., Orsoni, A., Jeansou, E., Haines, B.J., Kubitschek, D. G., and Born, G. (2003), Leveling the sea surface using a GPS-Catamaran, *Marine Geodesy*, 26:3, 319– 334.
- Bouin, M. N., Ballu, V., Calmant, S., Pelletier, B. (2009), Improving resolution and accuracy of mean sea surface from kinematic GPS, Vanuatu subduction zone, *J. Geod.*, doi: 10.1007/s00190-009-0320-7.
- Chadwell, C. D., and Bock, Y. (2001), Direct estimation of absolute precipitable water in oceanic regions by GPS tracking of coastal buoy, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3701-3704
- Chiang, K.W. (2004), INS/GPS Integration Using Neural Networks for Land Vehicular Navigation Applications, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada, UCGE Report 20209.
- Cove, K. M. and Santos, M. C. (2004), An analysis of carrier phase differential kinematic GPS positioning using DynaPos, *GPS Solut.*, Vol. 8, pp. 210-216.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., and Meindl, M. (2007), Bernese GPS software version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern.
- Dodson A.H., Shardlow, P.J., Hubbard, L.C.M., Elegred G., and Jarlemaek P.O.J. (1996), Wet Tropospheric effects on precise relative GPS height determination, *Journal of Geodesy*, No. 70.
- El-Rabbany, A. (2002), *GPS: The Global Positioning System*, Artech House, Canada.
- Foster, J. H., Carter G. S., and Merrifield, M. A. (2009), Ship-based measurements of sea surface topography. *Geophysical Research Letters*, vol.36, L11605, doi:10.1029/2009GL038324.

- Hwang, C., Hsiao, Y.S. and Shih, H.C. (2006), Data reduction for scalar airborne gravimetry: theory, computer package and a case study in Taiwan, *Computers and Geosciences*, 32 , pp. 1573-1584.
- Jekeli, C. (2001), *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Lu, G. (1995), *Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination*, Department of Geomatics Engineering PhD Thesis, University of Calgary.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., and Liu, J. (2008), Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations, *Journal of Geodesy*, Vol. 82, pp. 389-399.
- Gelb, A. (1974), *Applied Optimal Estimation*, The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Goad, C.C. and Goodman, L. (1974), A modified Hopfield tropospheric refraction correction model, paper presented at the AGU Annual Fall Meeting, San Francisco, CA, Dec. 12-17 (abstract: EOS, Vol. 55, p.1106, 1974)
- Kouba, J. and Héroux, P. (2001), Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solut.*, Vol. 5, No. 2, pp. 12-28.
- Langley, R.B. (1993), The GPS Observables, *GPS World*, April, 4(4), 52-59.
- Lambeck, K. (1988), *Geophysical geodesy: the slow deformations of the earth*. Oxford science publication. 718pp.
- Leick, Alfred, (1994), *GPS Satellite Surveying*, 2ed Edition, John Wiley & Son Inc. USA.
- Loncarevic, B. (1993), *Cruise Report: Matthew Motion Sensor Trails*, Geological Survey of Canada, Open File Report No. 93-2730.

- Matsumoto, K., Takanezawa, T., and Ooe, M. (2000), Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan. *J. Oceanography.*, 56, 567–581.
- Misra, P. and P. Enge, (2001), *Global Positioning System: Signal, Measurements and Performance*. 1st Edition, Ganga-Jamuna Press.
- Parkinson, B.W. and Spilker, Jr. J (1996), *Global Positioning System: Theory and application Vol.1*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC.
- Rocken, C., Johnson, J., Van Hove, T., and Iwabuchi, T. (2005), Atmospheric water vapor and geoid measurements in the open ocean with GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12813, doi: 10.1029/2005GL022573
- Satirapod, C. and Homniam, P. (2006), GPS precise point positioning software for ground control point establishment in remote sensing applications, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 11-14.
- Schwarz, K.P. and J. Krynski (1992), *Fundamentals of Geodesy*, UCGO Report No.10014, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Canada.
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy*, 2nd Edition, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Shen, X. and Gao, Y. (2002), *Kinematic Processing Analysis of Carrier Phase based Precise Point Positioning*. The University of Calgary, Canada.
- Teferle, F.N., Orliac, E.J., Bingley, R.M. (2007), An assessment of Bernese GPS software precise point positioning using IGS final products for global site velocities, *GPS Solut.*, 11:205-213, doi 10.1007/s10291-006-0051-7
- Trehn, E. (2006), *GPS Precise Point Positioning An Investigation in Reachable Accuracy*. Master thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

Watson, C., Tregoning, P., Coleman, R. (2006), The impact of solid earth tide models on GPS coordinate and tropospheric time series, *Geophysical Research Letters*, 33 (L08306). pp. 1-4.

Wertz, J.R. (1978), *Spacecraft Attitude Determination and Control*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Wu, Y., Guo, J. (2008), Single point positioning with sequential least-squares filter and estimated real-time stochastic model, *Geo-spatial Information Science* 11(1):13-16 Volume 11, Issue 1 doi 10.1007/s11806-007-0162-5

Zumberge, J.F. (1999), Automated GPS Data Analysis Service, *GPS Solut.*, 2(3):pp 76-78.

