

99-59-7468

MOTC-IOT-98-H3DB006

應用 GPS 反射信號建立波高 量測系統(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99-59-7468

MOTC-IOT-98-H3DB006

應用 GPS 反射信號建立波高 量測系統(1/4)

著者：李兆芳、沈立忠、曾清涼、徐博賢、謝欣蕙
王顥豪、謝依潔、邱永芳、簡仲璟、李俊穎

交通部運輸研究所

中華民國 99 年 5 月

99

應用 GPS 反射信號建立波高量測系統
(14)

交通部運輸研究所

GPN : 1009901600

定價 200 元

國家圖書館出版品預行編目資料

應用 GPS 反射信號見立波高量測系統. (1/4) /

李兆芳等著. — 初版. — 臺北市：交通部

運研所，民 99. 05

面；公分

參考書目：面

ISBN 978-986-02-3674-3(平裝)

1. 波動 2. 衛星觀測 3. 遙感探測

351.941

99009806

應用 GPS 反射信號建立波高量測系統(1/4)

著者：李兆芳、沈立忠、曾清涼、徐博賢、謝欣蕙、王顥豪、謝依潔、
邱永芳、簡仲璟、李俊穎

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 台北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04) 26587176

出版年月：中華民國 99 年 5 月

印刷者：

版(刷)次冊數：初版一刷 100 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：200 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 台北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 台中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1009901600

ISBN：978-986-02-3674-3 (平裝)

著作財產權人：中華民國 (代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：應用 GPS 反射信號建立波高量測系統(1/4)			
國際標準書號 (或叢刊號) ISBN978-986-02-3674-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1009901600	運輸研究所出版品編號 99-59-7468	計畫編號 98-H3DB006
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：簡仲璟 研究人員：李俊穎 參與人員：錢爾潔、馬維倫 陳正義、張麗瓊 聯絡電話：04-26587132 傳真號碼：04-26564415	合作研究單位：國立成功大學 計畫主持人：李兆芳 研究人員：沈立忠、曾清涼、徐博賢 謝欣蕙、王顛豪、謝依潔 地址：臺南市大學路一號 聯絡電話：06-2757575	研究期間 自 98 年 3 月 至 98 年 10 月	
關鍵詞：衛星定位系統；GPS 反射訊號；微波遙測；波浪；水位			
<p>摘要：</p> <p>本研究目的在應用 GPS 直接訊號和反射訊號進行波浪水位觀測，藉以建立另一種在實驗室中或對實際海面可行的波浪水位量測技術。本年度的工作內容包括(1)在成大臺南水工所大型斷面水槽進行波高量測，在中型斷面水槽進行靜止水面觀測，和穩定下降水位觀測，以及(2)在臺南安平港內進行水位觀測。研究中以 GPS 整合型接收儀應用於斷面水槽波形與海面海浪之變化量測，利用同時接收 GPS 左旋與右旋訊號之整合天線，提供 GPS 直接與反射訊號進行相位觀測、GPS 反射點坐標定位分析、斷面水槽波形與海面海浪之水位高程變化計算。在大型斷面水槽中觀測規則波波高 85cm 週期為 6 秒的波浪。本研究觀測結果若以波形函數修正反射點位置高程，則所得波形與波高計記錄結果比較，可得 85% 吻合度的結果。在中型斷面水槽進行靜止水面觀測，以及 1 小時連續下降水位 30 公分觀測，結果與波高計和水準尺之量測作比較，顯示有很好的的一致性，偏差在 0.5~1.0 公分。另外在安平港潮位站進行 6 小時之海水面變化觀測，結果也與潮位站資料和水準尺之量測作比較，顯示水位趨勢相當一致，在 25 公分的水位變化中偏差約 1.0~3.0 公分。</p> <p>本研究初步利用 GPS 直接訊號和反射訊號進行進行波浪水位觀測，所得結果在精確度和一致性上顯示未來應用相當有潛力，下年度將針對各種波浪條件和 RGPS 觀測範圍進行研究。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
99 年 5 月	148	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 (解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密) <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Application of Reflected GPS for Wave Measurements (1/4)			
ISBN (OR ISSN) ISBN978-986-02-3674-3 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1009901600	IOT SERIAL NUMBER 99-59-7468	PROJECT NUMBER 98-H3DB006
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiu Yung-fang, Jian Jung-jing PROJECT STAFF: Lee Chun-ying PARTICIPATOR: Chien Er-jier, Ma Wei-lun, Chen Cheng-yi, Chang Lee-chung PHONE: (04) 26587135 FAX: (04) 26571329			PROJECT PERIOD FROM March 2009 TO October 2009
RESEARCH AGENCY: NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lee, Jaw-Fang PROJECT STAFF: Tseng Ching-ling, Hsu Po-hsien, Hsieh Hsin-hui, Wang Yi-hao, Hsieh Yi-jie ADDRESS: NO.1, UNIVERSITY RD., TAINAN CITY 701, TAIWAN, R.O.C. PHONE: (06) 2757575			
KEY WORDS: GPS, RGPS, MICROWAVE REMOTE SENSING, WAVE, WATER LEVEL			
ABSTRACT: <p>The objective of this study is to use the direct and reflected signals of GPS to determine the water level of water flume and sea level in coastal area, as well as to establish a practicable technique for measuring sea water level.</p> <p>In this year, measurements of (1) water waves in the Super Tank and still water level and steady descending water level in the Mid-size wave flume, and (2) sea water level in Anping Harbor (Tainan), are performed. In this research, an integrated GPS receiver that employs direct and reflected GPS signals for the measurement is introduced. Both RHCP and LHCP antennas are employed to simultaneously receive the L1 and L2 carrier phase of direct and reflected signals. After the data analysis of the GPS observation, the position of signal reflection and the water level of the wave are solved. In the Super Tank, regular waves with a wave height of 85cm and 6-second period are produced. Upon the correction of wave function, the differences between the measurement of wave gauge and the present results are identical within 85%. After improving the accuracy of RGPS positioning, the still water level and the steady descending of water level observation for one hour are performed, and the results of the RGPS, wave gauge, and staff meter are coincided within 0.5cm ~ 1.0 cm. In addition, a 6-hour observation of sea water level inside Anping Harbor indicates that results among the RGPS, tide gauge, and staff meter have only 1.0cm ~ 3.0 cm differences.</p> <p>The present study assures that RGPS measurements can have the same order of accuracy as the wave gauge or tide gauge, and can have potential applications. Different wave conditions and ranges of RGPS measurement will be focused on in the next year.</p>			
DATE OF PUBLICATION May 2010	NUMBER OF PAGES 148	PRICE 200	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目錄

中文摘要表.....	I
英文摘要表.....	II
目錄	III
圖目錄	V
符號表	VIII
第一章 前言.....	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 文獻回顧	1-3
1.3 四年全程計劃說明	1-5
1.4 本年度研究方法與目的	1-7
第二章 整合 GPS 直接與反射訊號定位計算原理.....	2-1
2.1 GPS 直接訊號定位.....	2-1
2.1.1 虛擬距離觀測量定位	2-1
2.1.2 載波相位觀測量定位	2-3
2.1.3 整數週波未定值之求解	2-9
2.1.4 電離層延遲誤差處理	2-11
2.1.5 對流層延遲誤差處理	2-12
2.2 GPS 反射訊號定位.....	2-13
2.2.1 GPS 訊號的偏極化.....	2-13
2.2.2 GPS 訊號鏡面反射模型.....	2-16
2.2.3 雙站雷達之反射模型	2-18
2.2.4 GPS 反射訊號之反射點定位與反射點(面)高程計算.....	2-20
第三章 試驗儀器與作業流程	3-1
3.1 GPS 接收儀功能及運作方式.....	3-1
3.2 GPS 試驗儀器性能.....	3-3
3.3 試驗流程與使用軟體	3-4
3.4 精密定位已知參考點	3-5
3.5 試驗步驟與過程	3-11

第四章 試驗過程與計算結果	4-1
4.1 大型斷面水槽波高水位觀測	4-1
4.1.1 試驗場地與儀器架設	4-1
4.1.2 觀測結果比較分析	4-3
4.2 中型斷面水槽靜水位與連續水位下降觀測	4-7
4.2.1 試驗配置與儀器架設	4-7
4.2.2 觀測結果比較分析	4-8
4.3 安平港港內水位觀測	4-14
4.3.1 試驗配置與儀器架設	4-14
4.3.2 觀測結果比較分析	4-15
第五章 結論與建議	5-1
5.1 結論	5-1
5.2 建議	5-1
參考文獻	參-1
附錄 I GPS 訊號結構與定位模式概述	附 1-1
附錄 II GPS 試驗儀器設備功能	附 2-1
附錄 III LHCP 反射訊號在五衛星觀測量訊號強度變化比較圖	附 3-1
附錄 IV RGPS 試驗限制與現場量測考量說明	附 4-1
附錄 V 期中期末報告審查意見處理情形表	附 5-1
附錄 VI 期末報告簡報檔	附 6-1

圖目錄

圖 1-1	近岸(離岸 2.0 公里以上)海面波浪水位觀測	1-6
圖 1-2	近岸(離岸 2.0 公里以上)延伸式海面波浪觀測	1-6
圖 1-3	近岸(離岸 2.0 公里以上)區域涵蓋式海面波浪觀測	1-7
圖 1-4	研究流程圖	1-9
圖 2-1	GPS 基本定位原理	2-2
圖 2-2	單程測距示意圖	2-3
圖 2-3	虛擬距離與系統誤差示意圖	2-4
圖 2-4	載波相位與週波未定值示意圖	2-6
圖 2-5	二次差示意圖	2-8
圖 2-6	起始解算 GPS 直接訊號接收儀坐標	2-10
圖 2-7	觀測站之實數與整數週波未定值求解後坐標	2-10
圖 2-8	電離層延遲量區塊圖	2-11
圖 2-9	對流層延遲量區塊圖	2-12
圖 2-10	電磁波傳播方向模型	2-14
圖 2-11	右旋偏極化波	2-15
圖 2-12	左旋偏極化波	2-15
圖 2-13	反射訊號偏極化改變	2-17
圖 2-14	反射訊號極性和入射角度的關係	2-17
圖 2-15	單站雷達示意圖	2-18
圖 2-16	雙站雷達示意圖	2-18
圖 2-17	GPS 直接訊號(RHCP)與反射訊號(LHCP)接收示意圖	2-20
圖 2-18	GPS 反射訊號定位示意圖	2-21
圖 3-1	GPS 接收儀基本組成與運作方式	3-1
圖 3-2	SOKKIA GPS 雙頻接收儀	3-3
圖 3-3	RHCP 天線	3-3
圖 3-4	LHCP 天線	3-4
圖 3-5	中型水槽架設 RHCP, LHCP 與水準尺位置	3-5
圖 3-6	RGPS 之 GPS GROUND DETECT 流程	3-5
圖 3-7	成功大學臺南水工試驗所斷面水槽衛照圖與衛星訊號路徑	

圖 3-8	GPS 精密定位輔助修正資料.....	3-10
圖 3-9	成功大學海事所陽台執行 RGPS 訊號接受與操作訓練.....	3-11
圖 3-10	儀器校正與波高計記錄器	3-12
圖 3-11	實驗儀器接受與訊號處理示意圖	3-13
圖 4-1	成功大學臺南水工試驗所大型斷面水槽 T6H85 實驗中造波 圖.....	4-1
圖 4-2	RHCP/LHCP 天線與水槽剖面示意圖	4-2
圖 4-3	RHCP 高程, LHCP 高程,波高計水位量測值與 PRN15, PRN 21, PRN24 三顆衛星之三組反射點高程比較圖	4-3
圖 4-4	五顆衛星個別反射點高程水波連續水位變化與波高計水位 比較圖	4-4
圖 4-5	PRN 27 反射點高程值, 波形模式與波高計變化比較圖	4-5
圖 4-6	斷面水槽衛星影像與五個反射點分布圖	4-6
圖 4-7	PRN 24 反射點放大分布圖	4-6
圖 4-8	RHCP/LHCP RGPS 天線、水準尺與中型水槽剖面示意圖 ..	4-7
圖 4-9	中型水槽水位下降前 HW01 與 HW02 (10 Hz)波高計水位量 測值與精度比較圖	4-8
圖 4-10	中型水槽水位下降後 HW01 與 HW02 (0.1 Hz)波高計水位量 測值與精度比較圖	4-9
圖 4-11	RGPS 反射點高程值,水準尺與 WH01 波高計水位量測值變化 情形比較圖	4-10
圖 4-12	中型水槽水位下降前, RGPS 水位變化與 HW02 (10 Hz)波 高計水位量測值與標準差值比較圖	4-11
圖 4-13	中型水槽水位開始下降時, RGPS 水位變化、水準尺與 HW01 (0.1 Hz) 波高計水位量測值比較圖	4-11
圖 4-14	中型水槽水位下降 20 公分至停止時, RGPS 水位變化、水 準尺與 HW01 (0.1 Hz)波高計水位量測值比較圖.	4-12
圖 4-15	中型水槽衛星影像與五個反射點分布圖	4-13
圖 4-16	RHCP/LHCP RGP 潮汐實驗、水準尺與安平港潮位站示意 圖.....	4-14
圖 4-17	安平港潮位站水位下降 35 公分時, 再回升 RGPS 水位變	

	化、水準尺與(2 Hz)每 1 分鐘波高計平均水位記錄比較圖	4-17
圖 4-18	安平港潮位站水位下降 25 公分時。平均每一分鐘 RGPS、 每 15 分鐘水準尺、與平均每 1 分鐘波高計水位變化記錄 比較圖	4-18
圖 4-19	安平港港口衛星影像與 RGPS 所接收五個反射點分布圖..	4-19

符號表

λ_1 : L1波長

λ_2 : L2波長

ε_{p1s} : 虛擬實距最小二乘誤差量

$\varepsilon_{\phi1s}$: L1相位觀測量最小二乘誤差量

$\varepsilon_{\phi2s}$: L2相位觀測量最小二乘誤差量

τ_d : GPS衛星直接訊號至接收儀所需時間

ω : 波浪周期頻率

Φ_{1s} : L1相位觀測量

Φ_{2s} : L2相位觀測量

$\eta(x_s^i, i \times 0.2)$: 簡易水波函數

$\Delta\rho^i$: GPS衛星反射訊號與直接訊號接收儀

CNo: 衛星接收訊號量與雜訊量比值

C: GPS波光速

CA碼觀測量相差值

Doppler shift 1: L1都卜勒頻率

Doppler shift 2: L2都卜勒頻率

D_s : 對流層延遲修正量

dt - dT: 接收儀與衛星之時間差修正量

d: 水槽水深

EL: 衛星仰角值

f_1 : L1波頻率

f_2 : L2波頻率

H : 接收儀解算位置之高度
 H_s : 衛星至地表之高度
 $\bar{H}_{\text{ground}}^i$: RGPS量測平均水位值
 H_{RHCP}^i : RGPS量測之RHCP天線高程值
 H_{LHCP}^i : RGPS量測之LHCP天線高程值
 h : 載具飛行高度(距地表高度)
 $h_{\text{undulation}}$: RGPS量測時之接收儀正高修正值
 \tilde{h}_s^i : 反射點水位值
 I_s : 電離層延遲修正量
 I/Q : 相位積分量
 i : 觀測時間
 k : 水波 k 係數
 LAMBDA : 整數未知數方法關連矩陣模式
 LHCP : 左旋圓柱極化天線
 N : Navigation Data 衛星星曆資料
 N_{1s} : L1未知數
 N_{2s} : L2未知數
 O : Observation Data 衛星觀測資料
 P_{1s} : 虛擬實距(CA碼觀測量;GOLD CODE)
 RHCP : 右旋圓柱極化天線
 R_e : 此地表橢球面至地球正心距離
 R_s : 衛星至觀測點實距
 R_{rmult}^i : 地球正心至反射點投影點距離
 R_o^i : 地球正心至觀測點距離

SNR1: L1訊號強度與雜訊比值

SNR2: L2訊號強度與雜訊比值

s : 衛星代號

T : 波浪周期

U: 地表正高修正值

V_r : 載機航速

V_s : 衛星速度

(X_s, Y_s, Z_s) : RGPS計算之各衛星之正心坐標

(X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1}) : RGPS計算各衛星反射點之正心坐標

$(X_{mult}, Y_{mult}, Z_{mult})$: RGPS計算反射點投影

在衛星至接收儀天線上之坐標

x_s^i : 反射點位置

第一章 前言

1.1 計畫緣起

近年來，全球定位系統（GPS）在導航、定位、測量、與時間校準已有廣泛地應用。GPS 利用環繞地球之 GPS 衛星群（2007 年 7 月，計有 30 顆衛星），提供導航定位之訊號。此一訊號之載波頻段位於 L 頻段，計有二載波分別為 1575.42MHz 之 L1 載波與 1227.60MHz 之 L2 載波。GPS 原先設計係針對軍事應用之定位與導航目的而發展的，後來其載波相位的相對定位，因其精度高、觀測方便、測量成本降低等因素的衝擊，造成測繪界有如革命性的改變。尤其在控制測量應用，幾乎已取代傳統的三角測量。隨著計算分析方法的改進，使得靜態測量方式朝向更快速的“快速靜態測量”並向“動態測量”方向發展，其精度已達到 1ppm 以上。然而要達到高精度(1ppm 以上)，就必須對載波相位的各種系統性誤差加以消除，這是衛星定位工作者常用的處理方法。

對於科學家而言這些寶貴的系統誤差觀測值，例如電離層和對流層等信息，反而很被珍惜並已為電子、氣象方面的科學家所重視，而投入應用研究，且如今已有很好的應用結果發表。福衛 3 號上面的 GPS 就是典型的氣象應用之衛星遙測感測器之一。對於衛星訊號因為四周環境或地面的反射會與直接訊號混合造成訊號品質的降低，這會影響直接訊號應用於高精度之定位應用，因此常用天線圓形擋板加以阻擋而濾除，與微波遙測的原理相較，可發現這種信息卻是用於遙測地物很好的訊號源，衛星定位的工作者通稱其為“多路徑效應 (multipath)”。

由於 GPS 定位功能的高精確度與方便性，全世界除了國防用途外，也應用在地球科學，諸如：地殼變動、海洋、火山活動等地表運動的研究，以及電離層、對流層的大氣監測。多路徑效應在進行精密定位測量計算時會運用軟體技術來過濾掉這些反射訊號。如今原本是

被認為無用的訊號，卻在近十年來歐美等國家學者的研究，發現 GPS 反射訊號可成為極有科學上及工程上之應用潛力。因此近五年來分析 GPS 反射訊號 (Reflected GPS signal, RGPS) 來遙測地表資訊的技術已受到重視，且由於 RGPS 觀測系統具有極佳的機動性、全天候性且可以提供大範圍、多測點、低成本的水面資訊，這項技術在國內已被應用於水體表面高程變化之研究(鄭，2004、陳，2006、陳，2007、沈，2007)。

本計劃應用 R-GPS 技術的主要研究方向為水面高程的量測及反射訊號的分析，其可應用之領域包括測量水面高程、水面波場、水流速度及風向等。過去對於大型水體測高均使用衛星測高法 (altimetry)，現在則可以利用 GPS 的反射訊號來進行海面與溪流測高等相關性研究與應用。RGPS 另外一個優點，為在惡劣天氣下觀測海浪週期之變化時，可用來替代海象雷達監測海面水位與浪高。對港口與外海海浪及時監控、港口防災之應用會有很大助益。RGPS 即時監控系統可移動、調整與佈置於港口船隻出入口附近之防波堤或潮位站附近提供即時直接觀測海面水位變化、海浪週期之用。若要長期觀測，可選擇設置於較高之塔台(高度 25~40 公尺)，這樣可擴大監測海面範圍至距離港口防波堤出口 1200 公尺半徑之外海海浪與水位變化。也可選擇放置於更高之塔台(港口鄰近山壩上高度 65~100 公尺)，更可擴大有效監測海面範圍到距離觀測站 1500~4800 公尺半徑之外海海浪與水位變化。

基於 GPS 反射訊號的應用逐漸廣泛與成功應用案例，本計畫乃提出應用 RGPS 來量測波浪的構想，希望能夠建立另一種成功量測模式，探討是否具有取代現有量測方法的可能性，做為非接觸性量測，既不干擾水體運動也不受氣候改變影響的水位變化量測方法。現在已可提升測量成果的精度達到 2-10 公分。這對於未來應用於潮汐、水面和波浪測高，或配合洪水災害監測，已可預期會有實際應用價值。

1.2 文獻回顧

本章研究主題與 RGPS、RGPS 應用及海水面高程有關，以下針對這些部份分別說明。

Beyerle, et al. (2002)利用美國 NASA 提供特殊天線與接收儀，將 CHAMP 衛星反射訊號技術、GPS 反射訊號追蹤與鎖定技術，結合美國 GPS-1005 接收儀，以軟體設計方式，分析 GPS 反射訊號的相位觀測量。鄭(2004)的研究中探討一些有關反射訊號強度、反射電磁波偏極化之反射模式、衛星仰角與地形對 GPS 反射訊號之影響，其中有關極化的特性為 GPS 訊號是以右旋圓形偏極化(Right Hand Circular Polarized)在傳送，當它第一次反射時會反轉成為左旋圓形偏極化(Left Hand Circular Polarized)，如果左旋圓形偏極化波再作一次反射，則又會反轉成為右旋圓形偏極化波，不過一次的反射即會衰減很多的能量，如果訊號能量不是很大，再次反射，訊號將會衰減成微小雜訊接收困難。Garrison 與 Katzberg (1997)利用 GPS 衛星 L₁ Band 反射訊號偵測海水面高時發現，發現在鏡面反射的條件下，反射訊號結構與直接訊號相似，但唯有兩個部份不一樣：(1)、反射訊號隨機(Randomly)衰減，而反射訊號的隨機衰減則依其反射海水面的狀態而定。(2)、反射訊號電磁波形成反相的(Reversed)極化，也就是說 GPS 衛星訊號是右旋圓形偏極化波，將會顛倒變成左旋圓形偏極化波。於是，將右旋圓形偏極化天線(RHCP, Right Hand Circular Polarized)設在航空器頂部接收 GPS 訊號，將左旋圓形偏極化天線(LHCP, Left Hand Circular Polarized)設在航空器底部接收 GPS 反射訊號，測量海水面高並分析辨識海水與海岸線間邊界之分佈，並得到不錯之成果。

Manandhar, et al. (2005) 對 GPS 反射訊號的應用與分析，使軟體接收儀成為 GPS 反射訊號技術的新領域，GPS 訊號 I/Q 之積分相關性技術，進一步處理 C/A 碼之直接與反射訊號觀測量，並從 GPS 之反射係數與地表地物介電係數，推導 GPS 反射訊號應用方向與地物識別理論公式。Michael, et al. (2007) 則使用 GPS 反射訊號，對地表濕土壤

進行反射能力的分析，可識別地表農業地區之濕土壤成分與反射能力。Oleguer, et al.(2007)以德國 GPS-1005 韌體技術結合美國之天線、儀器，開發 CA 碼之 GOLD-RTR 處理器，可即時遙測海面水位變化。Shen, et al. (2009)設計之整合型衛星雙頻接收儀，具備穩定接收 5 至 8 顆衛星反射訊號的功能，優於歐洲太空衛星 GNSS 部門的特殊衛星接收系統及美國衛星整合系統(只能接收部份或 3 至 4 顆衛星反射訊號)。本研究在土石流防治技術上，證實即使是在天候惡劣（颱風天）的環境下，如溪流表面、高低變化大的海水表面、複雜的河床反射表面本研究成果可提供建構高精度無線網路地質、水利、海洋、農業等環境調查研究、國土規劃與災害防治風險評估之用。

Rivas and Martin-Neira (2006)實驗使用長 7 公尺之鋁管伸收桿安裝一組 RHCP (L1)與一組 LHCP(L1)天線，結合 Doppler shift 二套 TurboRogue GPS 訊號接收儀模組實驗與 SONY 即時處理分析器設備，於橋樑上對海面海水位與海浪進行分析；另外在海面上放置一傳統之 GPS 測量運用於水位監測，漂浮(BUOY) GPS 定位裝置，如 PRN 20 衛星之直接訊號與反射訊號關聯性積分結果，時間延遲有明顯差異，並產生 Cycle Slip 現象。以 L1 之相位觀測量，進行 1600 秒的觀測時間，並獲得海面高程定位坐標: 18.45 公尺，可達到 5 公分精度，可計算出高度變化之 RMS 值，達到 10 公分之誤差量。Martin-Neira, et al. (2001)利用 RHCP (L1)與 LHCP(1.2- 1.5GHz)天線結合 MEM-500 模組實驗與 DA-500 設備，在海邊之橋上進行水位觀測，其觀測量，由直接訊號與反射訊號之時間延遲值與反射角度、海面高度，形成幾何三角關係坐標，反射角度可低至 10° 、水面反射軌跡直徑為 25-45 公尺。從 GPS 反射訊號公式中將含有 L1 C/A 碼、C/N0 觀測量積分，依反射路徑之實距來反推算海面高度，並獲得初步 5 個反射點及其海浪高度，以及 3.3 公尺變化之資料庫分析。Helm, et al. (2006)在海岸邊架設 GPS-1005 接收儀，觀測位置高度為 250 公尺高；以 GPS 直接及反射訊號之 L1 相位觀測量，應用於海面監控海流速度與海水位變化計算。接受儀所觀測 GPS 之直接與反射訊號，以 OPENGPS 軟體進行海面高度計算、

海面海浪與水位之 3~4 顆衛星之反射點軌跡約距接收儀 2400 至 5800 公尺距離。使用 GPS-1005 機版與 L1 相位觀測量分析，先求出海面高程後，進行瞬時位移紀錄與計算分析海面之海水風速與方向。GPS 反射訊號觀測量資料與直接訊號觀測量資料。成功監測五天每天約 1.0 小時之反射海面觀測量資料，經過後處理與訊號分析，可有效顯示海面之高程變化並與 NOAA099 TIDE MODEL 進行比較。

綜合上述探討，GPS 反射訊號應用與分析技術已進入國際合作、分工的階段，共同開發新產品與新技術，目的為使用成本較低之 GPS 遙感探測衛星，取代一部分 SAR 衛星之功能，奠基於以上研究的成果，本計畫實驗的技術，可提供作為取代海象雷達之功能，提供精確且穩定的遙測海面、海象關鍵技術應用，同時對照海象監測雷達監測海面，惡劣天氣(17 級強風、40 mm/h 雨量條件)用 RGPS 監測海面，可提供區域性海面之 5 公分~3 公尺海浪浪高與 2~8 秒週期。

1.3 四年全程計劃說明

- (1) 98 年度研究 RGPS(10Hz)接收儀應用於量測斷面水槽波形與海面海浪之變化。
- (2) 99 年度執行 RGPS(20Hz)接收儀於斷面水槽波浪觀測與驗證，港口內海面海浪水位觀測與驗證，柴山場地堪選與近岸(離岸 2.0 公里以上)海面波浪水位觀測 (如圖 1-1)。GLONASS 天線設計分析，GLONASS 反射訊號之訊號處理，GPS 與 GLONASS 整合之定位分析軟體、硬體建置及反射點坐標與高程計算。
- (3) 100 年度執行整合 GPS/GLONASS 訊號於 RGPS 接收儀，並用於斷面水槽波浪量測及執行近岸(離岸 2.0 公里以上)延伸式海面波浪觀測(如圖 1-2)。
- (4) 101 年度執行 GPS/GLONASS 訊號於 RGPS 接收儀之斷面水槽波浪觀測與驗證。多重組合 GPS 與 GLONASS 訊號處理與海面

波浪數值分析軟、軀體建置。執行近岸(離岸 2.0 公里以上)區域涵蓋式海面波浪觀測(如圖 1-3)。

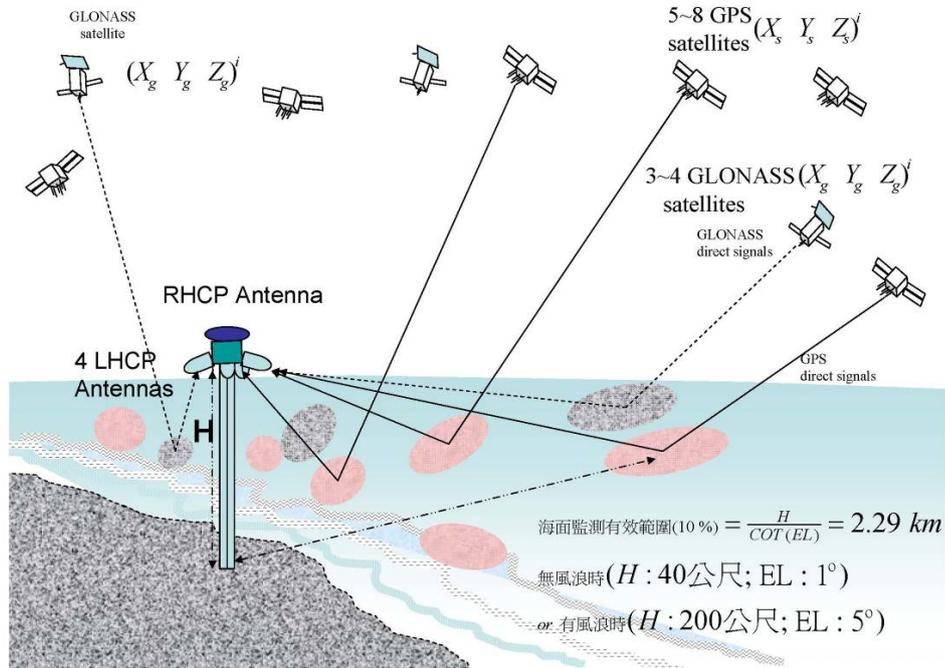


圖 1-1 近岸(離岸 2.0 公里以上)海面波浪水位觀測

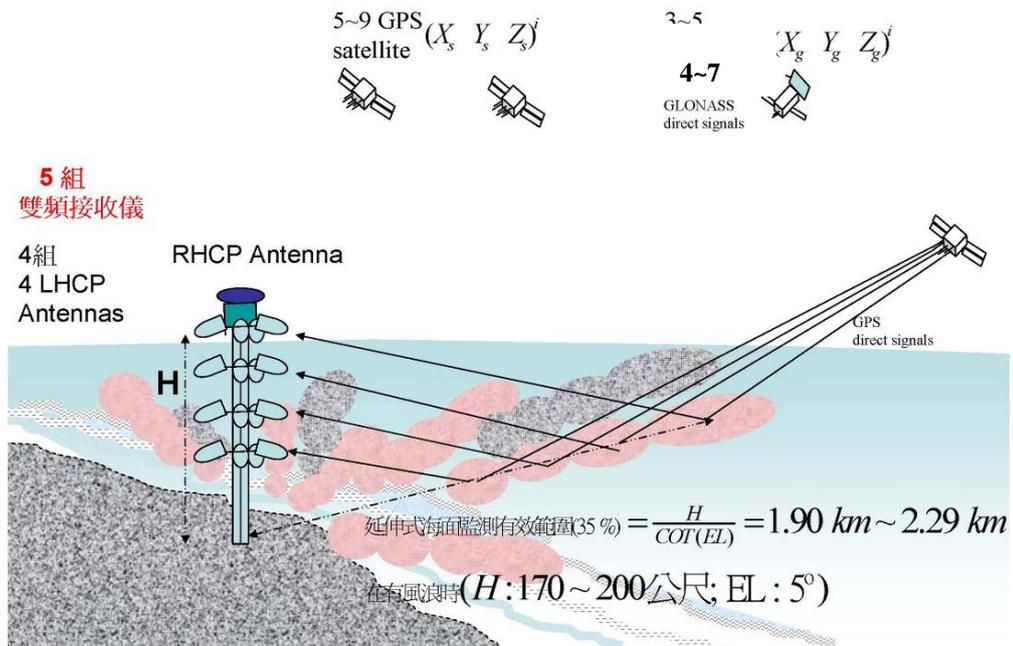


圖 1-2 近岸(離岸 2.0 公里以上)延伸式海面波浪觀測

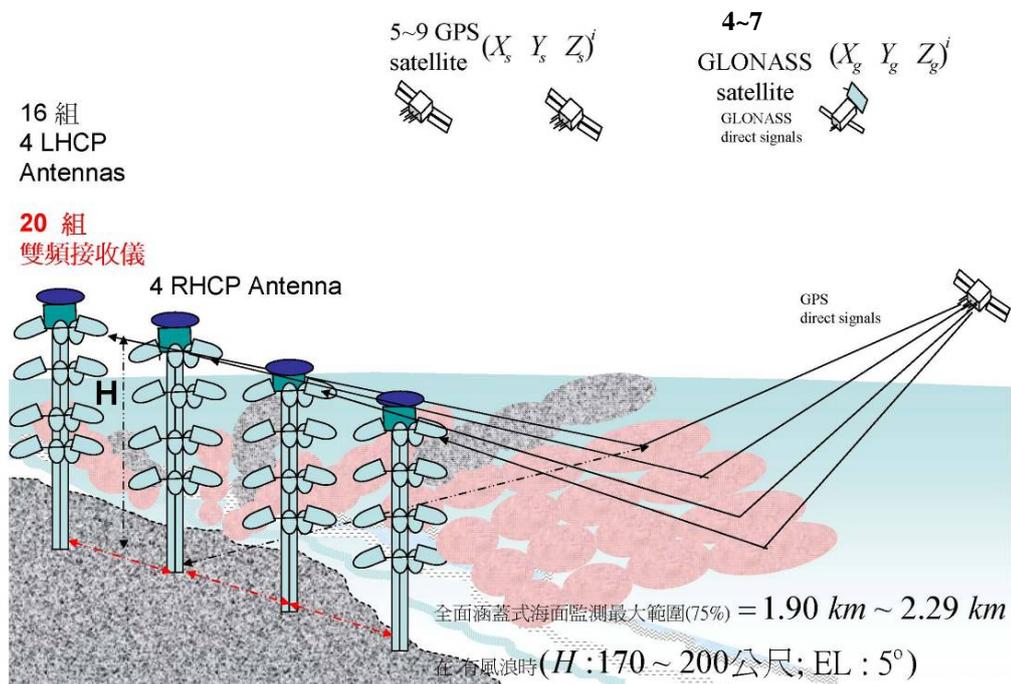


圖 1-3 近岸(離岸 2.0 公里以上)區域涵蓋式海面波浪觀測

1.4 本年度研究方法與目的

依據歐美研究團隊(Oleguer, et al, 2007)以飛機載具攜帶 GPS 反射訊號處理器即時監測與地面固定站長時間監測，進行海面反射以相位觀測量及直接訊號，成功地達到高精度之坐標解算，精度達到 5 公分之海面高程。本計劃即利用 RGPS 來輔助水面水位變化的量測，並進一步延伸到波形量測之應用。透過 GPS 衛星直接及反射訊號與接收儀複製的參考訊號比對而得相位觀測量、訊號強度、時間延遲修正量、大氣延遲修正量等一系列的運算，最後完成求解反射位置與高程。

在實驗研究與分析過程中，為使接收儀本身軟、硬體可妥適地透過人工或自動方式之調整，達到整合接收直接訊號及反射訊號的目的，並有效應用 GPS 接收儀之都卜勒頻率位移量(Doppler Shift)來修正反射訊號，使接收順利並提昇訊號品質。實驗完成後先下載觀測量再

就其 L1/L2 相位觀測量進行整數週波未定值求解，大氣電離層、對流層誤差修正，而後進行精確的直接訊號及反射訊號定位解算，最後再求解水面反射點之坐標與高程。延用 RHCP 相同的處理技術，可以提昇 LHCP 坐標與高程之精度達到 2-10 公分，並確保反射訊號之定位及推算水面反射點坐標與高程也維持在 2-10 公分之精度。

本研究主要係利用右旋圓柱型偏極化(RHCP)及左旋圓柱型偏極化(LHCP)天線，分別接收衛星直接訊號及由水面反射後之稍減弱之反射訊號，再做整合分析，以計算反射訊號瞬時水面之坐標與高程，而後推算水面波形，再應用時序分析，推求浪高與波型。若進行長時間港口潮汐觀測，可精確監測海浪浪高變化，應用均化水位變化分析，則可與潮汐週期做比較。實驗與研究流程圖，如圖 1-4。

本年度的研究，首先在成功大學臺南水工實驗所渠道內進行斷面水槽波形之測算，以衛星接收儀及其軟硬體運作達到設計目標，同時進行水面波浪之平均高程計算與應用衛星反射訊號之反射點分析，以最小二乘法配合 LAMBDA 之演算，使量測高程精度提升至 5 公分，並與波高計記錄及水準尺水位量測進行比較。以驗證測量成果之精度。海面波高的實驗則選至安平港內潮位站附近，來進行海面水位變化之高程量測，同時也用潮位儀之記錄資料及水準尺之水面高程量測資料，來進行比較與分析，並驗證 RGPS 量測之精度。

本計畫全程之實驗目的為建立雙頻 GPS 反射訊號應用於海浪實驗模型(Ground True Measurement, GTM)，發展完整的訊號處理與軟體分析能力。未來則希望能夠應用於對颱風期間所造成的長週期海浪與粗糙海水表面之大浪高，來進行全天候、長時間之觀測與監控。也希望有可能替代並提昇海象雷達對近海(距港口 3 公里)之水位潮汐與海浪浪高監測，維持海面水位高程量測精度達到 2~10 公分。希望未來在港口或港區內之航道、堤口區水位潮汐與海浪浪高監測也可使用這種 RGPS 技術。

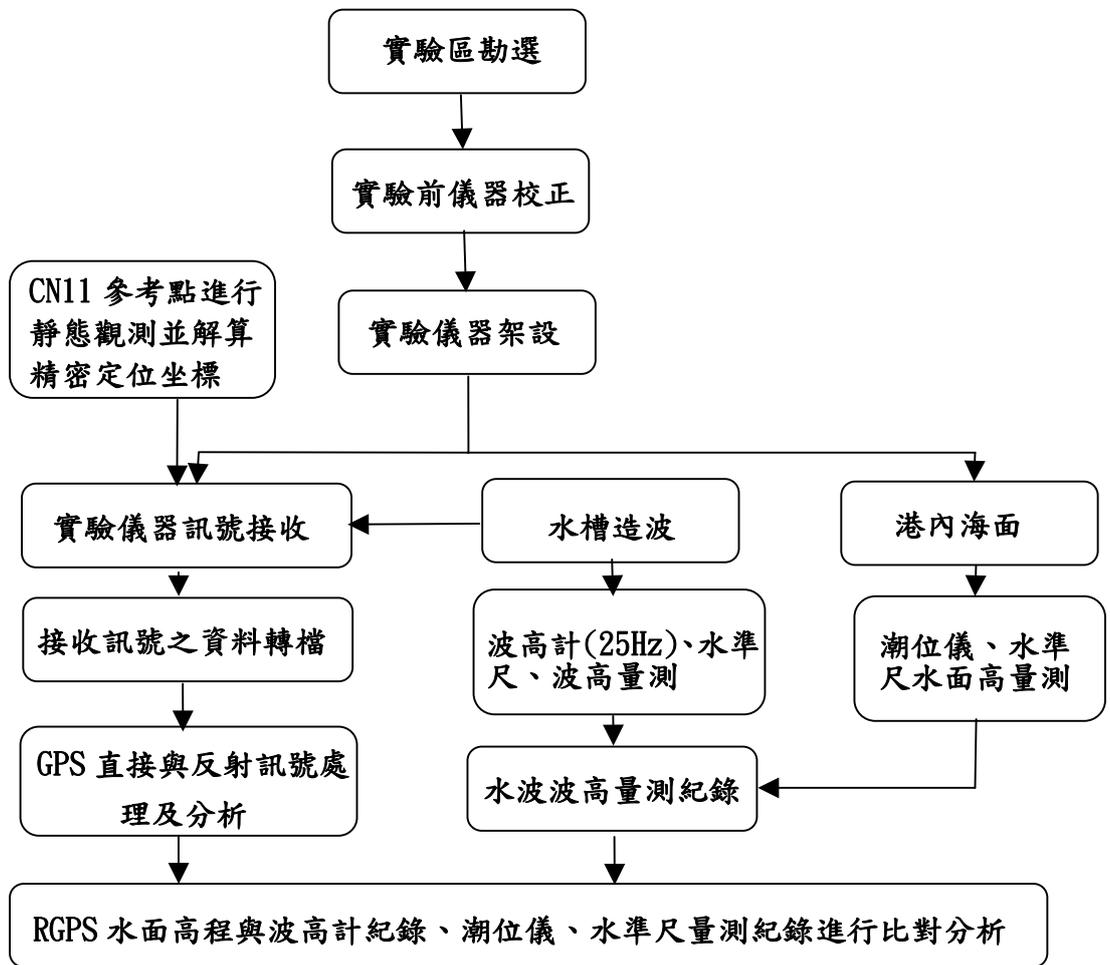


圖 1-4 研究流程圖

第二章 整合 GPS 直接與反射訊號定位計算原理

2.1 GPS 直接訊號定位

所有 GPS 衛星定位的應用，都是以接收來自於 GPS 衛星發射的直接訊號來進行定位計算，以下各方程式中，以下標 d 來表示直接訊號。民間應用 C/A 碼的導航定位精度在 20~30m 左右，再本研究中做為近似定位之用，精密定位的觀測量則以 L1 及 L2 的載波相位為主，以下簡述 C/A 的虛擬距離以及載波相位的計算原理。

2.1.1 虛擬距離觀測量定位

GPS 的定位是利用衛星基本三角定位原理，GPS 接收裝置以測量無線電信號的傳輸時間來量測距離，以距離來判定衛星在太空中的位置，這是一種高軌道與精密定位的觀測方式。假設衛星在 20000 公里高處，測量我們的距離，首先以 20000 公里為半徑，以此衛星為圓心畫一圓，再假設第二顆衛星距離我們 21000 公里，而我們正處於這二顆球所交集的圓周上。再以第三顆衛星做精密定位，假設高度 22,000 公里，我們即可進一步縮小範圍到二點位置上，但其中一點為非我們所在的位置極有可能在太空中的某一點，因此，我們捨棄這一點參考點，選擇另一點為位置參考點(陳，2006)，如圖 2-1 所示。

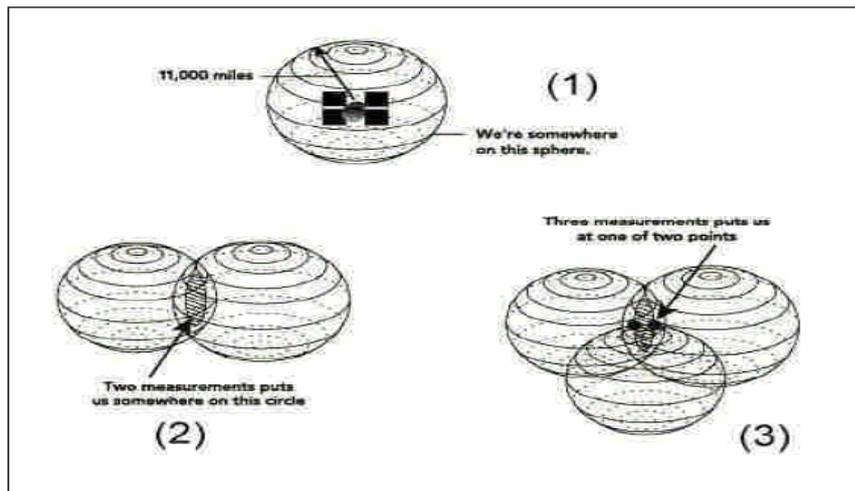


圖2-1 GPS基本定位原理

但由於地面接收器所採用的石英鐘與衛星的銫(Cs)原子鐘之間存在有一個時間誤差，必須再引入第四顆衛星的觀測訊號加以求解，因此要測得一個地面測站的位置，最少需要四個以上的衛星觀測量，這就是GPS單點定位的基本精神。若衛星數量大於四顆，則可採用最小二乘法的方式加以處理（Teunissen，1997）。

就GPS 觀測而言，採用雙頻的接收器可以得到2 載波的虛擬距離與載波相位訊號，在訊號處理時可進而對此四種觀測量加以組合以利分析及簡化計算。虛擬距離觀測是使用PRN 電碼來進行距離的量測，假設衛星和地面接收儀同時產生一組已定義的二位元碼系列，在某個時刻衛星訊號通過地面的接收儀，此時接收儀接收衛星所傳來的電碼訊號同時與自行產生的複製電碼進行相關性比對，當兩個訊號達到最大相關時，將得到一訊號傳播的延遲時間 τ ，此時間延遲量即是由衛星訊號發射時刻（衛星時鐘 T ）與到達時刻（接收儀時鐘 t ）之差值，將光速乘上此一傳播時間的延遲量 τ 即為虛擬距離（圖2-2）。

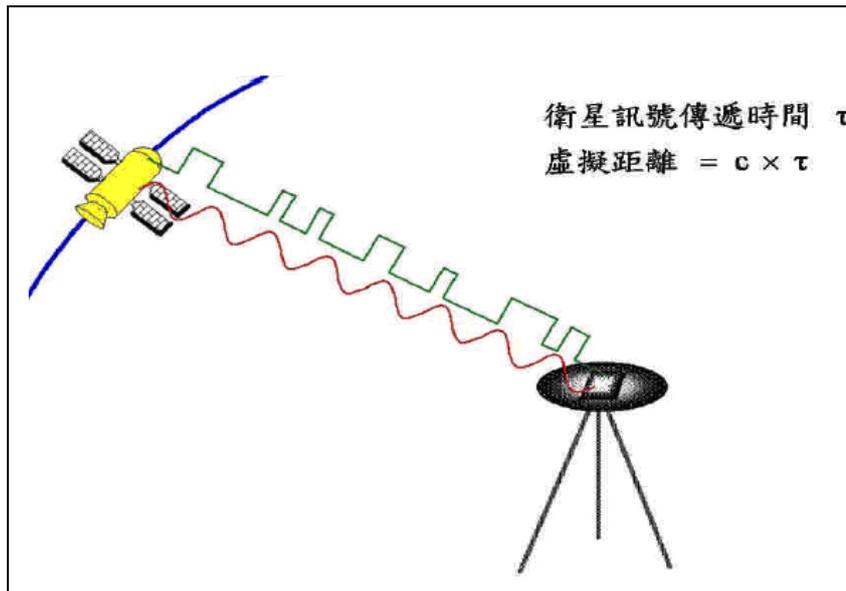


圖2-2 單程測距示意圖

因此對虛擬距離而言可以表示為

(式中，下標d表示直接訊號，以下同)

$$P = c \cdot \tau = R_d + c \cdot (dt - dT) \quad (2-1)$$

式中：

P：量測得到的虛擬距離（公尺）

τ ：衛星訊號發射時刻（衛星時鐘T）與到達時刻（接收儀時鐘t）
之差值

R_d ：衛星到接收儀之L1 band直接訊號的真實距離（公尺）

c：真空中之光速（299792458 公尺/秒）

dt：接收儀時鐘誤差（秒）

dT：衛星時鐘誤差（秒）

實際量測時，尚有訊號在傳播的時候所受到的大氣折射誤差和多

路徑效應（圖2-3），而在大氣折射誤差的部份又可分為電離層延遲誤差與對流層延遲誤差。

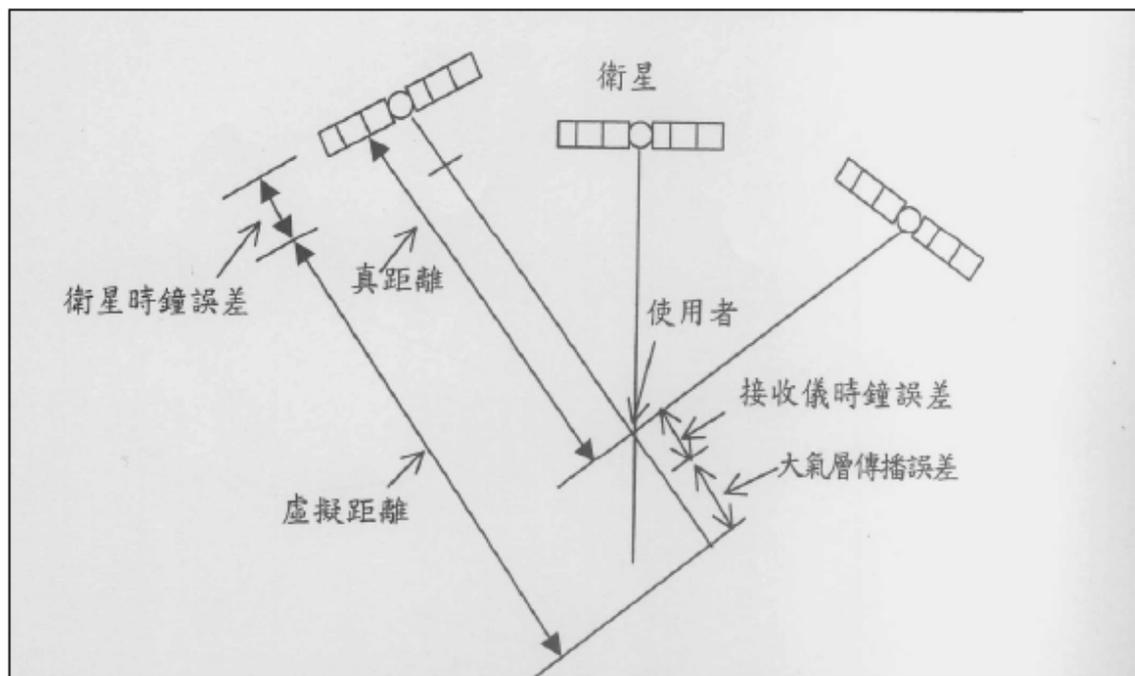


圖2-3 虛擬距離與系統誤差示意圖

若將電離層延遲與對流層延遲的影響也納入考慮，則2-1 式可以改寫。

$$P_{1d} = R_d + c \cdot (dt - dT)_d + \text{Ion} + \text{Trop} + \varepsilon_{P1d} \quad (2-2)$$

$$P_{2d} = R_d + c \cdot (dt - dT)_d + \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \text{Ion} + \text{Trop} + \varepsilon_{P2d} \quad (2-3)$$

式中：

P_{id} ：虛擬距離（ f_i 頻率， $i = 1, 2$ ； $d = \text{direct}$ ）（公尺）

Ion：L1 頻率之電離層延遲誤差（公尺）

Trop：對流層延遲誤差（公尺）

f_i ：L1 band 和L2 band 的頻率（ $i=1, 2$ ）

ϵ_{Pid} ：直接訊號虛擬距離觀測量之雜訊及多路徑效應（公尺）

在公式中真實距離為 R_d 可以表示成

$$R_d = \sqrt{(X^s - X_d)^2 + (Y^s - Y_d)^2 + (Z^s - Z_d)^2} \quad (2-4)$$

衛星坐標 (X^s, Y^s, Z^s) 可由導航訊息提供的廣播星曆參數計算，電離層與對流層延遲量可以由儀器內所接收的資料提供，因此公式內只有4個未知數分別為接收儀坐標 (X_d, Y_d, Z_d) 與接收儀時鐘誤差 dt 。若接收儀能同時接收到4顆衛星的觀測資料，即可以建立4個方程式去求解4個未知數。

2.1.2 載波相位觀測量定位

GPS 載波相位觀測原理與電子測距儀的電子測距相似，不同的是電子測距儀的訊號經反射而回到儀器本身，這樣所得到的相位差量是基於同一時鐘基準，但 GPS 訊號僅單向由衛星傳送到接收儀，載波相位差是由衛星時鐘與接收儀時鐘兩個基準所求出，因為衛星時鐘與接收儀時鐘都有誤差存在，使得觀測量需以二次差分方式消除時鐘誤差，故，測量上常用相對定位方式消除系統誤差提昇定位精度(陳，2006)。

接收儀在瞬間時刻下，量測衛星訊號載波與接收儀本身振盪器產生的參考相位之間的相位差值，稱之為瞬間載波相位觀測值，GPS 在

剛鎖定衛星訊號時僅量得相當於小數部分的載波相位差，即小數週波值，但是存在於衛星與接收儀之間的整數週波未定值並不知道，若能夠解算出載波在傳送的路徑中所包含的完整載波個數（圖2-4），便可計算衛星到接收天線的精密距離（Abidin，1992），因此載波相位觀測量的數學式，可以表示為

$$\Phi_{1d} = R_d + c \cdot (dt - dT)_d - Ion + Trop + \lambda_1 n_{1d} + \epsilon_{\Phi 1d} \quad (2-5)$$

$$\Phi_{2d} = R_d + c \cdot (dt - dT)_d - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 Ion + Trop + \lambda_2 n_{2d} + \epsilon_{\Phi 2d} \quad (2-6)$$

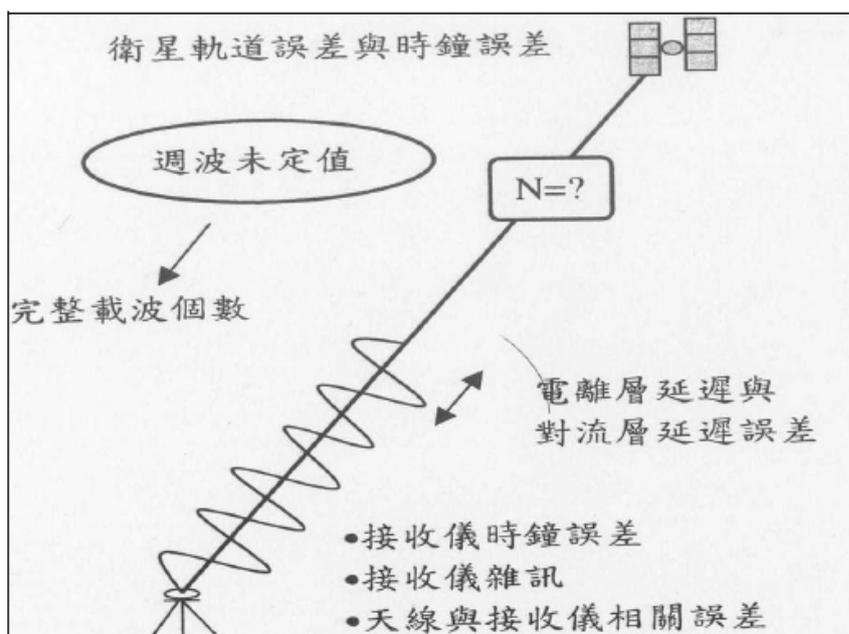


圖2-4 載波相位與週波未定值示意圖

而其週波未定值的求解則可以表示為：

$$n_{1d} = \left\{ \Phi_{1d} - \left[R_d + c \cdot (dt - dT)_d - Ion + Trop + \epsilon_{\Phi 1d} \right] \right\} / \lambda_1 \quad (2-7)$$

$$n_{2d} = \left\{ \Phi_{2d} - \left[R_d + c \cdot (dt - dT)_d - \left(\frac{f_1}{f_2} \right) Ion + Trop + \varepsilon\Phi_{2d} \right] \right\} / \lambda_2 \quad (2-8)$$

式中：

Φ_{id} ：接收到的相位觀測量（ f_i 頻率 $i=1, 2$ ）（公尺）

λ_i ：載波之波長（ $i=1, 2$ ）（公尺）

n_{id} ：L1 及 L2 之週波未定值（ f_i 頻率 $i=1, 2$ ）（cycles）

$\varepsilon\Phi_{id}$ ：載波相位觀測量之雜訊及多路徑效應（ $i=1, 2$ ）（公尺）

由虛擬距離觀測量式(2-2)與式(2-3)，載波相位觀測量式(2-5)與式(2-6)，可以發現二者極為相似，主要差異為整數的週波未定值部份，以及電離層誤差在相位觀測量中為負，而在虛擬距離觀測量中為正。

為了消除觀測時所存在的誤差，我們採用差分式GPS（differential GPS）做處理，DGPS 為採用一組接收儀同時觀測相同的衛星，由於衛星本體與路徑所造成之誤差對此一組接收器是相似的，若有其中一接收器在已知點位，則可估計路徑上的綜合誤差，再將其誤差量修正於未知點位的求解，以提昇定位精度。較常採用的差分可分為一次差分與二次差分，一次差分又可分為空中一次差與地面一次差，在空中一次差分中，同一接收儀在相同時刻接收到不同衛星的訊號，其接收儀時鐘誤差的影響量幾乎一致，因此可以利用兩組觀測量求差來消除接收儀的時鐘誤差，而地面一次差則是基線兩端的接收儀在相同時刻，同時收到來自同一衛星的訊號，由於衛星時鐘誤差的影響量幾乎一致，將兩組觀測量相減求差，則可以消除衛星的時鐘誤差。

基線兩端的接收儀同時接收兩顆衛星的訊號，則可藉由兩個地面一次差分或兩個空中一次差分組成二次差分，因此二次差分可以同時消去衛星和接收儀時鐘誤差，在某一時刻，結合二部接收儀與二顆衛星觀測量之差分，可以形成二次差觀測量（圖2-5）。

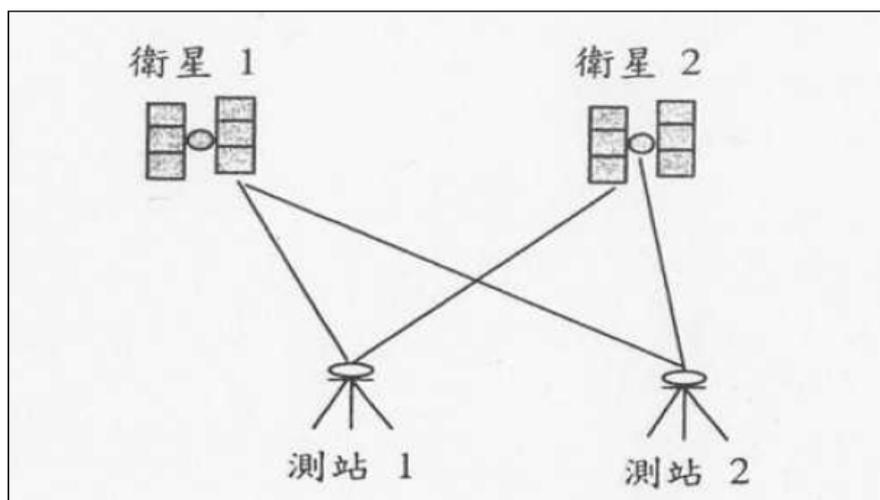


圖2-5 二次差示意圖

虛擬距離二次差的觀測量為：

$$\Delta\nabla P_{1d} = \Delta\nabla R_d + \Delta\nabla \text{Ion} + \Delta\nabla \text{Trop} + \Delta\nabla \varepsilon_{P_{1d}} \quad (2-9)$$

$$\Delta\nabla P_{2d} = \Delta\nabla R_d + \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \Delta\nabla \text{Ion} + \Delta\nabla \text{Trop} + \Delta\nabla \varepsilon_{P_{2d}} \quad (2-10)$$

$\Delta\nabla$ ：表示二次差之運算子

載波相位二次差的觀測量為：

$$\Delta\nabla \Phi_{1d} = \Delta\nabla R_d - \Delta\nabla \text{Ion} + \Delta\nabla \text{Trop} + \lambda_1 \Delta\nabla n_{1d} + \Delta\nabla \varepsilon_{\Phi_{1d}} \quad (2-11)$$

$$\Delta\nabla \Phi_{2d} = \Delta\nabla R_d - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \Delta\nabla \text{Ion} + \Delta\nabla \text{Trop} + \lambda_2 \Delta\nabla n_{2d} + \Delta\nabla \varepsilon_{\Phi_{2d}} \quad (2-12)$$

在非差分的觀測量中接收儀的時鐘誤差是一個難處理的課題，若是藉由建立時鐘誤差的模型來求解，將造成未知數過多的現象，且加

深了計算的複雜性，因此在一般的處理軟體中都以二次差觀測量的求解方式來消除接收器的時鐘誤差，降低未知數的數量，提升解算的速度與精度。

2.1.3 整數週波未定值之求解

在載波相位觀測中若能夠解出剛鎖住載波時刻從衛星到天線間的整數波數，便可以計算載波傳送路徑的精確距離(陳，2006)。利用L1及L2的相位觀測及週波未定值的求解公式(2-5)和式(2-6)可以求出實數的直接訊號週波未定值 n_{1d} 、 n_{2d} 。解算接收儀坐標，分別在經度分，緯度分量和高程分量作疊代，可提高坐標解算的精度，方法可採用Lambda (Least-squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment) 的方式 (Joosten, 2001)。

GPS 直接訊號接收儀坐標起始解算如圖2-6所呈現的，首先以接收到的數顆衛星的中心為搜尋的坐標起點，接著在經度的方向做搜尋、然後是緯度的搜尋，最後則是垂直紙面的高程部份做搜尋，待實數的週波未定值找到後，可以算出一個實數週波未定值的實數坐標值，接著利用上述Lambda 的方式，求解出整數的週波未定值，在變動量最大的高程部分精確搜尋後，能夠得到一個整數週波未定值的整數固定的坐標值 (圖2-7)。

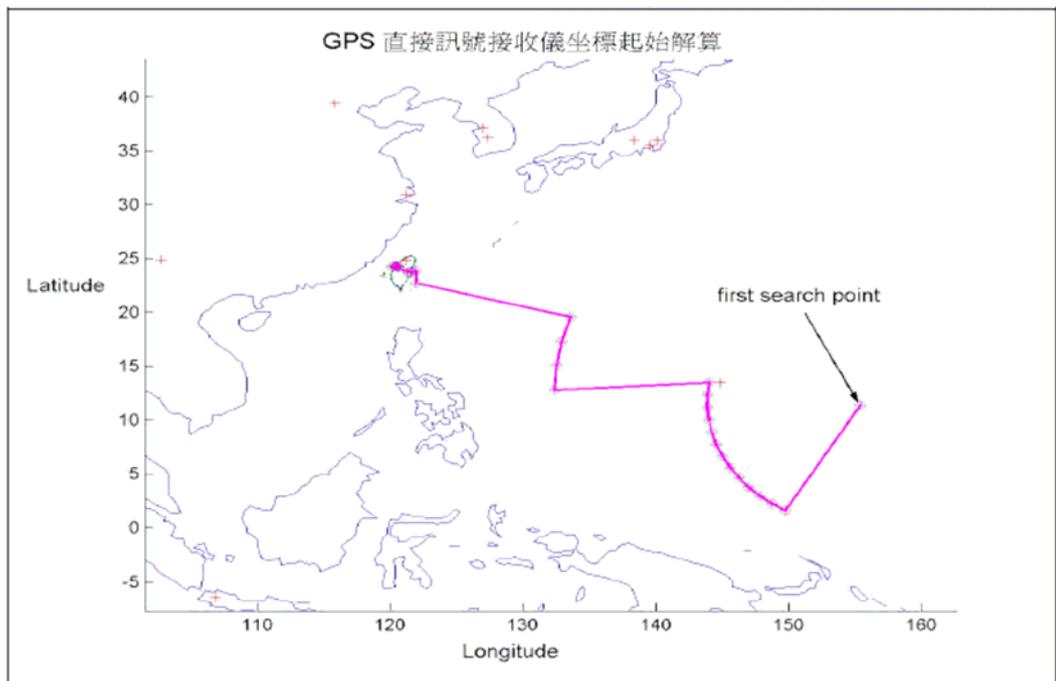


圖2-6 起始解算GPS直接訊號接收儀坐標

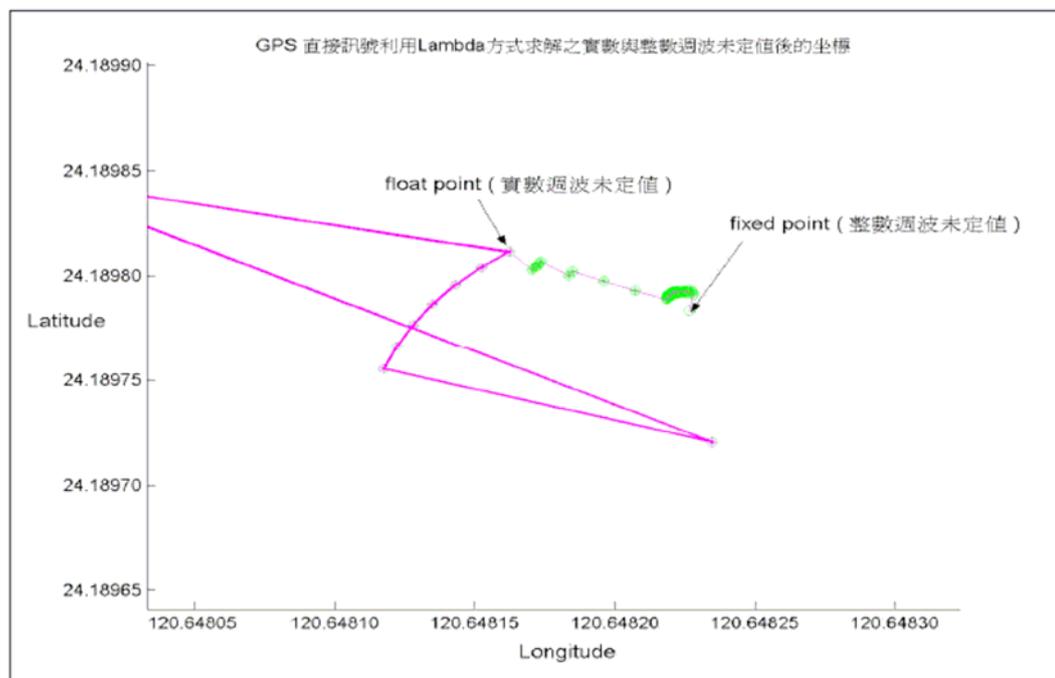


圖2-7 觀測站之實數與整數週波未定值求解後坐標

2.1.4 電離層延遲誤差處理

在衛星訊號傳播過程中主要的誤差包括有電離層延遲誤差與對流層延遲誤差的影響。電離層係約50~1000 公里間之大氣範圍，在此範圍內充滿了離子化之微粒及電子，對GPS 衛星訊號會造成極大之折射影響(陳，2006)。本研究中採用雙頻接收儀，在實際處理資料時可採用L1 band 及L2band 的線性組合加以處理，當利用直接訊號接收儀本身接收的電離層延遲量解算接收儀坐標後，經由式(2-5)、式(2-6)可以組合成式(2-13)，並反推算較高精度的電離層誤差延遲量，再將此一電離層誤差延遲量提供給坐標解算之用，透過疊代的方法，可以提高坐標解算的精度。

$$I_{\text{ion}} = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \times [(\Phi_{2d} - \Phi_{1d}) + (\lambda_1 \Pi_{1d} - \lambda_2 \Pi_{2d}) + (\varepsilon_{\Phi 1d} - \varepsilon_{\Phi 2d})] \quad (2-13)$$

台灣位於低緯度區域，電離層延遲對於GPS 在測量等方面的研究中影響定位精度甚大，符合台灣緯度等區域性條件的電離層區塊圖，如圖2-8，服務的範圍約為1000 km左右。

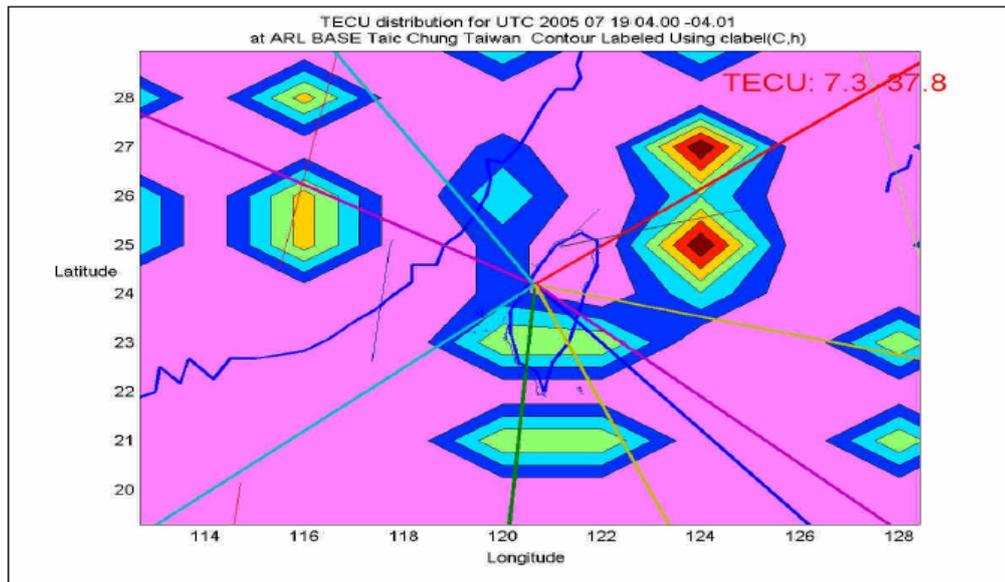


圖 2-8 電離層延遲量區塊圖(陳，2006)

2.1.5 對流層延遲誤差處理

對流層乃是位於由地表起算到約40 公里處之大氣範圍，其影響隨衛星之高度、測站緯度及測站高度而異，對流層折射對觀測值的影響可分為乾分量與溼分量兩部分，乾分量主要與大氣的溫度與壓力有關，而溼分量主要與訊號傳播路徑上的大氣濕度與高度有關(陳，2006)。對於提高對流層延遲誤差影響的解算精度可由式(2-14)表示為：

$$\begin{aligned} \text{Trop} = & \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \times (\Phi_{2d} - \lambda_2 n_{2d} - \epsilon_{\Phi 2d}) - \left(\frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \times (\Phi_{1d} - \lambda_1 n_{1d} - \epsilon_{\Phi 1d}) \\ & - [R_d + c \times (dt - dT)_d] \end{aligned} \quad (2-14)$$

藉由直接訊號接收儀本身接收的對流層延遲量解算接收儀坐標後，透過式(2-22)反推算較高精度的對流層誤差延遲量，再將此一對流層誤差延遲量提供給坐標解算之用，經疊代處理，可以提高坐標解算的精度。區域性的對流層延遲的區塊圖，如圖2-9所示，由於對流層高度較低，因此區塊圖所能服務的範圍約為40 km。

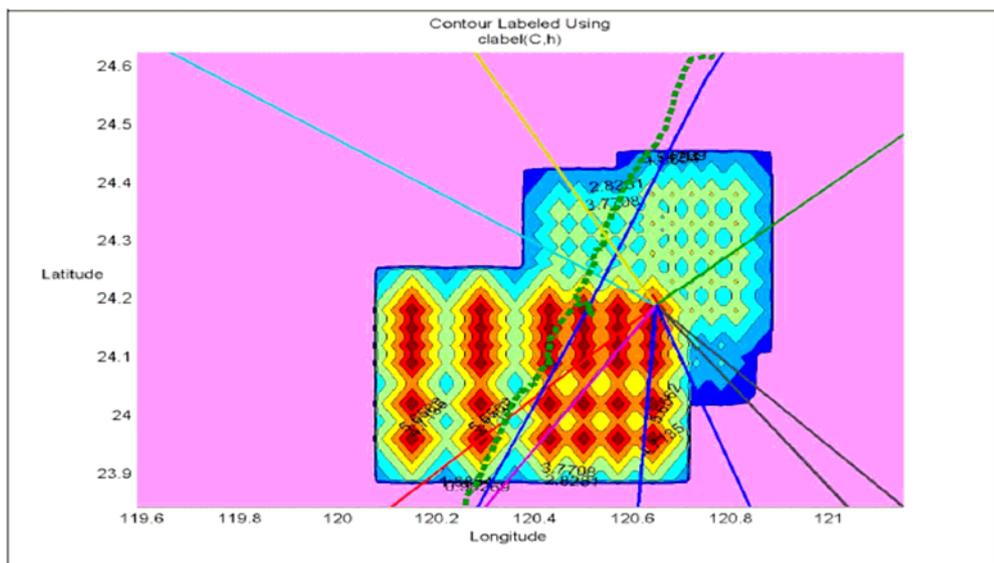


圖2-9 對流層延遲量區塊圖(陳，2006)

2.2 GPS 反射訊號定位

GPS 直接訊號屬於右旋圓形偏極化(RHCP)的電磁波，為求接收訊號能有最大的訊號強度，其天線設計亦以 RHCP 來設計，是所有直接訊號天線接收之模式，以下提到 RHCP 即等同於直接訊號。水面反射波之接收，因為一次反射之特性，屬於左旋圓形偏極化(LHCP) 之電磁波接收，以下以 r 來代表反射訊號，其訊號之接收與反射點坐標及高程之計算，簡述如下：

2.2.1 GPS 訊號的偏極化

GPS 衛星訊號具有電磁波(傳播方式如圖 2-10)的性質，如穿透性、反射性質、折射性質、散射性質、干擾性質、能量衰減等等，在時域的觀點，電場基本上也是時間的函數，電場向量隨時間的改變而改變，這個改變的場稱為電磁波的偏極化，電磁波偏極化大致上可分為線形(Linear)、圓形偏極化(Circular)、及橢圓形極化(Elliptical)三種，一般常用的直線形天線只能收到沿天線方向的電場分量，接收死角比較多，太空中的衛星是一運動體，它發射訊號的範圍涵蓋的越大越好，所以圓形偏極化電磁波是最被廣泛運用在衛星通訊上的一種，結合螺旋狀天線可以發射或接收圓形偏極化電波，是最理想的衛星通訊設計，它可以產生或接收右旋圓形偏極化(Right-Hand Circularly Polarised) (如圖 2-11)或左旋圓形偏極化(Left-Hand Circularly Polarised) (如圖 2-12)中的一種訊號波(視天線構造而定)，在化學、生物和光學方面，圓形偏極化波是一種很重要研究的工具，例如，所謂的光學異構物，只有藉著光線通過它們的溶液，產生不同旋轉的方向的圓形偏極化波，才能加以分辨(洪，2008)。

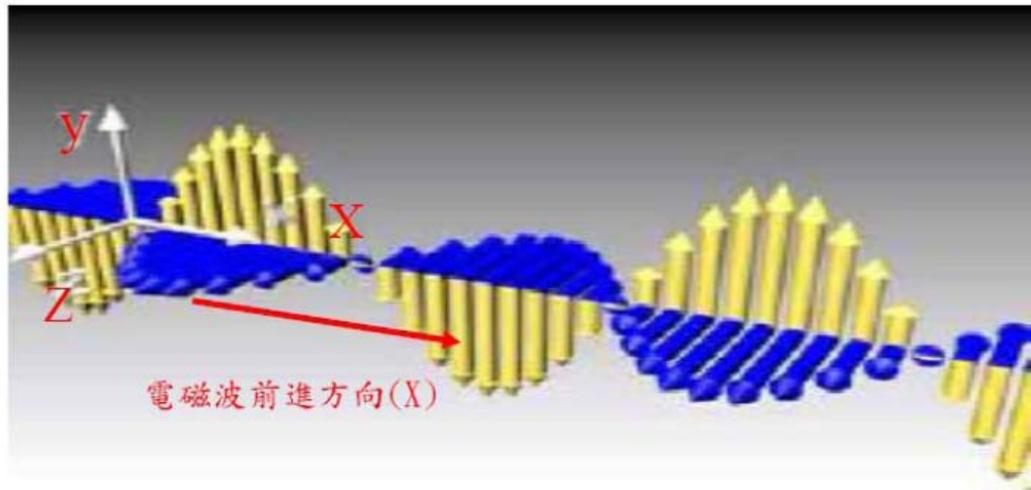


圖 2-10 電磁波傳播方向模型(洪，2008)

如(2-16)式中時間 t 增加時得到一個順時針方向旋轉的電場。右手大姆指指向傳播方向，則另外四指所指正好是旋轉方向，故稱右旋偏極化(如圖 2-11)；相反的，在(2-18)式中時間增加時得到一個逆時針方向旋轉的電場。左手大姆指指向傳播方向，則另外四指所指正好是旋轉方向，故稱左旋偏極化(如圖 2-12)。其電場之所以會旋轉乃因為電場之 X 方向與 Y 方向之分量，兩分量之間相差 90° ，即 $\pi/2$ ，且分量大小隨時間在改變，所以電場之和向量產生旋轉的現象。若 X 方向分量超前 Y 方向之分量 90° (如 2-15 式)即產生右旋現象，相反的(如 2-17 式)則產生左旋現象。由於電場隨時間改變一直在變化(旋轉)，所以我們稱之謂右(或左)旋偏極化波，就像是圖 2-11、圖 2-12 旋轉前進的螺旋一般，往波前方向傳播。

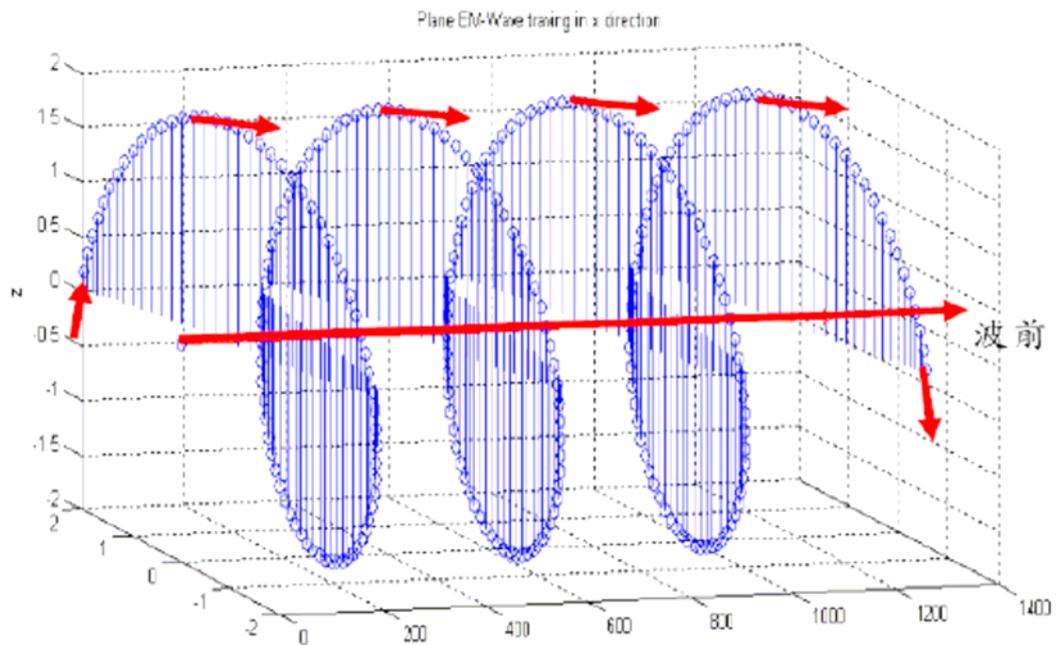


圖 2-11 右旋偏極化波

圖 2-11 其數學表示式為： $\vec{E}_R(\omega) = (\hat{x} - j\hat{y})E_a(\omega)$ (2-15)

$\vec{E}_R(t) = \hat{x}|E_a(\omega)|\cos(\omega t + \phi) + \hat{y}|E_a(\omega)|\sin(\omega t + \phi)$ (2-16)

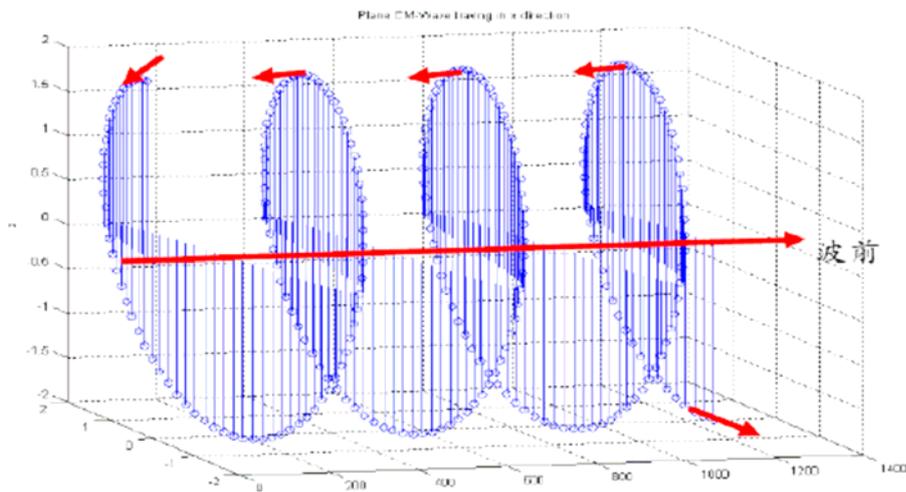


圖 2-12 左旋偏極化波

圖 2-12 其數學表示式為： $\vec{E}_L(\omega) = (\hat{x} + j\hat{y})E_a(\omega)$ (2-17)

$$\vec{E}_R(t) = \hat{x} | E_a(\omega) | \cos(\omega t + \phi) - \hat{y} | E_a(\omega) | \sin(\omega t + \phi) \quad (2-18)$$

式中：

\vec{E}_R : 為右旋偏極化

\vec{E}_L : 為左旋偏極化

\vec{E}_a : 為單位電場

\hat{x} : 為X向量

\hat{y} : 為Y向量

ω : 為角頻率

t : 為時間

ϕ : 為相位差

2.2.2 GPS 訊號鏡面反射模型

GPS訊號遇反射物後，依據邊界條件之電場的切線方向分量連續，使極性改變，若經過一次反射， E_y 項位將領先 E_x 90°，成為左旋圓形偏極化，若經過兩次反射訊號變為右旋圓形偏極化，依此類推，如圖 2-13。GPS訊號遇障礙物時，有可能發生多次反射，但因為多次反射造成能量衰減過多，所以只需考慮類似完全反射之一次反射訊號，為左旋圓形偏極化訊號。在接收反射訊號時，如果要取得最大強度的訊號，就需要選擇與訊號相同偏極化的天線(鄭，2004)。

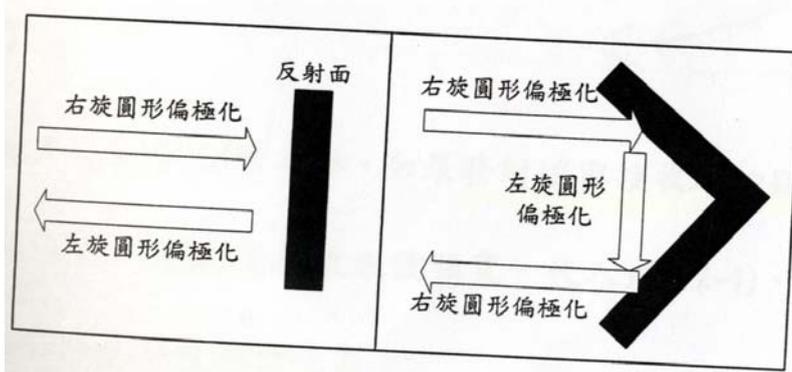


圖 2-13 反射訊號偏極化改變

反射訊號的極性，也受到入射角度的影響。對於海面反射訊號而言，當入射角為接近 90° 全反射時，反射訊號為左旋圓形偏極化，但當入射角小於約 30° ，則會同時有右旋圓形偏極化和左旋圓形偏極化的訊號。如圖 2-14 顯示從 $0^\circ \sim 90^\circ$ 時兩種偏極化訊號的反射率(Katzberg, et al.,1996)。

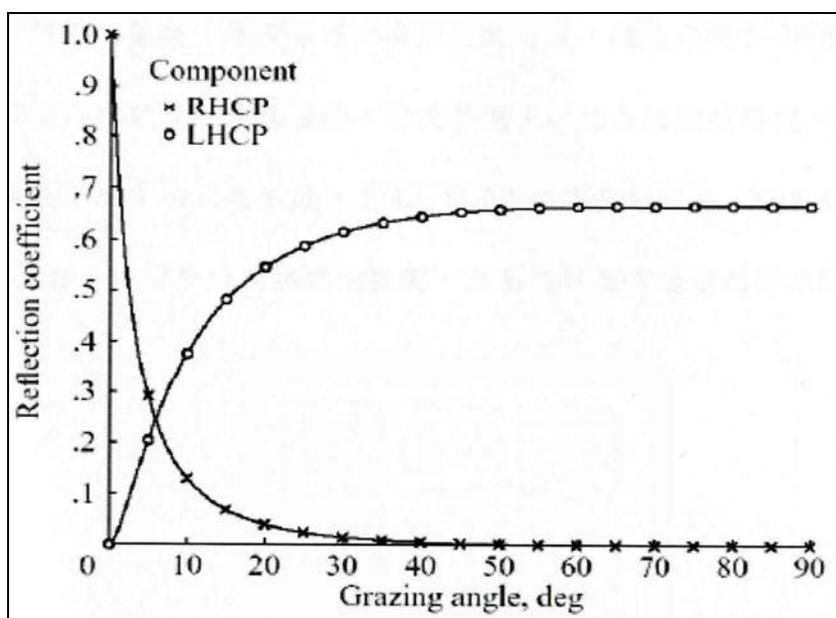


圖 2-14 反射訊號極性和入射角度的關係(Katzberg, et al.,1996)

由圖 2-14 可知 GPS 訊號接收時有效仰角取 15° ，對直接及反射訊號皆佳。而對反射訊號之接收而言，小於 15° 則不佳。

2.2.3 雙站雷達之反射模型

GPS 反射訊號是應用雙站雷達(Bistatic Radar)之反射模型來探討反射訊號之應用(鄭皓盈，2004)。微波遙測的應用中最常見的稱為單站雷達(Monostatic Radar)，它是一種主動式雷達，雷達本身必須自行發射微波到可反射回來的介質水面或陸地，並且必須有接收回返之反射波的能力，如圖 2-15。而雙站雷達只須有接收反射波的能力即可，如圖 2-16(洪，2008)。

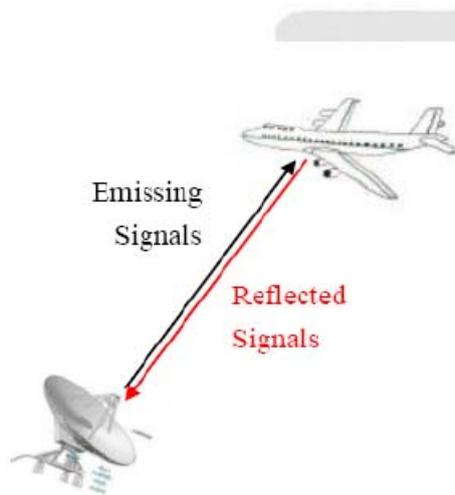


圖 2-15 單站雷達示意圖

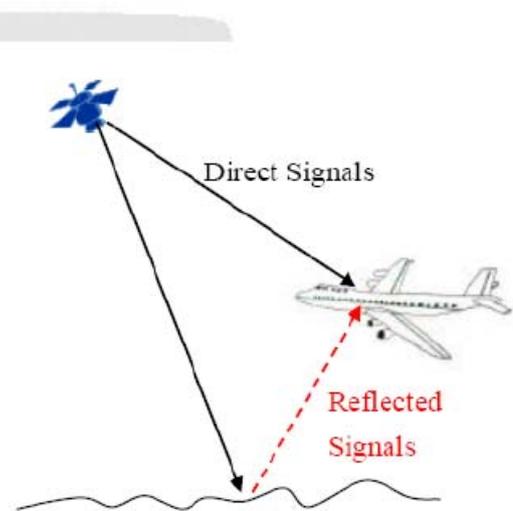


圖 2-16 雙站雷達示意圖

在這種情形下當我們在分析 GPS 衛星訊號在水面的反射訊號時，必須設計一參考訊號當標準，以此標準訊號來分析反射訊號之變化，以提供『訊號源』與『反射訊號』間之比較標準，因為 GPS 衛星訊號從衛星發射到接收端這段路徑中，會經過大氣層，在此一段長距離的傳播中會有一些像是對流層、電離層、下雨或是空氣污染灰塵等等干擾存在，當 GPS 衛星訊號傳遞到接收端時，原本的訊號強度已有衰減

的現象，因此，在分析反射訊號時，不能以衛星發射時之原本訊號源為參考標準，而必須尋求一個標準訊號當反射訊號的標準參考訊號源，這也是雙站雷達必預考慮的因素之一。

以接收儀器直接天線高度約為 1 公尺為例，所以直接訊號端之總誤差量(ErrAll_D)幾乎是等於反射訊號端之總誤差量(ErrAll_R)。如圖 2-17 所示，(A)點訊號強度 = (P) 反射點訊號強度，直接訊號與反射訊號間的差異量決定在(P)點反射面的材料與粗糙程度，而(P)點到(B)點這段路徑之外界干擾或誤差幾乎可忽略；因此，直接訊號強度可用來做為反射訊號強度比較之參考標準，以直接訊號強度當參考之標準，分析反射訊號之能量(Power)變化、相位(Phase)變化、延遲(Delay)變化，是雙站雷達的特性。

GPS 反射訊號即利用雙站雷達的這種特性來進行遙測應用。其電磁波為 GPS 載波訊號，屬於 L 波段，對於水面高及波浪變化量測有其優越性，本計劃之研究即為利用其成熟的直接訊號精密定位結果，並延伸應用到反射訊號之定位，並導出水面反射點的坐標及高程。

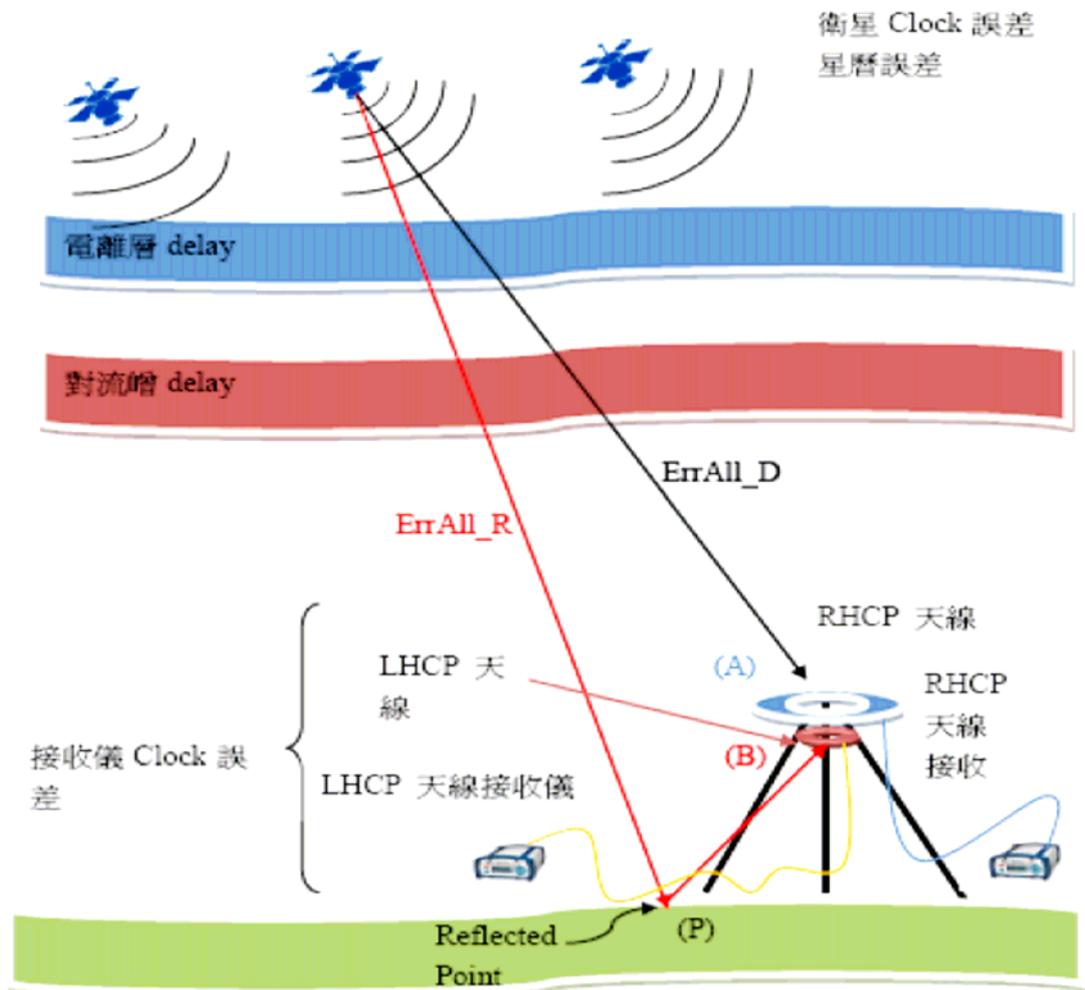


圖 2-17 GPS 直接訊號(RHCP)與反射訊號(LHCP)接收示意圖

2.2.4 GPS 反射訊號之反射點定位與反射點(面)高程計算

GPS 衛星反射訊號之定位模式如圖 2-18 之幾何圖形所示(設地心坐標為 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$)，假設我們在 A、B 兩點設兩接收儀，分別接收 GPS 衛星訊號，在 A、B 兩點中間插入一虛擬水平面，則由 Snell's Law 入射角 $(\theta_i) =$ 反射角 (θ_r) ，而且因為是虛擬水平面，所以入射角 $(\theta_i) =$ 反射角 $(\theta_r) =$ 折射角 (θ_t) ，且 $\theta_a = \theta_b$ ， $h_d = h_r$ ， $r_d = r_r$ ，因此，若已知衛星坐標 (x_s, y_s, z_s) 、A 點坐標 (x_d, y_d, z_d) 、B 點坐標 (x_r, y_r, z_r) ，則 P 點反射坐標 (x_p, y_p, z_p) 即可解得。若將 B 接收儀改成反射訊

號接收儀(左旋天線)，將其置於 A 接收儀下方，則形成反射訊號接收的遙測模式，因為衛星訊號所走的路徑改變但距離是相近的，當我們利用虛擬距觀測或相位觀測時，皆不影響其 GPS 衛星定位的原理，得到的是衛星與 B 點的相對位置坐標 (x_r, y_r, z_r) ，再利用 A、B 兩點高差的一半作為虛擬平面，與直線 R_r 相交的點即是反射點，因此可以利用這樣的模型來計算反射訊號位置的定位。

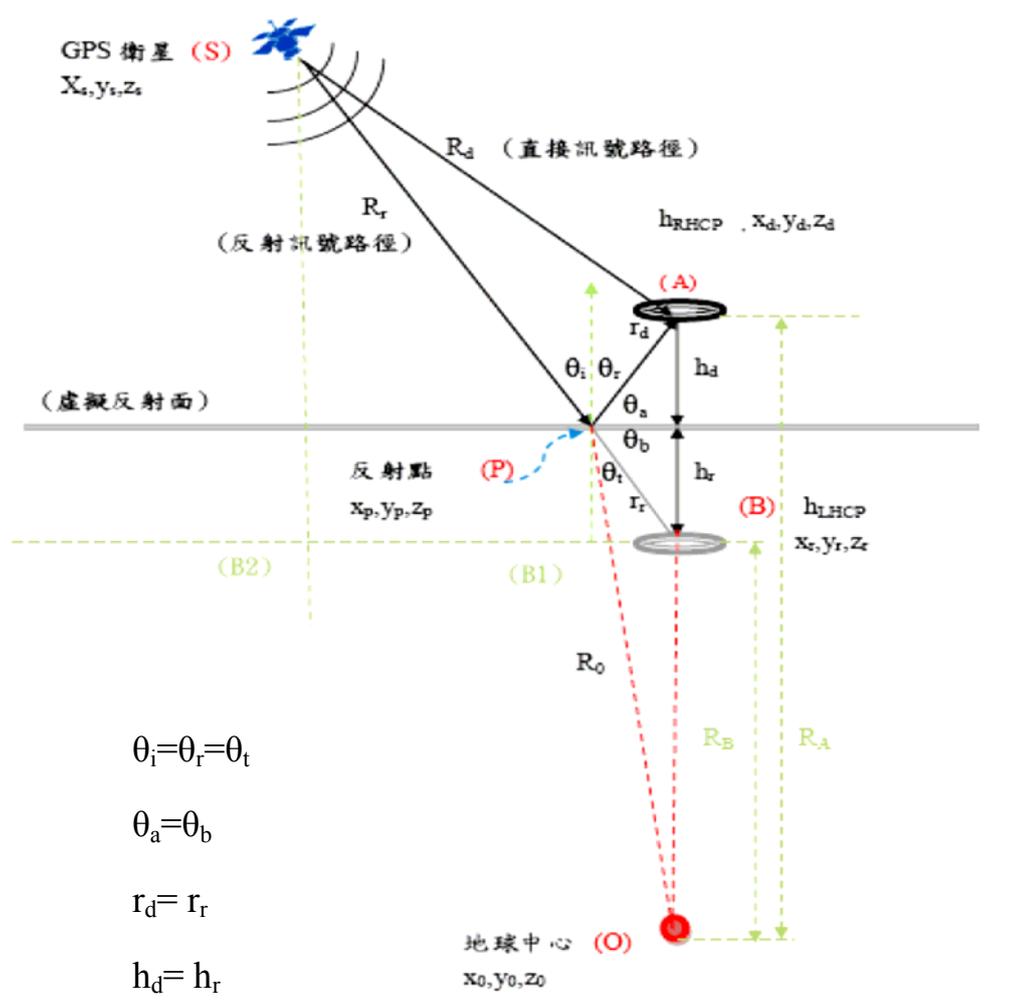


圖 2-18 GPS 反射訊號定位示意圖(洪，2008)

因此不管是右旋(RHCP)天線接收到直接訊號，或是左旋(LHCP)天線接收到反射訊號，都可以利用(2-19)式至(2-24)式來求解左、右旋之觀測資料，分別解算出直接訊號(A 點)坐標與反射訊號(B 點)坐標。先將 4 組(或更多組)L1_Band 之 C/A 碼觀測量代入(2-19)及(2-20)式，以最

小平方差疊代最小餘數法則 LAMBDA-Method (陳, 2006、Shen, et al.,2008), 解出初始坐標, 再以相位觀測量、對流層延遲、電離層延遲等觀測量代入(2-23)、(2-24)式, 以最小平方差疊代最小餘數法導出各個周波未定值(Ambiguity)之初始估計值 $N_i(I = 1, 2)$, 再利用 MATLAB 計算軟體, 將它項殘差 $\varepsilon L_1, \varepsilon L_2$ 代入, 再一次以相位觀測量公式(2-21)、(2-22)以最小方差疊代最小餘數法求解整周波未定值, 如此重複的疊代, 直到解算出來的坐標精度在許可值內就可結束疊代, 通常設定高程精度小於 1cm 時即可。

$$P_1 = R + c \times (dt - dT) + I_{ion} + Trop + \varepsilon_{p1} \quad (2-19)$$

$$P_2 = R + c \times (dt - dT) + (f_1/f_2)^2 I_{ion} + Trop + \varepsilon_{p2} \quad (2-20)$$

$$L_1 = R + c \times (dt - dT) - I_{ion} + Trop + \lambda_1 \times N_1 + \varepsilon L_1 \quad (2-21)$$

$$L_2 = R + c \times (dt - dT) - (f_1/f_2)^2 \times I_{ion} + Trop + \lambda_2 \times N_2 + \varepsilon L_2 \quad (2-22)$$

$$N_1 = (L_1 - (R + c \times (dt - dT) - I_{ion} + Trop + \varepsilon L_1)) / \lambda_1 \quad (2-23)$$

$$N_2 = (L_2 - (R + c \times (dt - dT) - (f_1/f_2)^2 \times I_{ion} + Trop + \varepsilon L_2)) / \lambda_2 \quad (2-24)$$

其中 $L_1 = \varphi_1 \lambda_1 / 2\pi$; $L_2 = \varphi_2 \lambda_2 / 2\pi$ 。

以上解算過程左、右旋兩者皆可應用, 其中解出之左旋(B點)坐標並非反射點坐標, 因此, 需由 B 點坐標及 S 點衛星坐標再求出反射點坐標, 圖 2-18 中:

$$R_o = \sqrt{(x_p - 0)^2 + (y_p - 0)^2 + (z_p - 0)^2} \quad (2-25)$$

$$R_d = \sqrt{(x_s - x_d)^2 + (y_s - x_d)^2 + (z_s - x_d)^2} \quad (2-26)$$

$$R_r = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - x_r)^2 + (z_s - x_r)^2} \quad (2-27)$$

$$r_d = h_d \times \csc(\theta_a) = r_r = h_r \times \csc(\theta_b) \quad (2-28)$$

其中，

R_0 : 反射點P到地球中心的距離。

R_d : 右旋天線到衛星間的距離。

R_r : 左旋天線到衛星間的距離。

h_d : 右旋天線高。

h_r : 相應射之左旋天線高。

r_d : 反射路徑。

r_r : 相應射反射路徑。

虛擬水平面為 A、B 兩點中間的平面，所以：

$$h_d = h_r = (R_A - R_B) / 2 \quad (2-29)$$

$$x_p = \frac{R_r - r_r}{R_r} \times (x_s - x_d) + x_d \quad (2-30)$$

$$y_p = \frac{R_r - r_r}{R_r} \times (y_s - y_d) + y_d \quad (2-31)$$

$$z_p = \frac{R_r - r_r}{R_r} \times (z_s - z_d) + z_d \quad (2-32)$$

將 $r_r = h_d \times \csc(\theta_a)$ 代入(2-30)~(2-32)式得：

$$x_p = \frac{R_r - h_d \times \csc(\theta_a)}{R_r} \times (x_s - x_d) + x_d \quad (2-33)$$

$$y_p = \frac{R_r - h_d \times \csc(\theta_a)}{R_r} \times (y_s - y_d) + y_d \quad (2-34)$$

$$z_p = \frac{R_r - h_d \times \csc(\theta_a)}{R_r} \times (z_s - z_d) + z_d \quad (2-35)$$

θ_a : 衛星仰角

由於衛星是一運動體，衛星坐標隨著時間不停的在變動，因此計算出來之 (x_p, y_p, z_p) ，是一條反射點連接而成的反射面路徑的曲線，我們可以藉由此一反射點路徑反射回來的反射訊號或能量或相位差變化，尋求對粗糙面或反射物質更進一步的分析與研究。至於反射點的平面位置(經緯度或N、E坐標)以及反射點高程(H)，則由一系列的反射坐標 (x_p, y_p, z_p) 經過坐標轉換而求得。其中H即為以平均海水面起算之水面高程，稱為“正高”或“海拔高度”。

第三章 試驗儀器與作業流程

3.1 GPS 接收儀功能及運作方式

GPS 定位接收儀的種類很多，但其基本結構是相同的，都由天線/低雜訊前置放大器、連接電纜線、接收儀主機組成，如圖 3-1 所示。由天線接收其視野內空中所有 GPS 衛星廣播的 L1(1575.42MHz)、C/A 碼，由隨後的低雜訊前置放大器濾波放大。前置放大器設計目的，是為了壓抑緊接其後的傳送電纜線及接收儀後級處理產生的雜訊 (Noise)，以改善信號雜訊比 (S/N)。多顆衛星的信號被同時放大後，經電纜線送至接收儀主機(Misra, et al, 2001)。

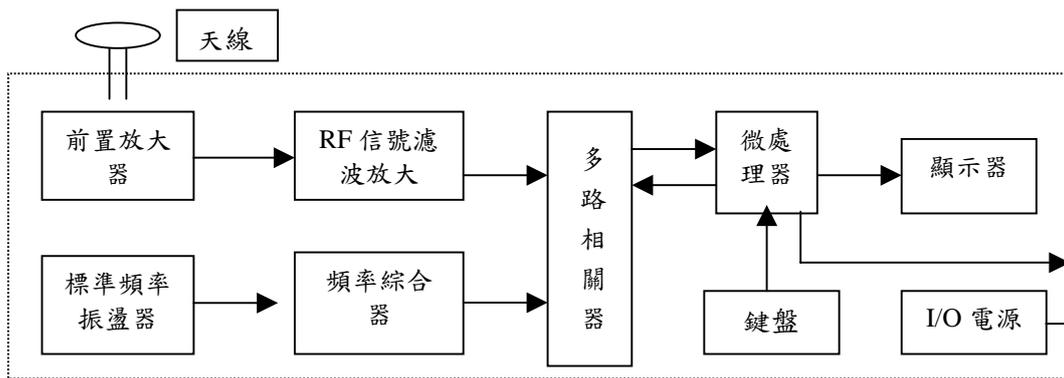


圖 3-1 GPS 接收儀基本組成與運作方式

天線前置放大器送來的 GPS 衛星信號，在接收儀主機中經濾波放大，轉換成數字信號送至多路相關器 (Multichannel Correlator)。每顆 GPS 衛星發射的導航信號是將基本虛擬碼，其碼速率為 50b/s，碼位寬 20ms，用 $D(t)$ 表示，先與虛擬隨機碼 C/A 碼 (以 $C/A(t)$ 表示)，速率為 1.023MHz，含有 1023b，周期為 1ms，模二相加 $[D(t) \oplus C/A(t)]$ ，或兩者波形相乘 $[D(t) \cdot C/A(t)]$ ，而後再對載波(1575.42MHz)進行 (Binary Phase Shift Keying, BPSK) 調制形成信號 L1，以完成展頻程序。

GPS 接收儀天線同時接收其視野內的全部衛星，一般可同時接收 6-12 顆衛星信號，接收儀採用相關信號處理，將衛星信號分離出來，並剔除不需要的衛星信號。

衛星傳送之虛擬隨機雜訊碼、載波與衛星信息等之接收處理過程中，雖然太空中 24 顆 GPS 衛星用的虛擬隨機雜訊碼(C/A)的內容都不相同，但卻可與各顆衛星相互對應，因此利用虛擬碼具有良好的自相關 (Auto-correlation) 特性，在同時接收到的所有衛星信號中，找出相應的衛星信號而拒收不需要的衛星信號，這就是相關性接收技術的應用。

衛星接收儀相關器的接收電路輸入端信號是 $D(t) \cdot C/A(t)$ ，本身電碼產生器所產生虛擬碼與所要接收的衛星信號虛擬碼，要完全相同，但兩者時間上會有一相對位移 τ ，即本身虛擬碼為 $C/D(t-\tau)$ 。在乘法器中，信號與本身虛擬碼相乘，得到之輸出為 $D(t) \cdot C/A(t) \cdot C/D(t-\tau)$ 。當本身虛擬碼和衛星信號中虛擬碼存在相對時間位移，即 τ 不等於 0，且位移大於一個虛擬碼寬度時， $C/A(t) \cdot C/D(t-\tau)$ 的值遠小於 1，所以 $D(t) \cdot C/A(t) \cdot C/D(t-\tau)$ 的值也非常小，因此幾乎檢測不到信號 $D(t)$ 存在。只有當本身虛擬碼與衛星信號虛擬碼不存在相對時間位移，即 $\tau=0$ 時，則 $C/A(t) \cdot C/A(t)=1$ ，因此乘法器輸出為衛星基本虛擬碼 $D(t)$ ，如此才能恢復衛星信號 $D(t)$ ，這時才完成接收儀本身虛擬碼與衛星信號虛擬碼相關的程序。

多路相關器可以有 1 至 12 路或更多相關路徑，完全由使用需要和生產廠技術水準而定。通常，每個相關路徑的電路完全相同，接收儀具有多少個相關路徑，則可同時並行接收多少顆衛星信號。每個相關路徑由碼延時鎖定迴路 (Delay Lock Loop, DLL) 和載波鎖定迴路 (Phase Lock Loop, PLL) 組成。碼延時鎖定迴路(DLL)是將本身虛擬隨機碼(C/A 碼)與衛星虛擬碼(C/A 碼)對齊，以完成對衛星信號的蒐集、追蹤、識別、時間恢復和虛擬距離測量；載波鎖定迴路使本身載波與衛星信號載波同步，以調出衛星星曆數據等，並可進行載波相位測量。相關路徑的工作，完全是在微處理器的程式控制下進行，所測得的虛擬距離、

載波相位及調出的衛星星曆數據，被即時載入微處理器的存儲器中。

微處理器根據蒐集的衛星星曆、虛擬距離觀測值，解算出使用者的位置坐標及其他導航信息，並將解算出的使用者位置和相應時間，顯示在顯示器上或通過 I/O 端輸出。鍵盤用於控制儀器作業，完成使用者對接收儀的操作和導航功能。頻率標準振盪器提供接收儀的參考頻率信號和時間基準信號。頻率綜合器產生接收儀 RF 信號的本身參考信號和相關器的參考時鐘頻率信號。另外，還有接收儀各部件工作所需的電源。

3.2 GPS 試驗儀器性能

本次實驗所使用之儀器與性能如下：

(1) 大地測量型雙頻接收儀：SOKKIA L1/L2 雙頻 GPS 接收儀，如圖 3-2 所示，型號為 SOKKIA-2600，DL-4plus，FlexPak-G2L，OEM4-G2，詳細規格如附錄 II。



圖 3-2 SOKKIA GPS 雙頻接收儀

(2) 右旋天線(RHCP, Right Hand Circular Polarization)：為 Novatel 廠，天線型號 SK-600，作為接收 GPS 直接訊號之天線，如圖 3-3 所示，詳細規格如附錄 II。



圖 3-3 RHCP 天線

(3)左旋天線(LHCP, Left Hand Circular Polarization)：為 Novatel 廠，天線型號 H-601，作為接收 GPS 反射訊號之天線，如圖 3-4 所示，詳細規格如附錄 II。



圖 3-4 LHCP 天線

3.3 試驗流程與使用軟體

1. 簡單波形函數分析流程：

本分析流程為在中型水槽試驗時，以抽水馬達抽水，進行水位下降變化之觀測，以 RHCP/LHCP 天線坐標、坐標時序資料檔為輸入檔，GPS REFLECTION POSITION 軟體執行反射點坐標計算，將平均水位高程、個別反射點軌跡、個別反射點坐標、高程、反射點坐標、高程時序資料檔與誤差（精度）存於輸出資料檔。中型水槽架設之 RHCP, LHCP 與水準尺位置，如圖 3-5。



圖 3-5 中型水槽架設 RHCP，LHCP 與水準尺位置

2. 將衛星影像向量圖、個別反射點軌跡與時序資料檔作為輸入檔
GPSGROUND DETECT 軟體執行整合衛星影像圖與反射點瞬間位
移與水位計量測數據，提供轉換反射點與波高計相對位置與距離，
將個別反射點坐標修正高程存於輸出資料檔，RGPS 之 GPS
GROUND DETECT 之流程，如圖 3-6。

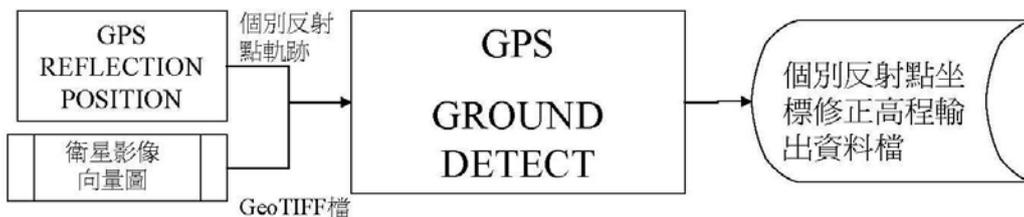


圖 3-6 RGPS 之 GPS GROUND DETECT 流程

對於造波水槽中所造出波浪，以規則波而言，可以用簡單的正弦函數表示：

$$\eta(x,t) = A \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (3-1)$$

其中 A 為振幅， k 為週波數， ω 為角頻率。以試驗水槽水深 3.25m，週期 $T=6.0$ sec，藉由分散方程式之計算可得 $k = 0.2564$ 。而所造出波浪由波高計水位量測值顯示，波峯振幅 $A^+ = 0.48$ m，波谷振幅 $A^- = 0.37$ m。則振幅可大略表示為 $A = (A^+ + A^-) / 2$ 。

由於 GPS 反射訊號在水面反射點和波高計 (x 位置為 100 m) 並不在同一位置上，因此，若要作比較則可以和用波形函數作大略的調整。

$$\tilde{h}_s^i = \bar{H}_{ground}^i + [\eta(x_s^i, \bar{t}) - \eta(100, \bar{t})] \quad (3-2)$$

其中 \bar{H}_{ground}^i 表由 RGPS 測得之水面高程，又上標 i 表示第 i 為衛星時間， x_s^i 表示第 s 顆衛星、在 i 衛星時間之反射點之位置，時間 \bar{t} 為參考時間， \tilde{h}_s^i 則為第 s 顆衛星、在 i 衛星時間之反射點之修正後高程。

應用式(3-1)於式(3-2)時，以每一反射位置，只需代入 x 關係值，修正各反射點之高程值，其進行方式如下：

- (a) 由 RHCP 與 LHCP 相位觀測量坐標與反射點坐標模式，計算水位個反射點高程平均值。
- (b) 應用反射點距波高計距離之反射點高程，所對應之波形，計算出初始波形高程值。
- (c) 計算所得之五個反射點，可迴歸出週期之完整性，作為判斷依據。
- (d) 調整 i (衛星時間) 與 \bar{t} (參考時間) 直接平移，可使波形週期儘量重合。
- (e) 波高值若有實際波高計水位量測值低，將 LHCP 高度迭代範圍大，使波高 $[\eta(x_s^i, \bar{t}) - \eta(100, \bar{t})]$ 加上 \bar{H}_{ground}^i 平均水位高程值，才能與波形週期重合。

3. 訊號接收之轉檔與處理

(1) RGPS Digital GPS O 檔資料轉檔：

- (a)以衛星星曆時間為時間基準。
- (b)校正 RHCP 與 LHCP 觀測量之同步時間與觀測量遺失之時間與暫存檔。
- (c)選擇 LHCP 與 RHCP 觀測量下載與計算所需資料量。
- (d)修補 L2 觀測量遺失與資料庫之時間與暫存檔。
- (e)判斷 LHCP 觀測量下載資料量五顆衛星之完整性。
- (f)取用最佳空間交會之五顆衛星幾何空間。
- (g)GPS 檔提供電離層與對流層延遲量。

(2)波高計轉換 Matlab 輸出檔：波高計 3000 筆數據為 25Hz (0.04

秒)，採每隔 4 組數據取樣一次，作為與 GPS 觀測資料之比較。

- (a)對應衛星星曆時間與波高計記錄時間基準。
- (b)校正 RHCP 與 LHCP 觀測位置與對應波高計 X 方向位置。
- (c)選擇降低或妥適下載與計算所需資料量。

(3) GPS 載波相位相對定位：

- (a)與成功大學測量系館樓頂之 CN11 已知基準點與 RGPS 之 RHCP 及 LHCP 天線進行長達 30 分鐘之靜態相對定位聯測。
- (b)以靜態相對定位基線解法，求解 RHCP 及 LHCP 天線之精密定位之坐標，以提供水位觀測時修正坐標之用。

(4) 以 GPS 精密定位坐標輔助 RGPS 坐標對固定斷面水槽實驗：

- (a)應用兩組 RHCP 觀測位置與衛照圖輔助修正觀測位置。

- (b)LHCP 觀測量，本身觀測量無法進行即時 GPS 精密定位之 RGPS 坐標，需應用本分析軟體計算獲得精確定位坐標。
 - (c)LHCP 觀測位置可由已知 RHCP 觀測位置與衛照圖輔助修正觀測位置。
- (5) GPS 精密定位輔助 RGPS 坐標對安平港潮汐水位、海浪浪高、週期實驗：
- (a)安平港之海浪浪高、週期(5~12 秒)變化需至少 2Hz 頻率下載觀測量，進行即時 GPS 精密定位坐標來修正 RGPS 坐標，需應用本分析軟體計算獲得精確定位坐標。
 - (b)應用兩組 RHCP 觀測位置與衛照圖輔助修正觀測位置。

3.4 精密定位已知參考點：

如圖 3-7 所示之 CN11 位於成功大學測量系館樓頂，已有準確之 WGS84 及 TWD97 坐標值，本研究皆以這個點做為精密定位參考點，(近似坐標為 N 22.998 E 120.2199 H64.63 m)。成功大學臺南水工試驗所大型、中型斷面水槽及安平港 RGPS 實驗區，做為 RGPS 坐標解算時之位置修正量。應用 CN11 進行 RGPS 位置修正後，使得坐標位置與水道衛星影像圖套疊精確，圖 3-7 為成功大學臺南水工所斷面水槽衛星照圖圖示與衛星訊號路徑，修正資料如下表：CN11 提供 2009.04.11 修正資料納入 GPS 定位軟體進行。

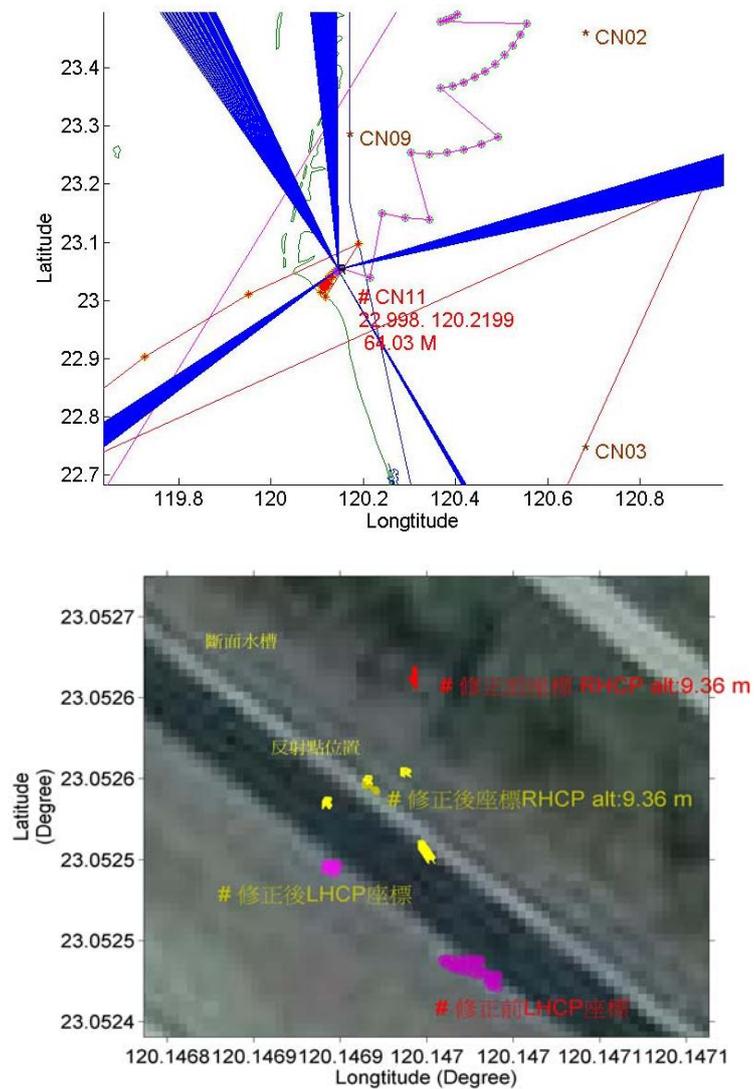


圖 3-7 成功大學臺南水工試驗所斷面水槽衛星照圖圖示與衛星訊號路徑

3.5 試驗步驟與過程

(1)實驗前準備：實驗環境之履勘，並以 GPS 精密定位獲取實驗地點之參考坐標。輸入修正參數於軟體，考量反射訊號之遮蔽限制，以衛星追蹤軟體協助與處理，推測衛星分布、移動方向、位置。並在成功大學之海事所陽台執行 RGPS 訊號接受與操作訓練、程式設計原理並與計算成大自強校區草地地形高程值，詳如圖 3-9。



圖 3-9 成功大學海事所陽台執行 RGPS 訊號接受與操作訓練

(2) 實驗前 GPS 儀器校正：實驗環境架設 RHCP/LHCP 天線，NB 正常運作之儀器校正。執行衛星應用軟體運作、連線作業情況，校正坐標與下載觀測量之正常情況，實驗儀器接受與訊號處理與波高計記錄器 25Hz 量測紀錄，詳如圖 3-10。



圖 3-10 儀器校正與波高計記錄器

(3) GPS 實驗儀器架設：依據實驗時間與 RHCP 之接收儀實際衛星分布，調整 LHCP 天線，使衛星 GPS 反射訊號之方位與仰角，進入最佳接收範圍，先以 15 分鐘觀測，使 LHCP 之接收儀接上 RHCP 天線運作，以獲取初始坐標與衛星星曆，確認下載 log command 項目正確，channel 位置 assign 完成 5-7 顆每一 GPS 反射訊號衛星之 Doppler shift 值，轉接上 LHCP 天線，同步 assign 指令動作。

(4) GPS 實驗儀器接受與訊號處理：依據實驗需求 LHCP/RHCP 天線、接收儀、NB 正常運作。實驗儀器接受與訊號處理示意圖，圖 3-11：

(a) LHCP 天線之反射訊號，都卜勒訊號追尋與鎖定。

(b) RHCP/LHCP 之 NB 接受下載觀測量同步作業，使 GPS 直接/反射訊號觀測量起始與停止一致。

(c) 波高計記錄時間與 GPS 實驗儀器接受與訊號處理，也需盡量維持同步。

(d) 當 LHCP 天線之反射訊號，無法鎖定，必要時需實驗重新一次，若實驗人員可維持(a)之作業穩定，則可避免反射訊號逐漸消

失。同時以第 3 部 NB 進行資料轉檔，確認(5)作業轉檔資料為 O、N 檔無遺失。

(5) 實驗儀器接受資料轉檔：完成階段性實驗儀器接受與訊號處理後，



圖 3-11 實驗器接受與訊號處理示意圖

將觀測量資訊下載至筆記型電腦(NB)，進行資料轉檔提供作為反射點坐標及高程計算之用。轉檔資料為

(a)直接訊號及反射訊號觀測資料檔(O 檔)

(b)衛星軌道星曆檔(N 檔)

(c)GPS 原始資料檔(gps 檔)。

(6) GPS 反射訊號處理與分析:

(a) RHCP/LHCP 訊號之五組衛星觀測量選定，即時大氣延遲量修正坐標定位計算。RGPS 均有提供電離層及對流層的修正量在下載觀測量，也是以即時電離層及對流層模式修正獲得 5Hz 之精確坐標。

(b)使 RHCP/LHCP 坐標定位起始與波高計觀測資料，經 i 衛星時間)與 \bar{i} (參考時間) 直接平移後，推算五顆衛星水面反射位置之波高變化。

(c) 應用公式 (3-2) 以 RGPS 所提供 \bar{H}_{ground}^i 與公式 (3-1) $\eta(x_s^i, \bar{t})$ 為決定反射點之水位值 \tilde{h}_s^i ，s 為衛星代號，i (衛星時間) 與 \bar{t} (參考時間) 直接平移後。RGPS 提供 \bar{H}_{ground}^i 值，經過計算反射點之 x_s^i ，將 k 與 ω 預估值之簡易水波函數 $\eta(x_s^i, \bar{t})$ 獲得，合併 \bar{H}_{ground}^i 計算值，計算各反射點之水位值 \tilde{h}_s^i 。

第四章 試驗過程與計算結果

4.1 大型斷面水槽波高水位觀測

4.1.1 試驗場地與儀器架設

本項實驗借用位於台南市安南區，國立成功大學安南校區之臺南水工試驗所大型斷面水槽，如圖 4-1 為 T6H85(波浪週期為 6 秒、波高 85 公分，實驗時間:98.04.28.11:60~18:00)，波高計 25Hz (每 0.04 秒取樣一次)共記錄 3000 筆數據，採每隔 4 組數據重新取樣為與 GPS 觀測資料比較。



圖 4-1 成功大學臺南水工試驗所大型斷面水槽
T6H85 實驗中造波圖

RHCP/LHCP 天線架設、波高計位置與成功大學水工試驗所大型斷面水槽剖面示意圖以及水槽之 XYZ 坐標之定義，X 軸指向沿水槽造波水流方向(近似北方)，Y 軸指向東側槽壁方向，Z 軸指向水面上方(極高程方向)，如圖 4-2 所示。

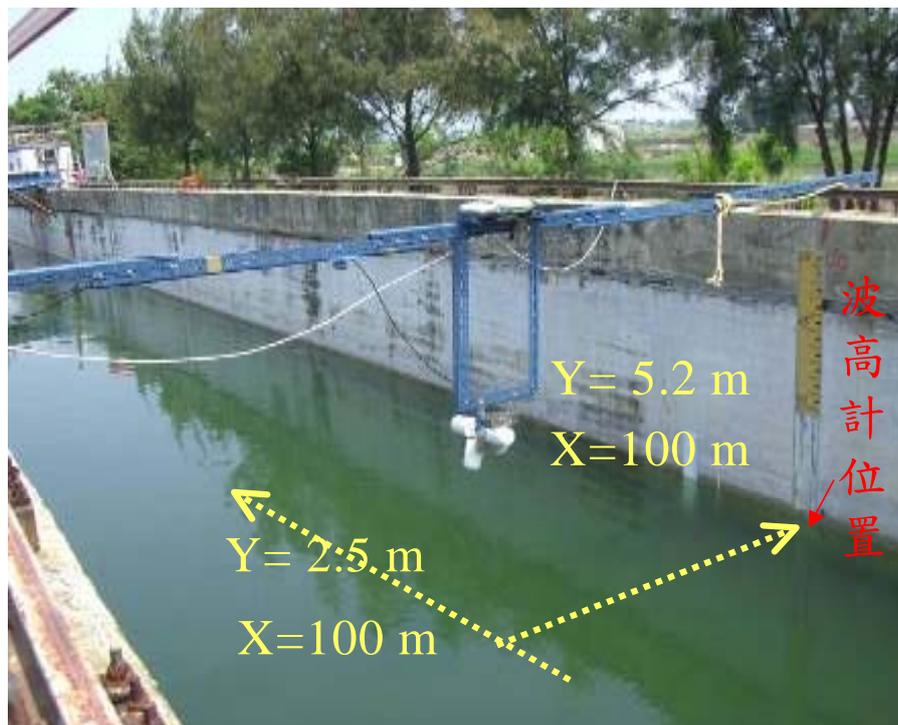


圖 4-2 RHCP/LHCP 天線與水槽剖面示意圖

GPS 天線架設情形說明如下:

- (1) RHCP/LHCP 天線架設、RHCP 天線位於與波高計相同 $X=100\text{ m}$ 水槽橫斷面位置，使用角鋼接合成 6.5 m 天線固定架。
- (2) 為縮小 GPS 反射訊號再水面上反射點足跡，提昇水波高程量測之精度及確保能獲得五顆 GPS 反射訊號，LHCP 天線架設降低到距水面 1.2 m 。使用角鋼接合於 RHCP 天線正下方約 1.0 m ，並以天線固定架與 4 個 LHCP 天線接合。
- (3) 使用二支 RHCP 天線，其中一支特別為提供 LHCP 天線訊號一旦失鎖時，為快速重新恢復坐標以及獲取 GPS 廣播星曆之用。

4.1.2 觀測結果比較分析

在 GPS250 筆觀測數據中(含直接訊號及反射訊號)，RHCP 約成功下載 221 筆資料， LHCP 約下載 206 筆資料。期中有 198 筆計算出反射坐標與水位高程。隨著時間衛星位置變化，反射點位置也會不同，因此，計算之反射點水位高度隨時間的變化很明顯。在圖 4-3 中 RHCP 天線高程，LHCP 天線高程，波高計記錄以及 PRN15，PRN21，PRN24 三顆衛星之三組反射點高程繪製在同一圖上，方便比較分析。

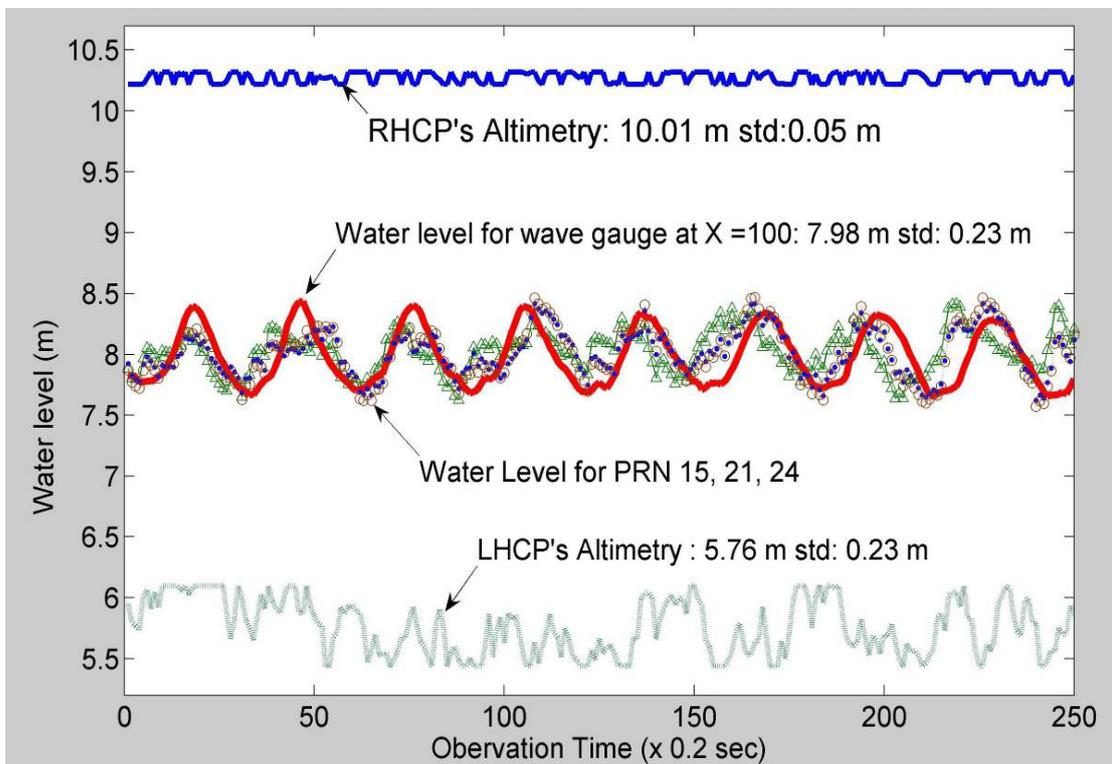


圖 4-3 RHCP 高程，LHCP 高程，波高計水位量測值與 PRN15，PRN21，PRN24 三顆衛星之三組反射點高程比較圖

如同圖 4-3 之分析模式，分別對 PRN15，PRN21，PRN24，PRN26，PRN27 這五顆衛星反射訊號求得之反射高程依時間序列各別繪製，並與波高計量測值疊合在一起，方便比較個別反射點高程所反映出來之波浪水位變化與波高計水位，如圖 4-4。

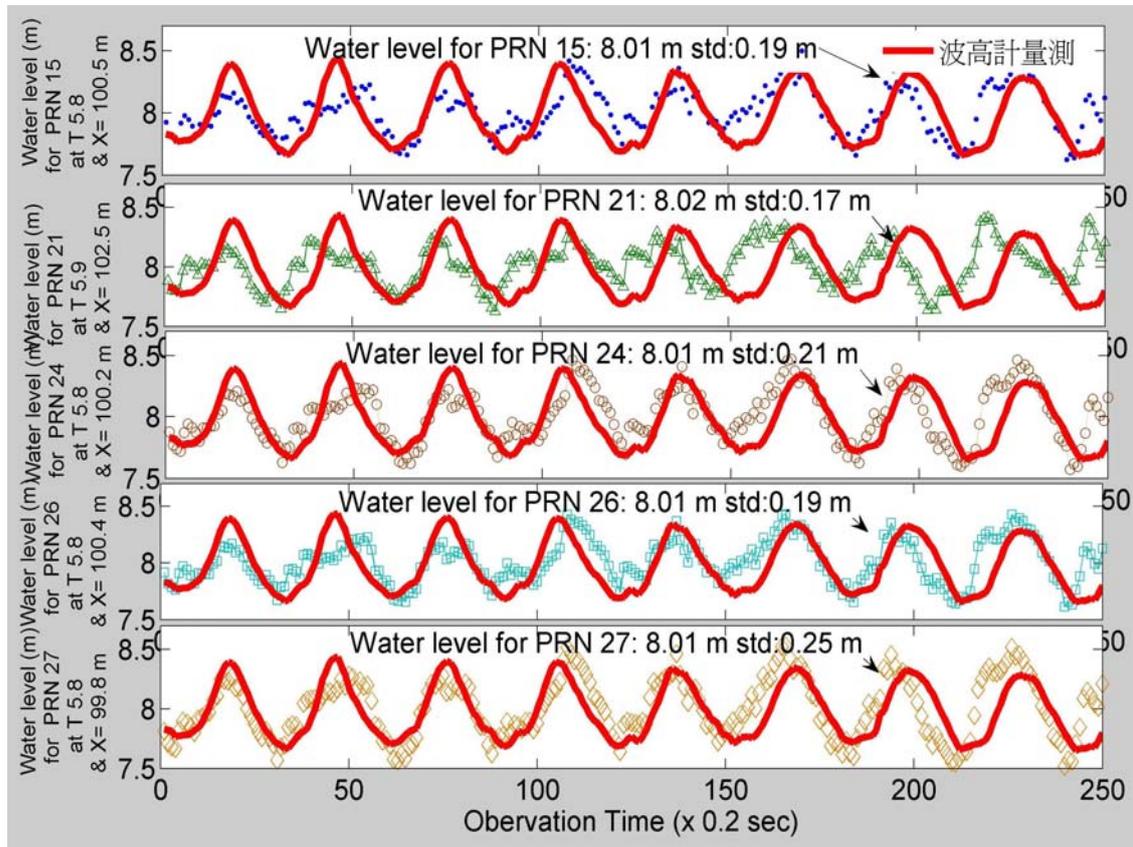


圖 4-4 五顆衛星個別反射點高程水波連續水位變化與波高計水位比較圖

圖 4-5 為將 PRN 27 水面反射點高程，近似波形函數與波高計量測值之比較圖。本實驗中 T6H85 造波之 LHCP 反射訊號其觀測量之中有 95% 接收到 5 顆衛星 (PRN 15, PRN 21, PRN 24, PRN 26, PRN 27) 都能用來計算水面反射點之高程。應用簡單波形函數之波形修正，再與 PRN 27 衛星反射訊號之水面反射點高程值比較可得約 85 % 之吻合度。

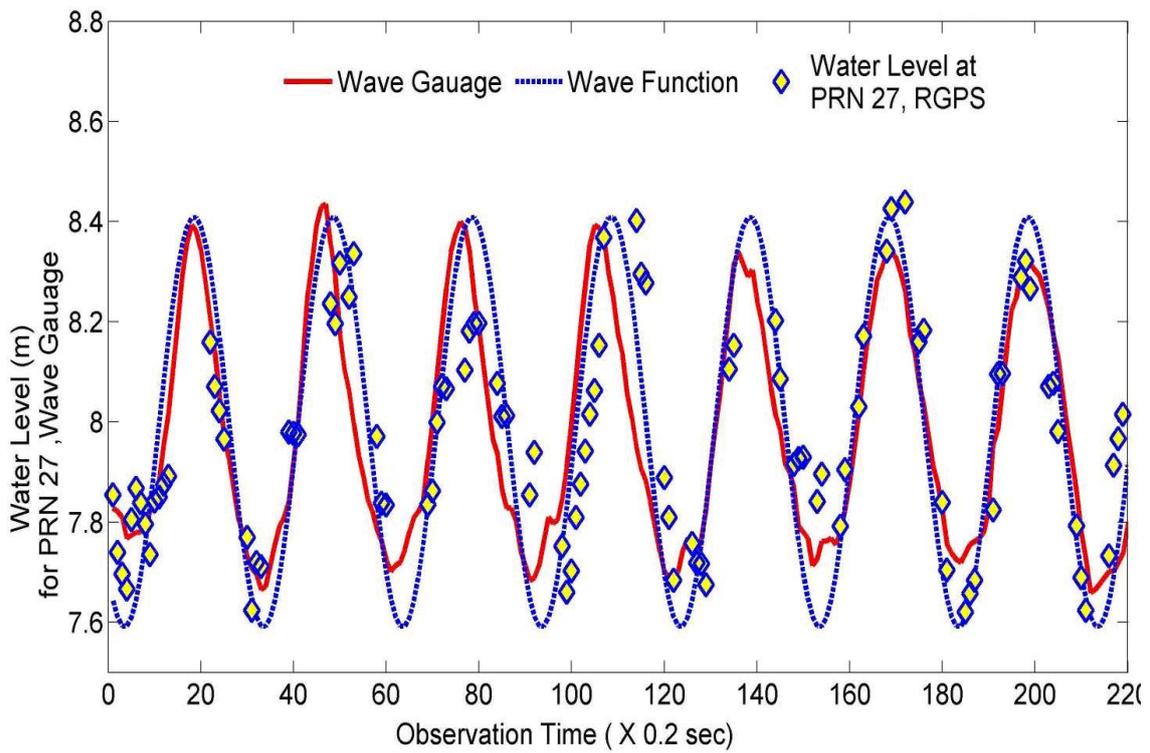


圖 4-5 PRN 27 反射點高程值，波形模式與波高計變化比較圖

圖 4-6 為斷面水槽衛星影像與五個反射點分布圖，以斷面水槽所在位置的座標作為 LHCP 天線座標點，軟體程式模擬，考量天線架設於 5m 寬水槽上方距水面 100 公分，推算出五組 GPS 反射點軌跡 (PRN 15, PRN 21, PRN 24, PRN 26, PRN 27)，圖中波高計位置為 (100.0, 5.2)。

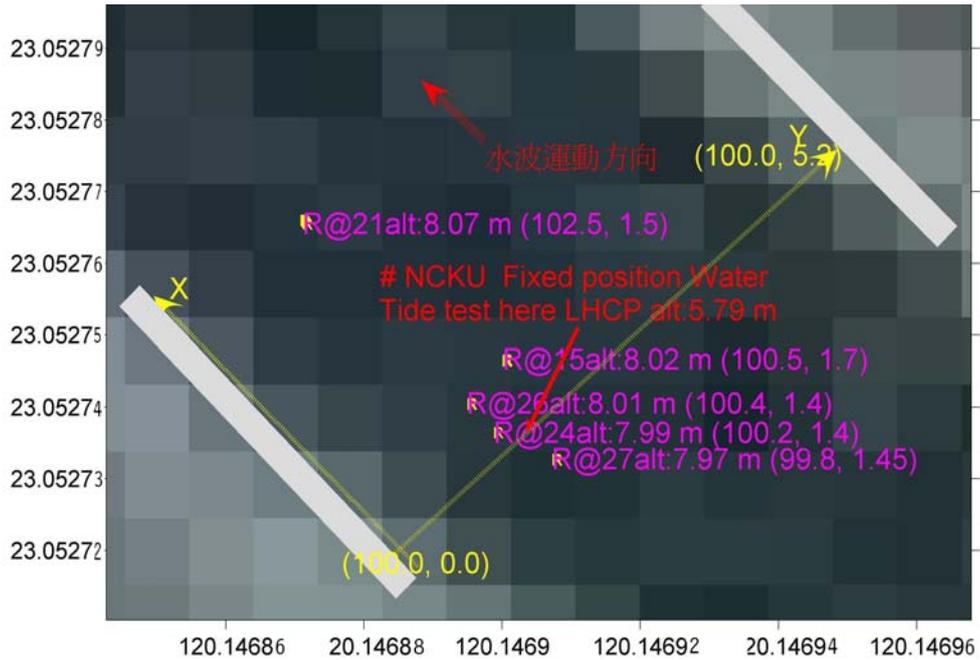


圖 4-6 斷面水槽衛星影像與五個反射點分布圖

圖 4-7 為 PRN 24 反射點放大分布圖，以斷面水槽所在位置的座標軟體程式模擬，推算出 PRN 24 GPS 反射點軌跡點 186 組均位於 (100.20, 1.40) 至 (100.23, 1.40) 範圍內，波高計位置 (100.0, 5.20) 約在 3 公分以內。



圖 4-7 PRN 24 反射點放大分布圖

上述試驗中，二台接收儀於下載速度 5Hz 之觀測量，平均每 6 秒會有 4-6 筆資訊直接遺失(15%)造成波峯波谷處欠缺實際觀測數據，必須靠內插與波形函數之協助才能展現出連續水波波形。檢討改善之作法為後續在中型水槽之試驗中更新硬體、軟體與下載指令，並確保 10 Hz 數據下載能力而無資料遺失。

4.2 中型斷面水槽靜水位與連續水位下降觀測

針對大型水槽試驗結果未能反映出波形乃因觀測量不足，經過改善觀測量下載方式，並提昇軟硬體接收與下載能力後，再度選擇國立成功大學臺南水工試驗所之中型水槽進行靜水位與連續水位下降觀測之實驗。

4.2.1 試驗配置與儀器架設

1. 實驗環境與儀器架設: 借用成功大學臺南水工試驗所中型水槽並在其上架設 RHCP/LHCP 天線，用於量測瞬間水位之水準尺與波高計示意圖，如圖 4-8。



圖 4-8 RHCP/LHCP 天線、水準尺與成功大學臺南水工試驗所中型水槽剖面示意圖

2. 實驗水位下降觀測條件：成功大學水工試驗所中型水槽水位下降實驗過程為 1 小時，波高計以 25Hz (0.04 秒)記錄水位高。採靜止水位實驗有 1 組數據，取樣 120 秒之 3000 筆數據($25^{\text{筆}}/\text{秒} \times 120 \text{ 秒}$)、水準尺為每 1 分鐘提供一筆水位讀尺記錄，與 GPS 以 10 Hz 觀測資料比較。另 1 組為水位下降時之觀測數據取樣 3600 秒之 90000 筆數據($25^{\text{筆}}/\text{秒} \times 3600 \text{ 秒}$)。水準尺為每 1 分鐘提供一筆水位讀尺記錄，用來與 GPS 以 10 秒間隔觀測資料做比較。

4.2.2 觀測結果比較分析

中型水槽水位下降前後之波高計水位量測值(HW01 與 HW02 觀測量)如下:圖 4-9 與圖 4-10 分別為以中型水槽水位下降前、後 HW01 與 HW02 波高計水位量測值與精度比較圖:波高計水位量測值，水位下降前(10 Hz) 波高計水位量測值、水位下降後(0.1 Hz)波高計水位量測值與精度分析結果，波高計水位量測值，波高計之量測精度為 1-2 公分。稍有偏高，觀測 1 小時水位下降也維持很好的一致性，偏差在 1-2 公分。

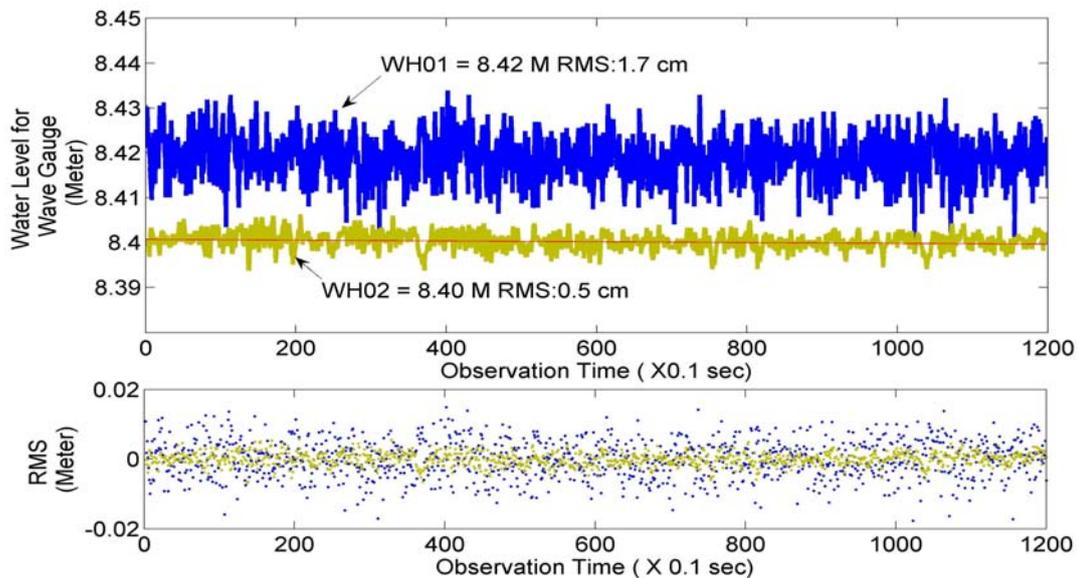


圖 4-9 中型水槽水位下降前 HW01 與 HW02 (10 Hz) 波高計水位量測值與精度比較圖

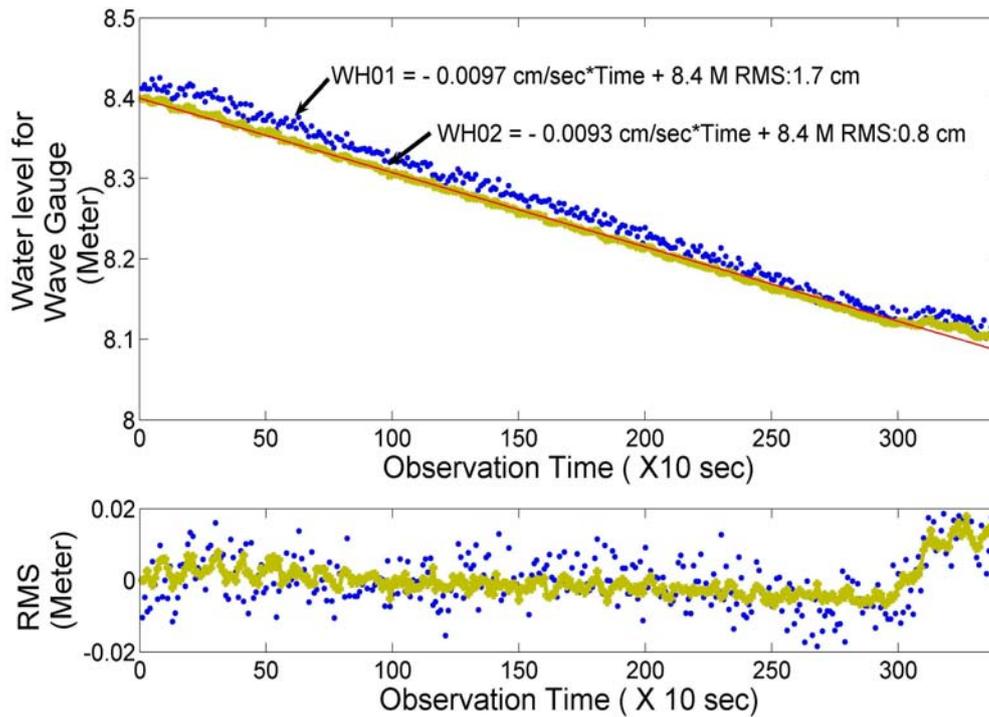


圖 4-10 中型水槽水位下降後 HW01 與 HW02 (0.1 Hz) 波高計水位量測值與精度比較圖

GPS 反射訊號觀測量為 10 Hz 取樣，共有 1200 筆數據，其中 RHCP 約下載 1005 筆資料，LHCP 約下載 1200 筆資料；0.1 Hz 觀測量為 350 筆數據下載，其中 RHCP 約下載 342 筆資訊，LHCP 約下載 350 筆資料，交叉分析成功計算出 1005 筆與 342 筆反射點之坐標與水位高程，影響反射點水位高程之變化，主要來至自水位下降。如圖 4-11 RHCP 天線高程、 LHCP 天線高程、 RGPS 水面反射點水位高程、水準尺量測值與波高計水位量測值之比較圖：

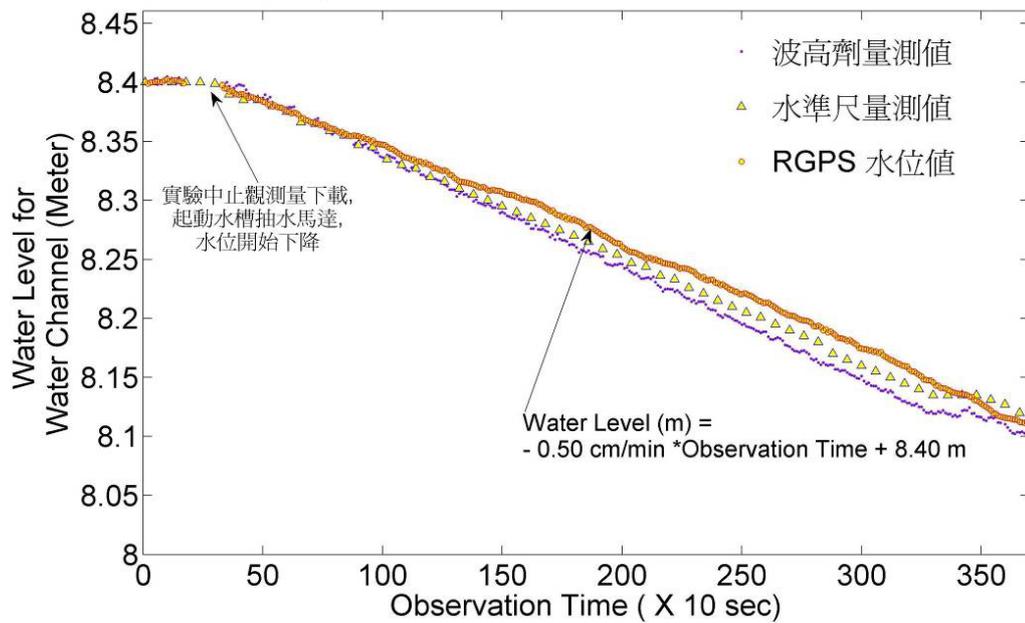


圖 4-11 RGPS 反射點高程值，水準尺與 WH01 波高計水位量測值變化情形比較圖

如圖 4-12 中型水槽水位下降前，反射點平均高程，與波高計 WH01 水位量測值比較圖可以看出，由於反射點位置之大致相同，因為水面有風所造成水面小波之變化，這對計算會產生 0.5~1.0 公分之誤差。RGPS 之量測水位值標準差為 0.1 公分、波高計水位量測值之標準差為 0.2 公分。在圖 4-13 中型水槽水位開始下降時，反射點平均高程，與波高計 WH01 水位量測值比較圖可以看出，RGPS 之水位高程值與水準尺量測值誤差約為 1.0 公分、而波高計水位量測值與水準尺量測值之誤差 1.8 公分。

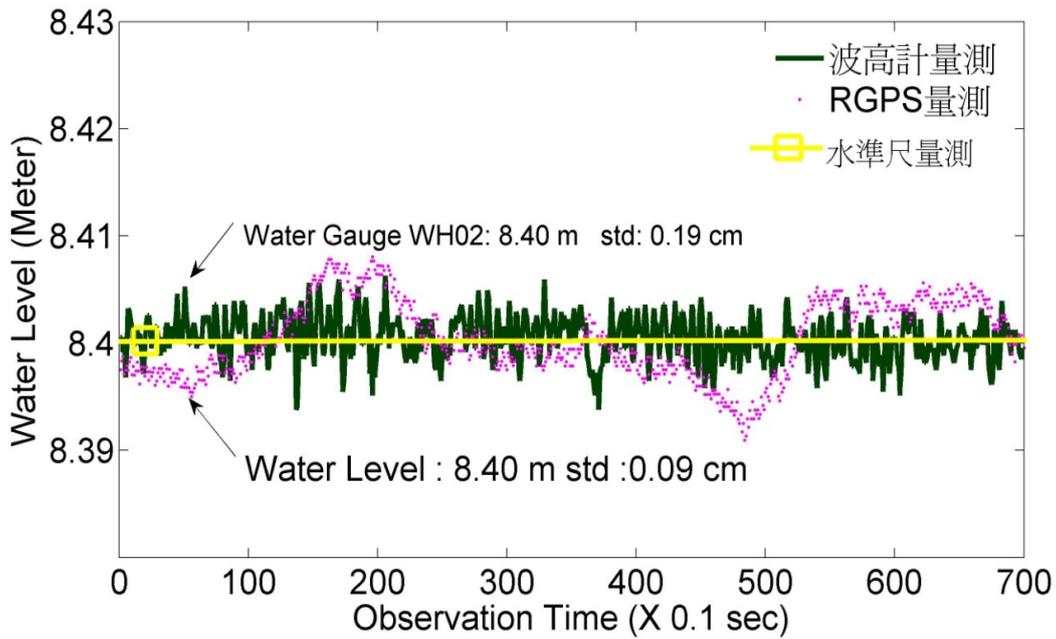


圖 4-12 中型水槽水位下降前，RGPS 水位變化與 HW02 (10 Hz)波高計水位量測值與標準差值比較圖

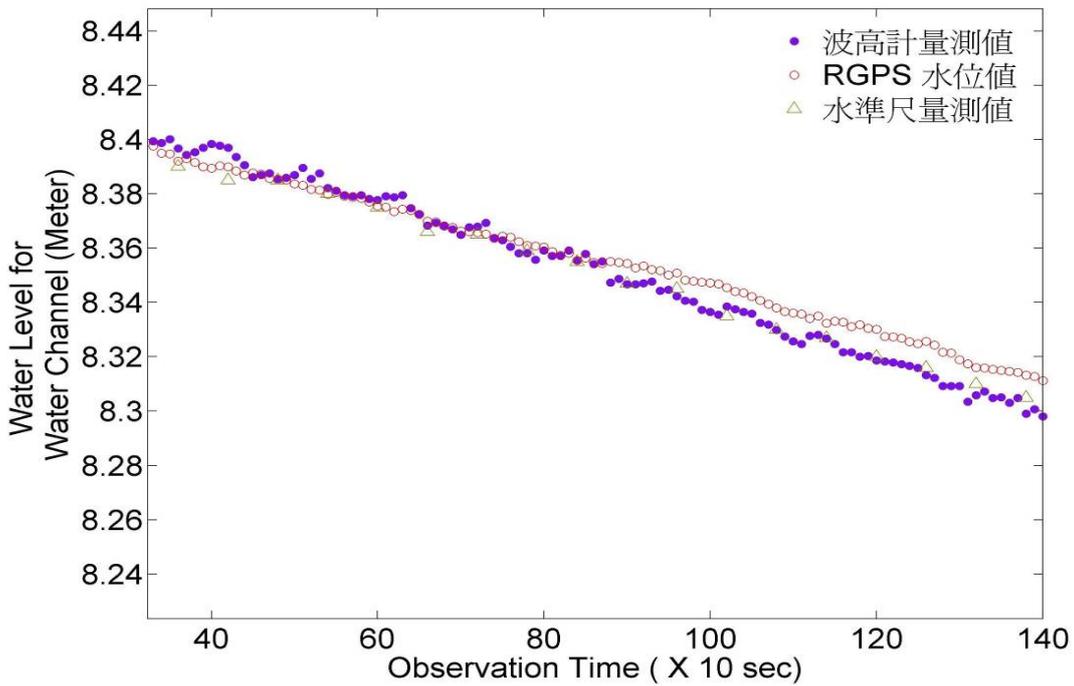


圖 4-13 中型水槽水位開始下降時，RGPS 水位變化、水準尺與 HW01 (0.1 Hz)波高計水位量測值比較圖

如圖 4-14，為中型水槽水位下降 20 公分至停止時，反射點平均高程，與波高計 WH01 變化比較圖，RGPS 之量測水位值與水準尺誤

差維持 0.1~ 1.0 公分、波高計水位量測值與水準尺量測約為誤差 1.8 公分。1 小時實驗之結果 RGPS 之水位高程值、波高計水位量測值與水準尺量測值均下降 30 公分，誤差維持在 0.5 公分內。

由中型斷面水槽實驗之分析得知，其靜水位觀測結果，RGPS 之量測值與水準尺誤差在 1.0 公分，而波高計水位量測值與水準尺量測值之誤差則在 0.5 公分。至於水位持續下降之觀測，RGPS 之量測值、波高計水位量測值與水準尺量測值之趨勢則相當一致。

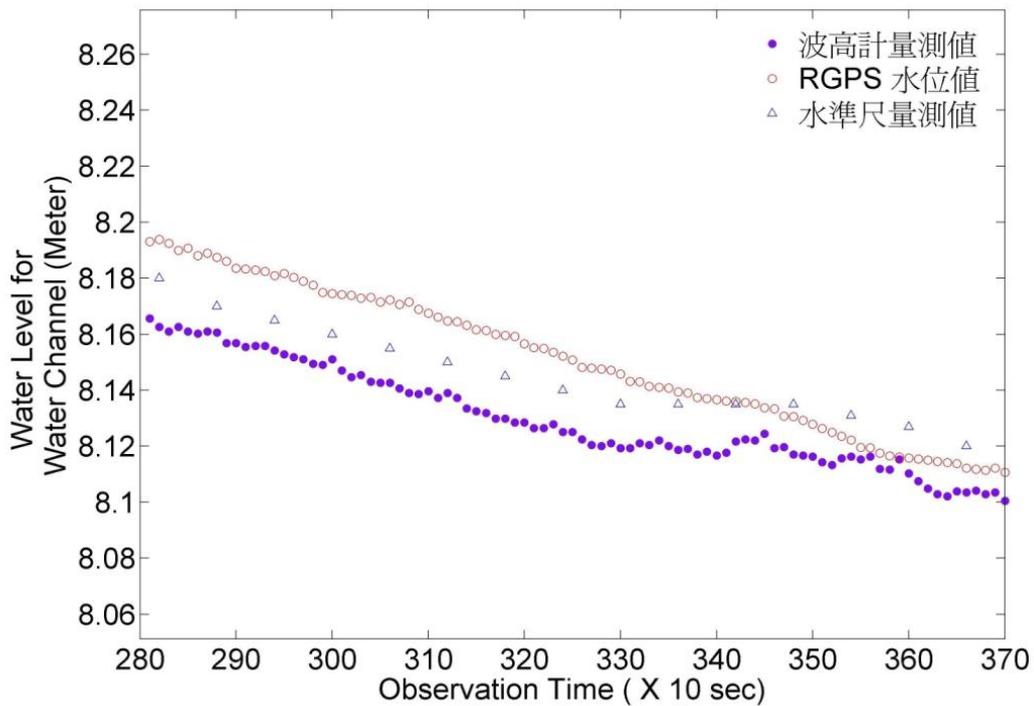


圖 4-14 中型水槽水位下降 20 公分至停止時，RGPS 水位變化、水準尺與 HW01 (0.1 Hz)波高計水位量測值比較圖

圖 4-15 為中型水槽衛星影像與五個反射點分布圖，為以斷面水槽所在位置的坐標作為 LHCP 天線坐標點，以軟體程式模擬，考量天線架設於 2 m 寬水槽上方距水面 100 公分，連續觀測 1.0 小時，推算出五組 GPS 反射點軌跡(PRN 14, PRN16, PRN 20, PRN 26, PRN 32)均在水槽之天線位置正下方水面上，反射點距離天線最遠為 0.7 公尺，最近為 0.25 公尺。

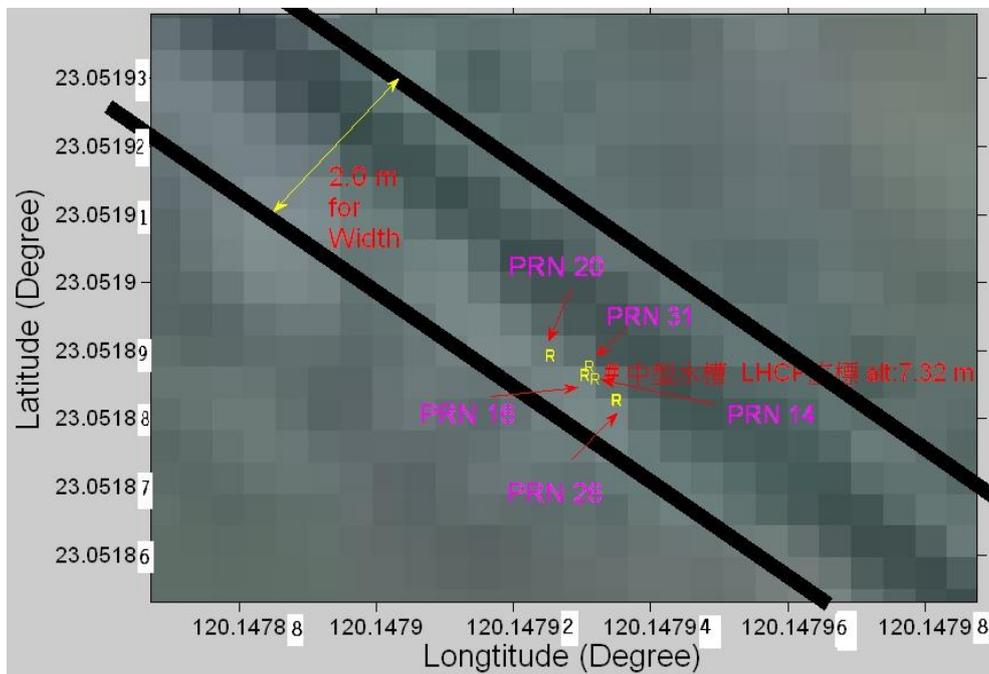


圖 4-15 中型水槽衛星影像與五個反射點分布圖

4.3 安平港港內水位觀測

為探討在實驗室以外海面之水位量測，選擇安平港之港內潮位觀測站附近水域，進行海面水位之觀測，並取安平港潮位站之潮位觀測紀錄資料以及現場水準尺量測值進行比較分析。

4.3.1 試驗配置與儀器架設

架設之 RHCP/LHCP 天線、量瞬間水位之水準尺代替波高計以及潮位站之示意圖，如圖 4-16。

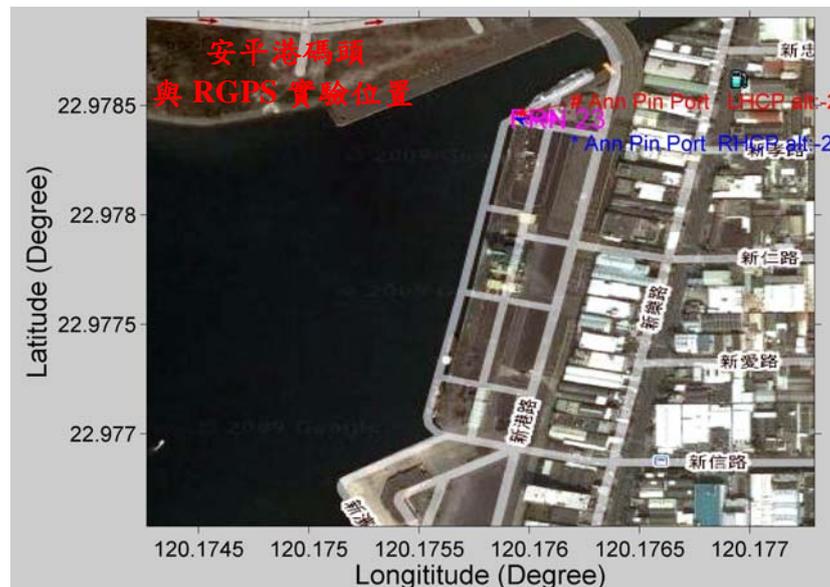


圖 4-16 RHCP/LHCP 天線 RGPS 潮汐實驗、水準尺與安平港潮位站示意圖

- 1.安平港潮位站水位變化為取 8 小時之記錄，潮位計以 2 Hz (0.5 秒)記錄，採 1 分鐘平均水位記錄值提供分析。
- 2.水準尺資料為以人工目視每 15 分鐘讀取一筆水準尺讀數。
3. RGPS 觀測 1.5 小時，在整點時以 10 Hz 記錄觀測資料 4 分鐘、接下來則以 1 Hz 記錄觀測資料 86 分鐘。
- 4.實驗過程共 5 次持續不中斷 1.5 小時實驗，RGPS 需手動調整所鎖定衛星訊號與都卜勒值，約 2~3 小時後 RGPS 會穩定、自動鎖定衛星訊號與都卜勒值。當在 RGPS 觀測量建立命名資訊檔時，會中止下載觀測量 1-5 分鐘。

4.3.2 觀測結果比較分析

如圖 4-17 安平港潮位站水位反射點平均高程、水準尺與潮位站資料變化比較圖，RGPS 之量測水位值與水準尺誤差在 0.5~ 3.0 公分之潮位站資料與水準尺誤差 3~4 公分。6.1 小時實驗之結果 RGPS 之量測水位值、潮位站資料與水準尺均下降 35 公分，誤差在 2.0 公分以內。

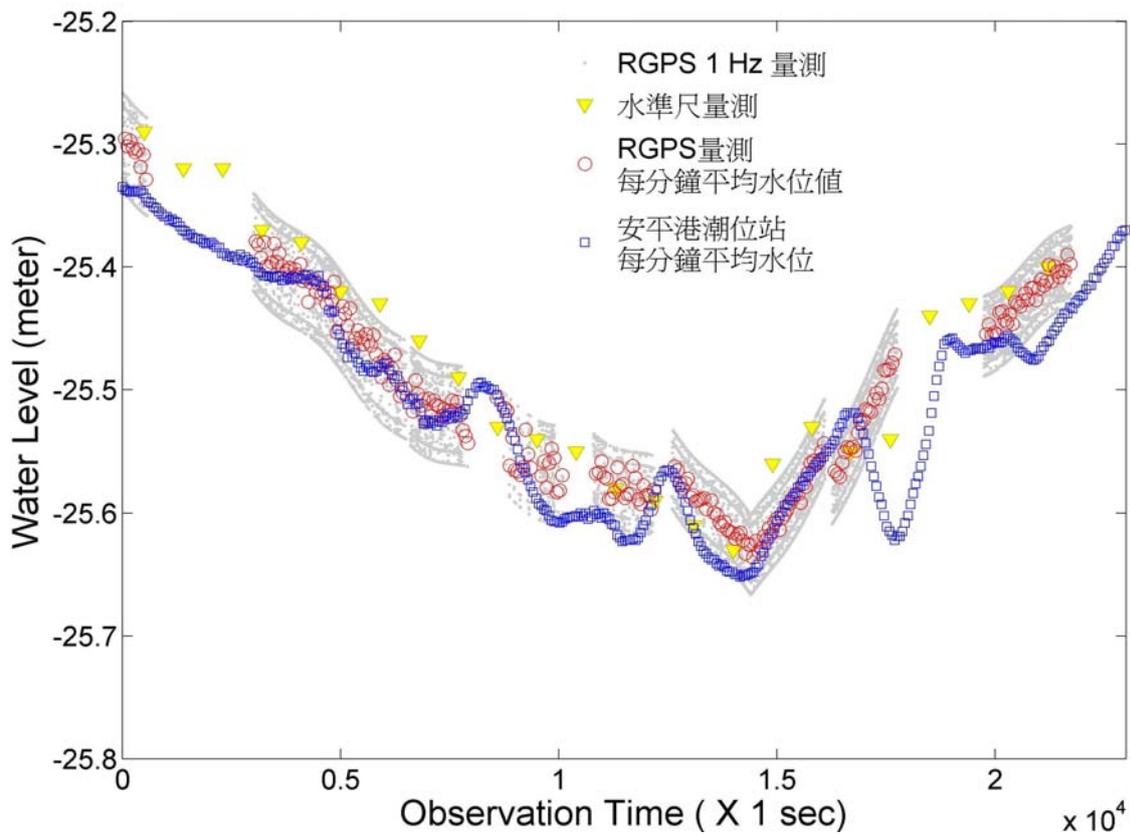


圖 4-17 安平港潮位站水位下降 35 公分時，再回升。RGPS 水位變化、水準尺與(2 Hz)每 1 分鐘潮位儀平均水位記錄比較圖

圖 4-18 為安平港潮位 4000 秒~6000 秒水位變化，反射點平均高程、水準尺與潮位站資料之比較圖，RGPS 之量測水位值與水準尺誤差維持 0.5~1.5 公分，潮位站資料波高計與水準尺誤差 3 公分。在 3 小時試驗之結果 RGPS 之量測 1Hz 水位數據，經過 2 秒平均化數據、再執行每一分鐘 60 組之平均水位值(約 180 筆平均水位數據)、潮位站資料(約 180 筆水位數據)與水準尺(約 15 筆觀測水位數據)均下降 25 公分，與水準尺誤差維持 0.1~2.5 公分，而 RGPS 與潮位站資料(每 1 分鐘)誤差下降至 0.1~1.0 公分。

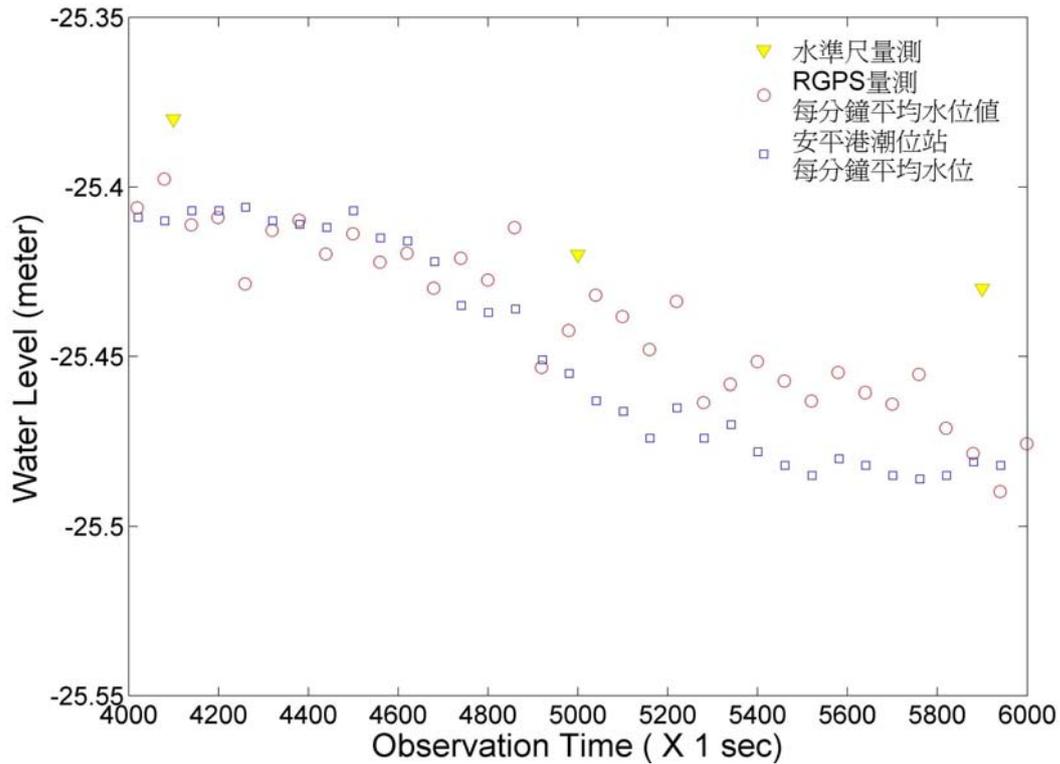


圖 4-18 安平港潮位站水位下降 25 公分時。平均每一分鐘 RGPS、每 15 分鐘水準尺、與平均每 1 分鐘潮位儀之水位變化記錄比較圖

圖 4-19 為安平港潮位觀測時，RGPS 所接收五個反射軌跡圖。RGPS 天線架設於離堤岸 2 公尺距水面 100 公分，所推算出五~八組 GPS 反射點軌跡分別為 (PRN 1, PRN 3, PRN 6, PRN 7, PRN 11, PRN 13, PRN 19, PRN 23) 均在天線位置正下方海水面上，反射點距離天線最遠為 2.5 公尺，最近為 0.25 公尺。

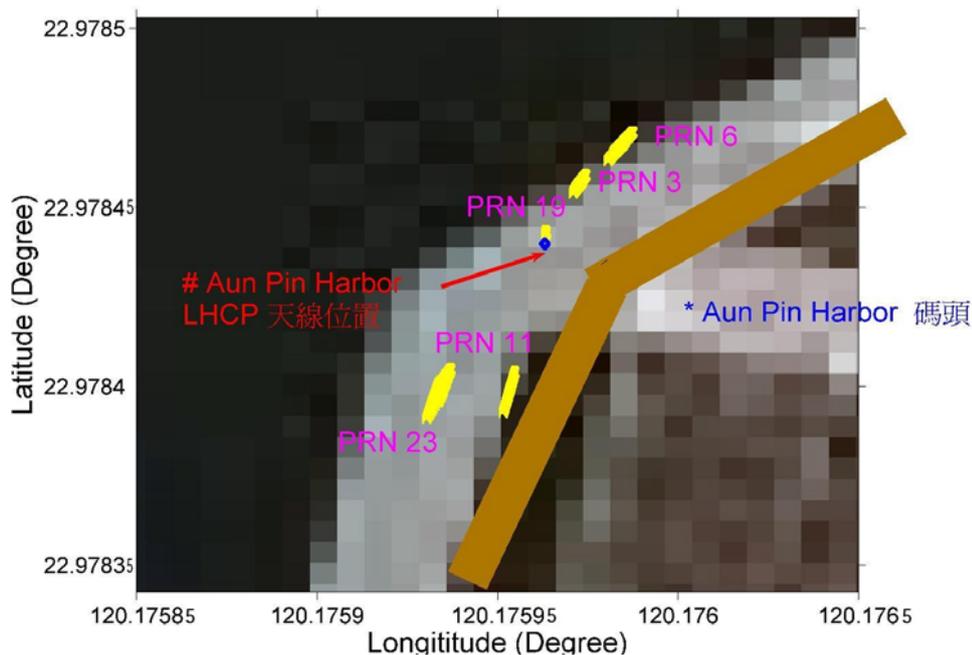


圖 4-19 安平港港口衛星影像與 RGPS 所接收五個反射點分布圖

安平港內潮位站附近海面水位觀測的結論如下：

- (1) 應用 RGPS 進行海面水位長時間觀測，經過平均化之處理後，再與安平港潮汐站記錄值比較，驗證個別反射點水位變化、潮汐特性，精度誤差 1.0~3.0 公分以內。
- (2) RGPS 觀測海面水位，觀測資料有部分中斷現象，為觀測值人工存檔作業限制，但不會造成觀測潮汐之高程精度變差。
- (3) 針對現場海面水位之比較，由於潮位站僅提供每 1 分鐘數據，未來將規劃在港區以波高計數據進行 RGPS 比較，來確認 RGPS 系統之適用性。
- (4) 現場實測之衛星訊號反射點會受到下列因素之影響：儀器架設高度決定監測海面範圍，天線方位角決定衛星數量與反射點位置數量，儀器架設位置決定監測海面之反射區域與範圍。另外，海面粗糙性會降低 RGPS 的反射訊號接收能力。

第五章 結論與建議

本研究應用 GPS 直接訊號和反射訊號 RGPS，經過觀測數據之整合分析獲得波浪水位之量測值。本年度的工作內容包括(1)在成大臺南水工所大型斷面水槽進行波浪量測，(2)在中型斷面水槽進行靜止水面，和持續穩定下降水位觀測，以及(3)在臺南安平港港內進行海面水位觀測。

5.1 結論

- (1)在大型斷面水槽中觀測規則波波高 85cm 週期為 6 秒的波浪。本研究觀測結果若以波形函數修正反射點位置高程，則所得波形與波高計記錄結果比較，可得 85% 吻合度的結果。
- (2)在中型斷面水槽進行靜止水面觀測，以及 1 小時連續下降水位 30 公分觀測，結果與波高計和水準尺之量測作比較，顯示有很好的一致性，偏差在 0.5~1.0 公分。
- (3)在安平港潮位站附近海域進行連續海水面變化觀測，結果也與潮位站資料和水準尺之量測作比較，顯示水位趨勢相當一致，在 25 公分的水位變化中偏差約 1.0~3.0 公分。

5.2 建議

本年度在大型斷面水槽之實驗，由於受到所租用儀器硬體限制，觀測結果偏差較大，但是在後續經提昇軟體輸出設定與硬體操作參數，在中型水槽及安平港之實驗中已獲得改善。在下年度可以繼續進行造波水槽中波浪之觀測。本研究初步利用 GPS 直接訊號和反射訊號 RGPS 進行波浪水位觀測，所得結果在精確度和一致性上均顯示未來應用相當有潛力，下年度將針對各種波浪條件和 RGPS 觀測範圍進行研究。

參考文獻

1. 陳建翰，GPS反射訊號接收處理與測高之研究，國立成功大學地球科學系碩士論文，2006。
2. 陳羿帆，GPS反射訊號應用於海面水位觀測，國立成功大學地球科學系碩士論文，2007。
3. 陳柏帆，GPS反射訊號應用於土壤濕度計算，國立成功大學地球科學系碩士論文，2008。
4. 洪瑞堂，以GPS衛星反射訊號量測濕砂土表面粗糙度初步研究，國立成功大學地球科學系碩士論文，2008。
5. 曾清涼，儲慶美，GPS衛星測量原理與應用，第二版，國立成功大學衛星資訊研究中心，1999。
6. 鄭皓盈，GPS反射訊號之處理，國立成功大學電機工程學系碩士論文，2004。
7. Abidin, H. Z., "Some aspects of on-the-fly ambiguity resolution," Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning", pp.660-669, 1992.
8. Beyerle, G., K. Hocke, J. Wickert, T. Schmidt, and C. Reigber, "A GPS radio occultations with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation in the troposphere and surface reflections," Journal of Geophysical Research, Vol. 107, No. D24, 4802, doi:10.1029/2000JD001402, 2002.
9. Helm, A., U. Wetzel, W. Michajljow, G. Beyerle, C. Reigber, and M. Rothacher, "Natural hazard monitoring with L1 carrier phase delay observations of reflected GPS signals: The 2005 dam failure event of Merzbacher glacier lake," Proceedings of ION GNSS, 2006.
10. Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger and J. Collins, "Global Positioning System: Theory and Practice," 2nd Edition., Springer, 1993.
11. Joosten P., "Integer ambiguity estimation using LAMBDA (basic version) for MATLAB", MATLAB software supply, Mathematical Geodesy and Positioning Delft University of Technology,

- 19-MAY-1999.
12. Katzberg, S.J. and Garrison, J.L., "Utilizing GPS to Determine Ionospheric Delay over the Ocean," NASA Technical Memorandum 4750, December 1996.
 13. Manandhar, D., R. Shibasaki, and H. Torioto, "Prototype software-based receiver for remote sensing using reflected GPS signals," Proceedings of ION GNSS, 2005.
 14. Martin-Neira, M., M. Caparrini, J. Font-Rossello, S. Lannelongue, and C. Serra Vallmitjana, "The PARIS Concept: An experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, January 2001.
 15. Michael, S. G., T. A. Scott and J. K. Stephen, "Terrain Moisture Classification Using GPS Surface-Reflected Signals," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No. 1, January 2007.
 16. Misra, P. and Enge, P., "Global Positioning System, Signals, Measurement, and Performance," Ganga-Jamuna Press, MIT, 2001.
 17. Norman Beck, "Guide to GPS Positioning", Canadian GPS Associates, 1986.
 18. Oleguer, N., C. Estel, G. Josep, and R. Antonio, "A GPS-reflections receiver that computes doppler/delay maps in real time," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 1, January 2007.
 19. Rivas, M. B. and M. Martin-Neira, "Coherent GPS reflections from the sea surface," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 3, No. 1, January 2006.
 20. Shen L.C., C. L. Tsai, J.C. Juang, and C.L. Tseng, "Applications of an Integrated GPS Receiver for Reflected GPS Signals L1/L2 observation Techniques with Remote Sensing Ocean Altimetry and Ground Object Detection," Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE International 4991- 4996, 2007.
 21. Shen, Lie-Chung, Jyh-Ching Juang, "Monitoring flooding water level on Lan-Yang river by using reflected GPS observations during storm weather of typhoon SEPTA 2007/08/18," International symposium on antenna and propagation (ISAP'08), Taipei, Taiwan, 2008.

22. Shen, Lie-Chung, Jyh-Ching Juang, Ching-Lang Tsai, Chia-Chyang Chang, Ping-Ya Ko, and Ching-Liang Tseng, "Stream soil moisture estimated by GPS L1/L2 reflected signals with the ground truth measurements," IEEE Transactions on Instrument and Measurement, Vol 58, No.2, 2009.
23. Teunissen, P. J. G., De Jonge P. J., and Tiberius C. C. J. M., "The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans," Journal of Geodesy, Vol. 71, No.10, pp. 589-602, 1997.
24. William Stallings, (余兆棠, 林瑞源, 繆紹綱譯)無線通訊與網路, 培生教育出版集團, 2002。

附錄 I GPS 訊號結構與定位模式概述

I-1 GPS 系統架構

一個完整的GPS 系統架構包含三個部份(曾等，1999):太空部份(The Space Segment)、控制部份(The Control Segment) 以及使用者部份(The User Segment) (洪，2008)。



圖I-1 GPS 衛星分佈圖

太空部份，太空中飛行的衛星是當然必備的第一要件，而且全球均勻的分佈也是先決之考量，因此將32 顆衛星(3 顆備用)分佈在6 個軌道面上，而且衛星軌道相對地球赤道面的傾角為 55° ，平均在每個軌道面上至少分佈4 顆衛星，每個軌道面上的衛星相差 40° ，衛星高度約20200公里，繞地球一週約11時58分，分佈狀況如圖I-1所(Bagley and Lamons，1992;Green et al.，1989)(曾和儲，1999)。

地面控制部份，整個GPS系統之控制部份包括一個主控站(MCS，Master Control Station)，三個地面天線(GA，Ground Antenna)，及5個監測站 (MS，Monitor Station)，主控站設於科羅拉多斯普林斯(Colorado Springs)，5個監測站分別設置在科羅拉多斯普林斯、夏威夷(Hawaii)、關島(Kwajalein)、阿森松島(Ascension)、和迪戈加西亞(Diego Garcia)，

關島、阿森松島、和迪戈加西亞等三監測站同時也設地面天線，每一個監控站都擁有一部GPS雙頻接收儀、標準原子鐘、氣象感測器及資料處理器，且位置坐標是經長期監測所得之精密坐標，每天24小時連續追蹤觀測每一顆衛星，將總觀測所得資料，如電離層、對流層、氣象、衛星時鐘差、衛星軌道偏差等資料匯整並計算各改正量，將所得改正係數彙集成導航檔，傳送各監測站及衛星，衛星將可傳送更新的資料給使用者。

使用者部份，指的是凡可以接收、處理GPS衛星訊號之接收儀而言，一般分為接收天線、接收儀和電源等硬體部份和支援處理硬體所接收的訊號的軟體部份，其基本結構除了可以接收衛星訊號之外，還能夠產生與所測衛星測距碼完全相同的複製碼(稱為有碼接收儀)，與利用載波訊號的平方技術去掉調制碼而得到載波相位測量所需之載波訊號(稱為平方型接收儀)兩種接收模式。

I-2 GPS 訊號結構

GPS衛星訊號的基本架構如圖2-2所示，以10.23MHz之震盪頻率為基頻(Fundamental Frequency)作相關的運算與調變(Modulation)，來達到最精簡的通訊目的，其載波(Carrier)分為L₁_Band與L₂_Band，L₁頻道頻率為 $2 \times 77 \times$ 基頻(10.23 MHz)，為1575.42 MHz(波長=19.05 cm)，L₂頻道頻率為 $2 \times 60 \times$ 基頻(10.23 MHz)，為1227.60 MHz(波長=24.45 cm)，設計第二頻道L₂的原因是為了要讓訊號通過電離層(Earth's Ionosphere)時有一個自我校正之第二頻道作依據，因此L₁與L₂頻率的設計是本來是為了要校正電離層所造成的延遲，後來被廣泛的應用在定位方面(洪，2008)。

在訊號調變方面，L₁頻道調制了C/A碼(Coarse Acquisition Code)、P碼(Precision Code)、導航訊息(Navigation Message)，L₂頻道調制了P碼和導航訊息，其數學表示式為:(Norman Beck，1986)

$$L_1(t) = a_1 P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 t) + a_1 C/A(t) D(t) \sin(2\pi f_1 t) \quad (I-1)$$

$$L_2(t) = a_2 P(t) D(t) \cos(2\pi f_2 t) \quad (\text{Hofmann - Wellenhof B., et al. 1993}) \quad (I-2)$$

其中

$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$. (基頻)。

$f_1 = 154 \times f_0$: 為 L_1 頻道載波頻率。

$f_2 = 120 \times f_0$: 為 L_2 頻道載波頻率。

$a_1 \cos(2\pi f_1 t)$: 為 L_1 頻道載波。

$a_2 \cos(2\pi f_2 t)$: 為 L_2 頻道載波。

$P(t)$: 為 P 序列碼，頻率為基頻 = 10.23 MHz。

$D(t)$: 為導航訊息，頻率為 (基頻 / 204600) = 50 Hz。

$C/A(t)$: 為 C/A 序列碼，頻率為 (基頻 / 10) = 1.023 MHz。

t : 為時間 (sec)。

當這些訊號都完成之後，在訊號傳送出去之前再以展頻的技術做一次展頻 (Spread Spectrum) 調變以確保訊號的機密性與抗干擾。

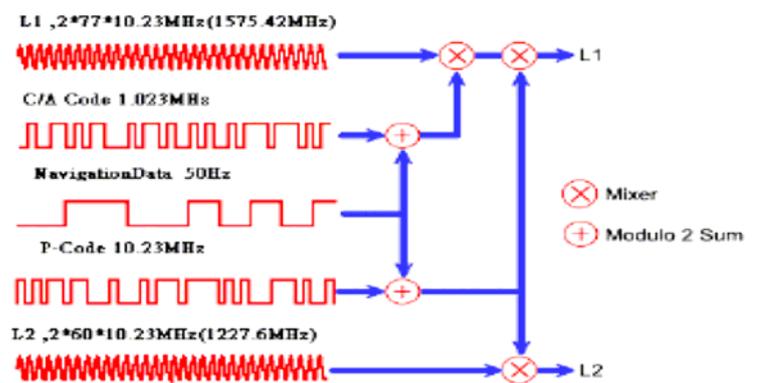


圖 I-2 GPS 衛星訊號基本架構 (洪，2008)

I-3 GPS 訊號編碼

PRN 電碼

虛擬隨機噪音碼(PRN, Pseudorandom Noise Code)是一組循一定程序去產生週期 $m=2^n-1$ 的噪音碼，由 0 與 1 所組成的二元數列來表示，它不僅具有高斯噪聲所有的良好自相關特性，而且具有某種確定的編碼規則，可以容易複製。而每個衛星發出自己唯一的(PRN)電碼，因此接收儀能夠分辨出訊號來自那顆衛星，這在同時追蹤好幾顆衛星顯得特別重要(洪，2008)。

C/A碼

C/A碼是由m序列優選對組合碼形成的G碼(Gold code)，G碼是由兩個長度相同而且互相關極大值最小的m序列碼逐位進行模2相加構成的，也就是結合兩個10位元的反饋移位暫存器(Tapped Feedback Shift Registers)，兩個移位暫存器於每星期六午夜12時(星期日早上零時)同時歸“壹”(暫存器全部設定於1狀態，重新計時)，在碼頻率1.023MHz驅動下，兩個移位暫存器分別產生碼長為 $N=2^{10}-1=1023$ ，週期為1ms的兩個m序列 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 。 $G_2(t)$ 序列經過相位選擇器(Phase Selector)，輸入一個與 $G_2(t)$ 平移等價的m序列，平移後相加即得到C/A碼。即C/A碼頻率1.023MHz，每1ms傳送1023個位元，每秒重複1000次，每個碼元長度(Chip Length)為293m，序列循環一次為300km。從這些G(t)碼中選32個碼以PRN1~PRN32命名為各種衛星名稱，因為C/A碼長很短，一秒內可搜索1000次，所以C/A碼除了作為粗測碼外，還作為GPS衛星信號C/A碼的補碼供民間進行虛擬距離導航定位應用。再藉由導航電文中的“傳遞語句(HOW)”及“Z計數(Z counter)”而捕獲P碼，由此可以獲得P碼，進行軍事用途的虛擬距離精密定位。

P碼

P碼(Precise)碼頻率為10.23MHz是衛星的精測碼，。它是由兩個虛擬隨機碼 $PN_1(t)$ 和 $PN_2(t)$ 的乘積構成的碼，如圖I-3。

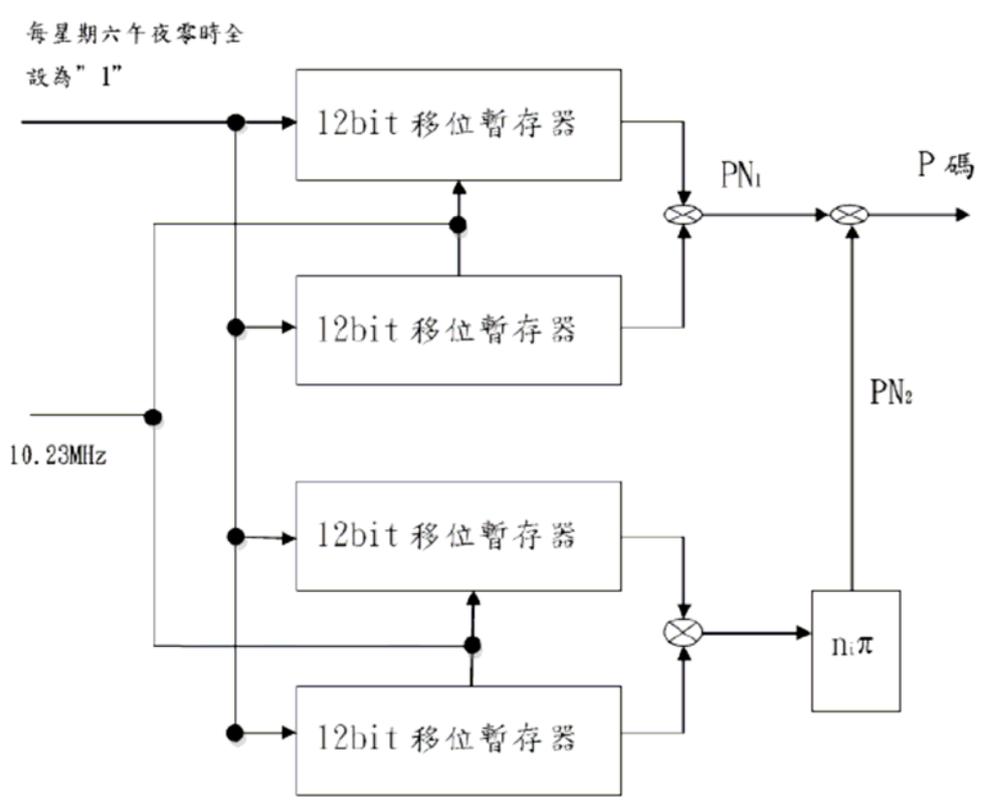


圖 I-3 P碼產生器(洪，2008)

$PN_1(t)$ 是由兩級12位元移位暫存器構成的。兩個移位暫存器分別採用反饋點八進制編碼14501和17147形成週期為1.5秒的m序列 $PN_1(t)$ 。

一週期的碼位數為：

$$N_1 = 10.23 \times 10^6 \times 1.5 = 15.345 \times 10^6 \text{ 位元}$$

PN₂(t)是由另兩級 12 位元移位暫存器所構成的。兩個移位暫存器分別採用反饋點八進制編碼 17673 和 11435 形成兩個 m 序列。碼頻率與 PN₁(t) 相同，但碼位比其多 37 個碼元，即碼長為：

$$N_2 = 15.345 \times 10^6 + 37。$$

因此 P 碼為： $P(t) = PN_1(t) \times PN_2(t+n_i\tau)$ ， $0 \leq n_i \leq 36$ 。

其相應的碼元數為： $N = N_1 \times N_2 = 2.35 \times 10^{14}$

相應的週期為： $T_p = N/f_p \approx 266$ 天 ≈ 38 星期。

在乘積 P(t) 中， n_i 可取 0, 1, 2, ..., 36。這樣可得到 37 種 P 碼。在實際應用中，P 碼採用 7 天的週期，即在 $PN_1(t) \times PN_2(t+n_i\tau)$ 中截取一段週期為 7 天的 P 碼，並規定每星期六午夜 12 點使 P 碼置全“1”狀態作為起始點。在這 37 個 P 碼中，32 個供 GPS 衛星使用，5 個供地面站使用，以確保 GPS 正常工作。

因為 P 碼的碼長為 6.19×10^{12} bit(7 天週期)，所以採用 C/A 碼的搜索方式是無法實現的。故一般都是先捕獲 C/A 碼，然後根據導航訊息提供的有關信息來獲得 P 碼。由於 P 碼的碼元寬度為 $0.098\mu s$ ，相當於距離 29.3m，所以，若碼元對齊誤差仍採用碼元寬的 1/10 ~ 1/100 時，則測距誤差約為 2.93 ~ 0.293m，為 C/A 碼的 1/10(曾清涼等，1999)。

GPS 導航訊息

所謂導航訊息(Navigation Message)，就是包含了有關衛星的星曆、衛星工作狀態、時間系統、衛星時鐘運行狀態、軌道攝動改正、大氣折射改正以及 C/A 碼轉換到獲得 P 碼等訊息。這些數據是以二進制碼的形式每秒 50 個位元傳播給用戶，故導航訊息又稱為數據碼或稱為 D 碼，一個完整的導航訊息接收需要 12.5 分鐘。

I-4 GPS 訊號調變

在GPS衛星通訊中設計者給了一個最簡便的調變(Modulation)模式(圖I-4)，BPSK (BPSK, Binary Phase Shift Keying)及直序展頻DSSS (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum)技術來解決衛星通訊的問題，DSSS是BPSK的延伸(DSSS=BPSK+CDMA)，在DSSS展頻技術中，依然是遵守著CDMA的原則，每一衛星擁有自己唯一的編碼(Gold碼，Pseudo Random Noise Code, PRN Code)，所以每一衛星送出的頻率雖然相同，但是在接收解碼調變(CDMA Demodulation)時預加入各自的衛星碼(PRN Code)才可以解出各自衛星的資料，也就是說我們的接收器內如果有所有衛星的PRN Code，就可以接收並解出所有衛星所發出的資料，例如每個衛星P碼和C/A碼都是各個衛星唯一的碼用以突顯每個衛星的的不同，同時也是解展頻訊號(CDMA)的唯一碼(展頻碼)，所以接收儀收到的訊號來自許多衛星，但由於每個衛星發出的P碼和C/A碼是永不相同的，因此接收時就可清楚的分辨各衛星的訊號(William Stallings, 2002)。

如圖I-4所示，是一基本展頻數位通訊系統一般模型，訊號經編碼後與擬雜訊產生器產生的展頻碼以編碼的方式調制在一起，即所謂的CDMA(CDMA, Code Division Multiple Access)，這種調變的好處先前以提過，除了保密的功能之外，設計衛星使用這種調變最大的功能是，它可以很簡單的解決無線資料通訊在同步(Symmetric)上的難題，因為一般兩部儀器要達到溝通、通訊的功能時，首先必預調整兩邊的不同步，資料傳送時有開始標籤、結束標籤，兩者同步時資料傳送才不會出錯，這在通訊設計上是較為困難且複雜的部份，而且也是整個通訊系統設計中較為昂貴的部份，GPS衛星在兩萬多公里遠的那端，要跟接收儀這端取得同步，是一件不容易實現的夢想，因此運用CDMA的技術是最佳的選擇，將取得之訊號解碼從新得到一組與同步非相關的資料進行解讀而得到訊息(洪，2008)。

BPSK調變被用在GPS衛星通訊上面，也是因為BPSK調變方法精簡方便，圖I-5為BPSK調變波型，其簡化數學表示式如下：

BPSK: $S_d(t) = A \times d(t) \times \cos(2\pi fct)$ 將上式乘一序列 $c(t)$ ，得到一

$$\text{DSSS 訊號: } s(t) = A \times d(t) \times c(t) \times \cos(2\pi f_c t) \quad (\text{I-3})$$

圖I-6為BPSK解調變波型，這個訊號在空氣中傳播，當接收器接收到此訊號，將收到的訊號再乘相同的 $c(t)$ ，此訊號就可以被還原，是一種相當簡單且廣泛被使用的調變、解調變技術。

$$s(t) \times c(t) = A \times d(t) \times c(t) \times c(t) \times \cos(2\pi f_c t) = Sd(t) \quad (\text{I-4})$$

式中：

$d(t)$: 訊號源(資料源)。

A : 訊號振幅。

f_c : 載波頻率。

$c(t)$: Gold 碼。

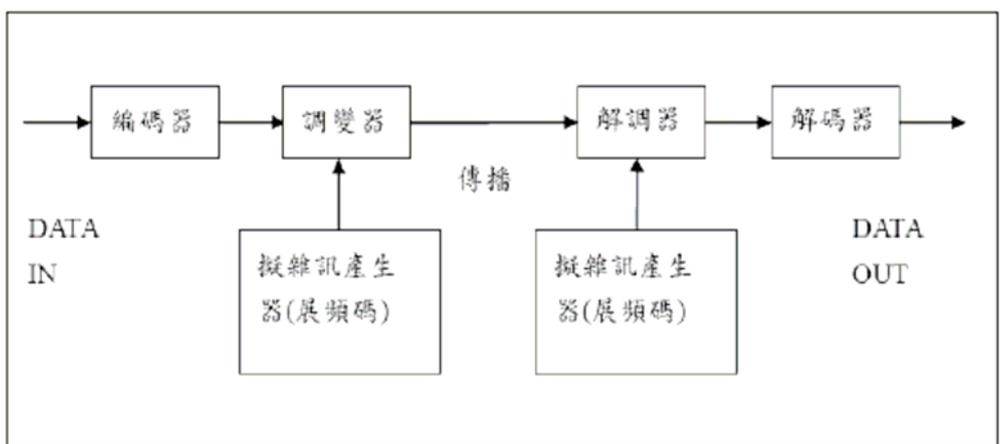


圖 I-4 展頻數位通訊系統一般模型(洪，2008)

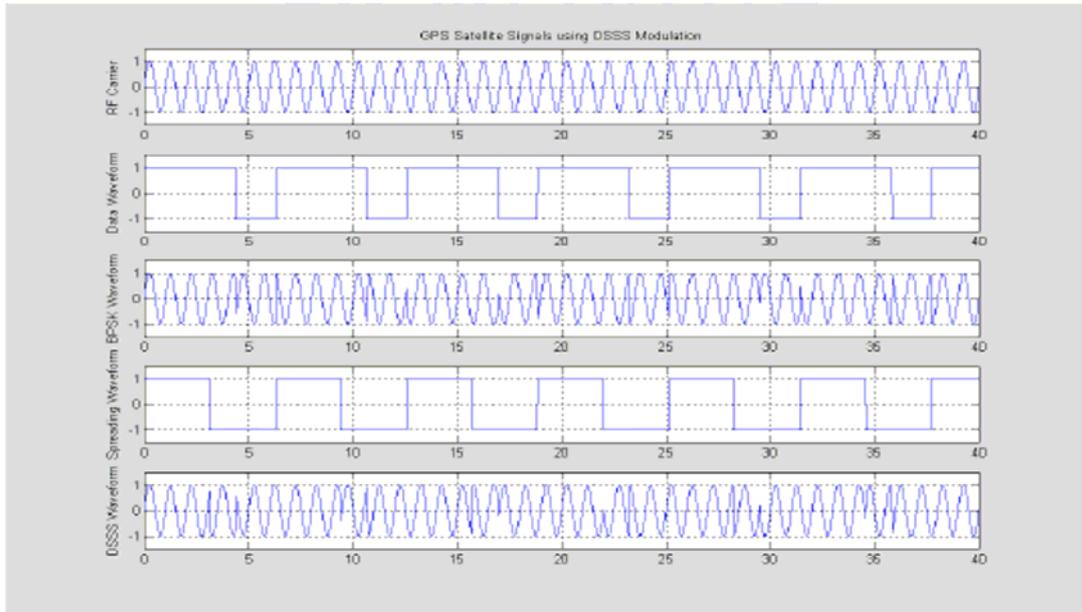


圖 I-5 BPSK 調變波型(洪，2008)

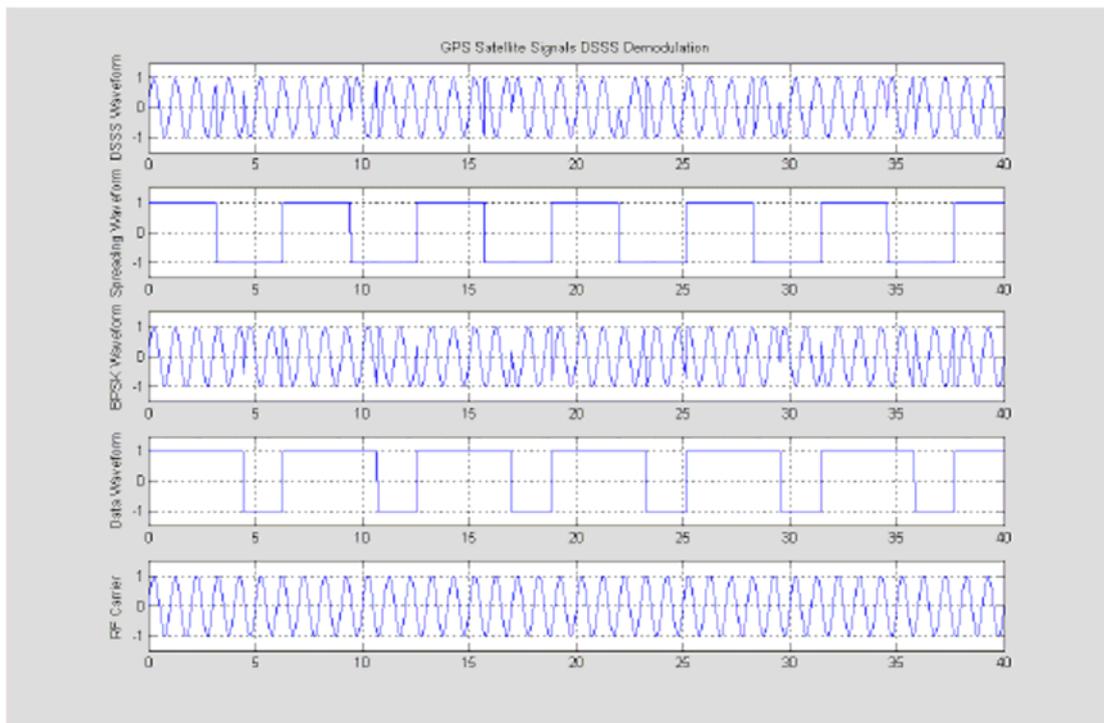


圖 I-6 BPSK 解調變波型(洪，2008)

I-5 GPS 訊雜比(SNR)與能量

在通訊系統中 (Communication Systems) 不管有線或是無線 (Wireless)，傳輸率始終是討論的重點之一，傳輸率高，單位時間內傳輸的容量(資料)有就大，然而，傳輸速率愈高則傳輸中的資料受雜訊影響的程度就愈嚴重，給一個特定的雜訊準位(Level)，我們可預期的訊號在雜訊環境中能提高接收資料的正確性，其中我們考量一個關鍵的參數稱為「訊雜比」(Signal-to-Noise Ratio, SNR or S/N)，訊雜比的定義是指在傳輸訊號中加入一隨機的雜訊，此時傳輸訊號功率與雜訊功率的比值稱之(洪，2008)。通常在接收機端才考量訊雜比，因為接收機在處理訊號的時後才會企圖消除不要的雜訊，但是在此所謂的訊雜，指的是為了要與傳播訊號的衰減作比較的一個參考訊號而言，而非外界加諸於傳播訊號雜訊，訊雜比通常以分貝(Decible)表示：

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \times \log_{10} (\text{訊號功率} / \text{雜訊功率}) \quad (\text{I-5})$$

訊雜比表示訊號超出雜訊的量，單位為分貝，一個高的訊雜比即表示高品質的訊號的傳遞，因而可以減少數位傳輸系統的中繼器之數量，訊雜比在數位資料傳輸上是非常重要的，因為它設定了可實現的資料傳輸速率之上限。此上限說明於沈農(數學家 Claude Shannon)所提出的最大通道容量模式：

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR})$$

其中 C 是通道容量(Channel Capacity，單位為位元/秒)，B 是通道頻寬(Bandwidth，單位為 Hz)。沈農(數學家 Claude Shannon)定理說明通道容量可實現的最大理論值。實際上，可達到的比理論值低很多，這是因為推導這定理只考量白色雜訊(熱雜訊)的情況，脈衝雜訊、衰減失真或者延遲失真都未考慮，在本實驗中藉由訊雜比的比值可視為是訊號能量之比，利用所接收到的每一筆資料的紀錄，分析反射的訊號能量與直接訊號的能量之間的關係，在此 SNR 是一項重要的參數之一 (Stallings, 2002)。

I-6 GPS 衛星定位模式

GPS 衛星定位所採取的方式是以空間距離後方交會的方式(如圖 I-7)，由 GPS 衛星 S1、S2、S3 已知的衛星坐標(三顆以上)，用空間後方交會法計算出接收儀(i)之坐標，如果相對之間(衛星與接收儀)的距離可以算得越精確，對定位的精度就會提高(洪，2008)。

在理想狀態在沒有誤差的情況之下：

$$\rho_i^1 = ((x_{s1}-x_i)^2 + (y_{s1}-y_i)^2 + (z_{s1}-z_i)^2)^{1/2} \quad (I-6)$$

$$\rho_i^2 = ((x_{s2}-x_i)^2 + (y_{s2}-y_i)^2 + (z_{s2}-z_i)^2)^{1/2} \quad (I-7)$$

$$\rho_i^3 = ((x_{s3}-x_i)^2 + (y_{s3}-y_i)^2 + (z_{s3}-z_i)^2)^{1/2} \quad (I-8)$$

三個聯立方式可解三個未知數： (x_i, y_i, z_i) 此即用戶端接收儀(i)單點定位之坐標，在實際上因為有許多的系統誤差的存在，因此真正解算時還要將系統誤差考慮進去。通常會將接收儀的時鐘當成未知數，加入方程式中求解，這時候就得多觀測一顆 GPS 衛星。因此導航定位都要求至少要觀測四顆 GPS 衛星。

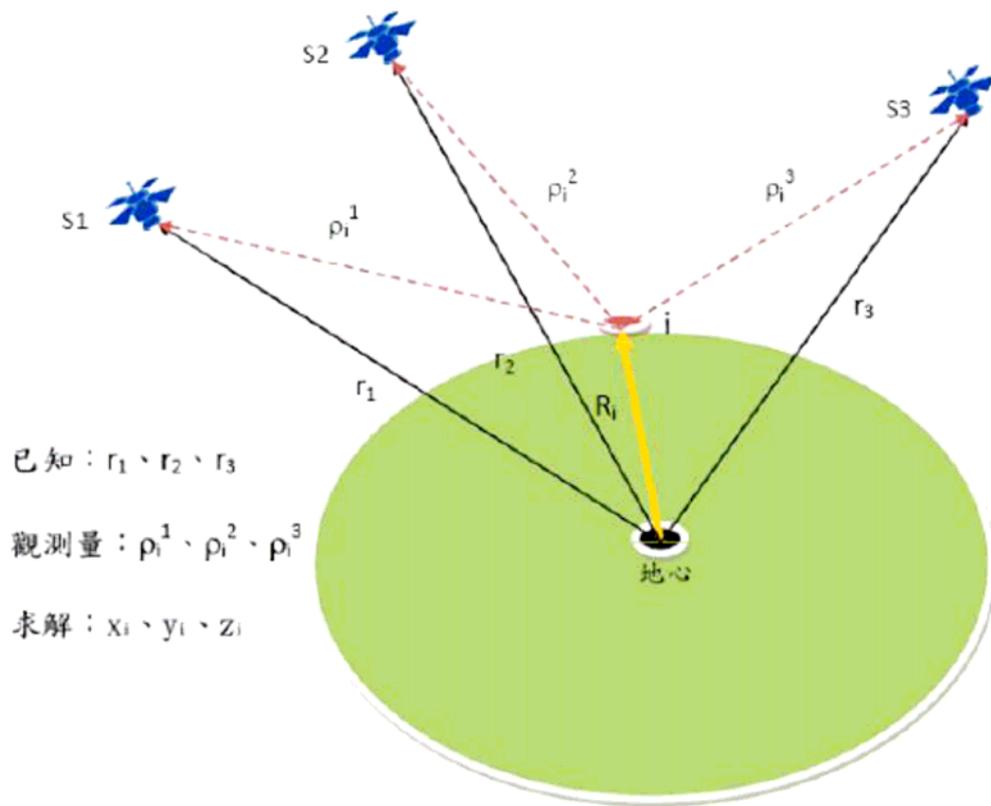


圖 I-7 GPS 衛星定位空間後方交會法(洪，2008)

觀測量 ρ 可為 C/A 碼的虛擬距離觀測量，也可為軍用 P 碼的虛擬距離觀測量，這種定位為即時性，精度達到 m 級或 10m 等級。若為載波(L1 或 L2 頻率)之相位觀測量，其相位定位的精度就可高達 1ppm 以上，或者稱為 cm 等級之定位，但得具備雙站同時觀測。

傳統的 GPS 衛星定位，均為接收 GPS 直接訊號而將反射訊號視同雜訊。已用於各種高精度之定位，其定位精度可達公分，甚至公厘等級。近幾年來，GPS 應用於科學研究諸如電離層、對流層等大氣科學的研究已獲得具體成效，但對於被捨棄的反射訊號，也開始被學術界重視，對於水體表面反射的應用已獲得 10cm 精度的水面高程是測結果(陳，2005 和陳，2006)。由於 GPS 反射訊號具有極佳的機動性，且可以提供大範圍、高頻率、近即時性、長期觀測、低成本的量測資訊，故整合 GPS 直接訊號並分析 GPS 的反射訊號 (Reflected GPS signal, RGPS)，用以測定水面高程資訊的技術逐漸受到重視。

附錄 II GPS 試驗儀器設備功能

II-1 GPS 試驗儀器設備功能

(1) 右旋天線(RHCP, Right Hand Circular Polarization)：

(a) 天線型號： SK-600 ,NovAtel-700, H-601 (RHCP)

(b) 3dB 有效頻寬：L1：1575 ± 8 MHz

L2：1228 ± 10 MHz

(c)載波頻段範圍限制：fc ± 30 MHz25 (min)

fc ± 50 MHz30 (min)

fc ± 100 MHz50 (min)



RHCP 天線

(d)天線仰角 Q 之增益限制：Q =90° 為 7.5 dBic (L1)及 6.5 dBic (L2)

20°<Q <90° 為-1.5 dBic (L1)及-1.5 dBic (L2)

5°<Q <20° 為-5.5 dBic (L1)及-3.5dBic (L2)

0°<Q < 5° 為-7.0 dBic (L1)及-5.0 dBic (L2)

(e) 天線低雜訊增益放大值：26 ± 3 dB (L1) 及 26 ± 3 dB (L2)

(f) 天線雜訊減低值：< 1.5 dB

(g) L1-L2 載波相位延遲值：1.5 nsec

(h) 環境限制：

高度為 3000 m

溫度為-55°~85° C

(2) 左旋天線(LHCP, Left Hand

Circular Polarization):



LHCP 天線

- (a) 天線型號：H-601 (LHCP)
- (b) 3dB 有效頻寬：L1：1575 ± 15 MHz
(L2 經實驗觀測證實也有接收到
反射訊號，提供如 RHCP 雙頻天線
穩定觀測量品質，成效很好。)
- (c) 載波頻段範圍限制：NA
- (d) 天線仰角 Q 之增益限制：Q = 90° 為 9.0 dBic (L1)
30° < Q < 90° 為 -1.5 dBic (L1)
- (e) 天線低雜訊增益放大值：21 ± 3 dB (L1)
- (f) 環境限制：
高度：3000 m
溫度：-55°~85° C

(3) 大地測量型雙頻接收儀

(L1/L2 雙頻 GPS 接收儀):

- (a) 型號：SOKKIA-2600, DL-4 plus,
FlexPak-G2L, OEM4-G2
- (b) 機版：OEM4-G2
- (c) GPS 訊號追蹤：L1 C/A 碼、L1 相位量與
L2 相位量、P(Y)碼



GPS 雙頻接收儀

(但未解碼)

(d) 單位定位精度：L1 C/A 碼為 1.5 公尺

L1 相位量為 0.45 公尺

L1/L2 相位量為 20 公分差分修正

(e) 動態定位為 2 公分

(f) 接收儀靜態觀測定位為 1 公分+1 PPM 物理尺寸：185 x 154 x

71 mm 內

部(機版：85 x 125 x 17 mm)

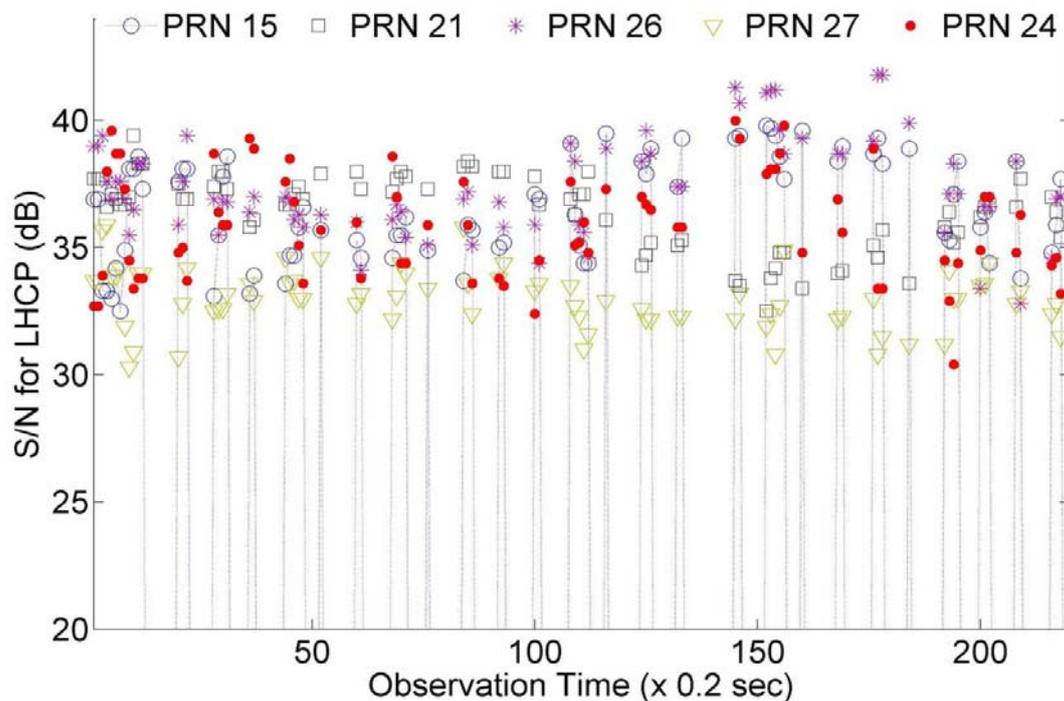
(g) 接收儀重量：1.2 kg (機版：80 g)

附錄 III LHCP 反射訊號在五衛星

觀測量訊號強度變化比較圖

經過研究對於反射點受到 5 顆衛星是否完整被同時觀測與下載，如圖 39 在五衛星觀測量訊號強度變化條件，對於波高之精確計算影響甚大，進一步過濾訊號，僅保留 5 顆衛星觀測量與調整 RGPS 模式中，進行對 LHCP 之反射訊號觀測量之座標，再次修正 Least Square (低角度 PRN 21 衛星降低影響因子 5%) 收斂殘差值，修正之後反射位置與波形模式計算座標分析結果與波高計，波形模式比較。

經過研究對於反射點受到 5 顆衛星完整被同時觀測與下載，對於水位之精確計算影響甚大，進一步過濾訊號，僅保留 5 顆衛星觀測量與調整 RGPS 模式中，對 LHCP 之反射訊號觀測量之座標，Least Square 迭代修正收斂殘差值，可提升反射位置高程精度，LHCP 反射訊號觀測量均可維持 95% 達到 5 顆衛星 (PRN 14, PRN 16, PRN 20, PRN 26, PRN 32)。將 10 Hz 與 0.1 Hz 之 RGPS 高度值與波高計量水值，使各反射點高程值有 99% 之精確度，誤差值在 1 公分以內。



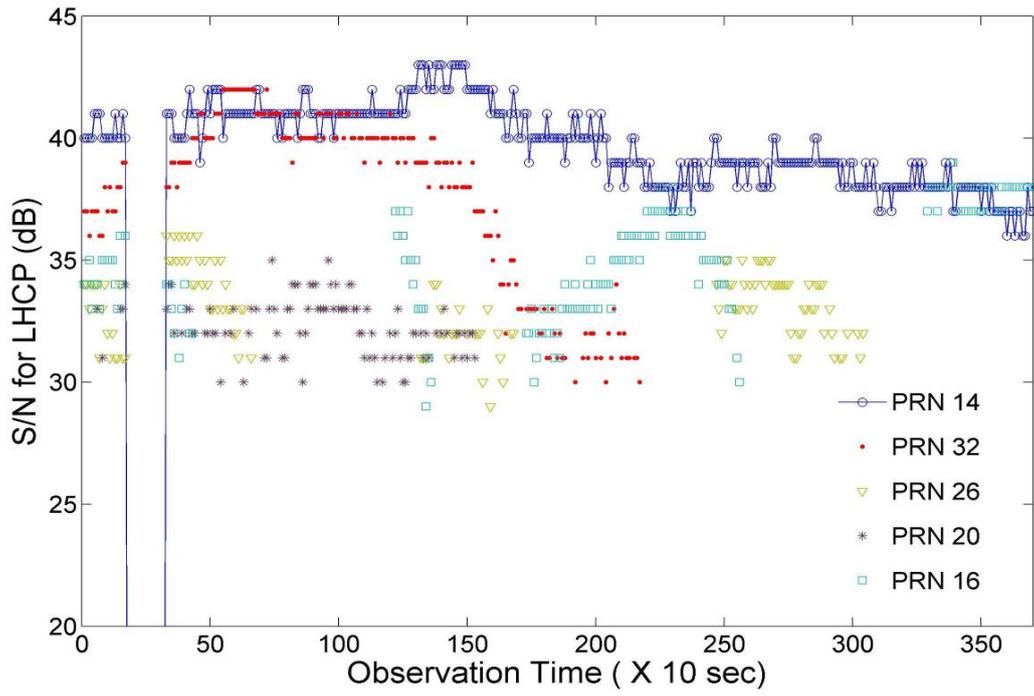


圖 III-1 LHCPC 反射訊號在五衛星觀測量訊號強度變化比較圖

附錄 IV RGPS 試驗限制與現場量測考量說明

- (1) 人為因素：人為操作因素熟練可提早達到 5 顆衛星以上鎖定與 RGPS 衛星定位，量測精度才能維持在 2 公分內。
- (2) 硬體因素：RGPS 硬體如天線之接收靈敏度 Gain 值、CPU 速度、RS232 下載速率會直接影響下載觀測量、間接影響量測精度，當下載觀測量中斷或少 L 2 相位觀測量，直接影響量測精度下降至 20~40 公分。
- (3) 量測精度因素：可有效接收衛星數有直接關係，以 RGPS 技術；在衛星訊號接收不全時，3 顆衛星可使量測精度提昇至 20 公分，4 顆衛星可使量測精度 5 公分，5 顆衛星可使量測精度 2 公分。
- (4) 現場實測因素：衛星訊號反射點受下列因素影響：儀器架設高度決定監測海面範圍，天線方位角決定衛星數量與反射位置數量，儀器架設位置決定監測海面之反射位置。海面粗糙性會降低 RGPS 的接收能力。
- (5) 場地勘選因素：選定實際海面的量測與模擬 24 小時監測海面範圍，雖然不同衛星之反射點不同，但每一軌道有 4 顆衛星運行，衛星形成每 3 小時多重疊代 Overlap 觀測資料(同一海面位置每日有 8 次約 1.4~1.6 小時觀測資料)。如圖安平港燈塔模擬 RGPS 監測海面範圍。
- (6) 量測波浪限制：當粗糙性大於 1.0 時(約浪高 9 公尺)會使訊號強度雜訊比值(CNo) 下降 5-10 dB，當衛星 CNo 小於 22 dB 或低角度(衛星仰角 $\leq 15^\circ$)，RGPS 會無法連續接收到。
- (7) 天線測點的角度從 $5^\circ \sim 90^\circ$ 、依天線架設高度(距離水面 30 公分~250 公尺)反射點距離從 10 公分~4.5 公里。主要限制為天線架設高度與地形遮閉限制，架設於海上，無地形遮閉限制，但架設高度，無陸地提供置高點，反射點距離最大約 2.5 公里。如圖安平港外海模擬 RGPS 監測海面範圍。

(8) 量測點的大小，依量測點至天線之幾何所決定，本實驗因天線距水面最大為 2 公尺，量測點最大橢圓長半徑 30 公分、短半徑 20 公分，最小橢圓長半徑 20 公分、短半徑 15 公分，如圖大型斷面水槽模擬 RGPS 反射點測量點大小範圍。

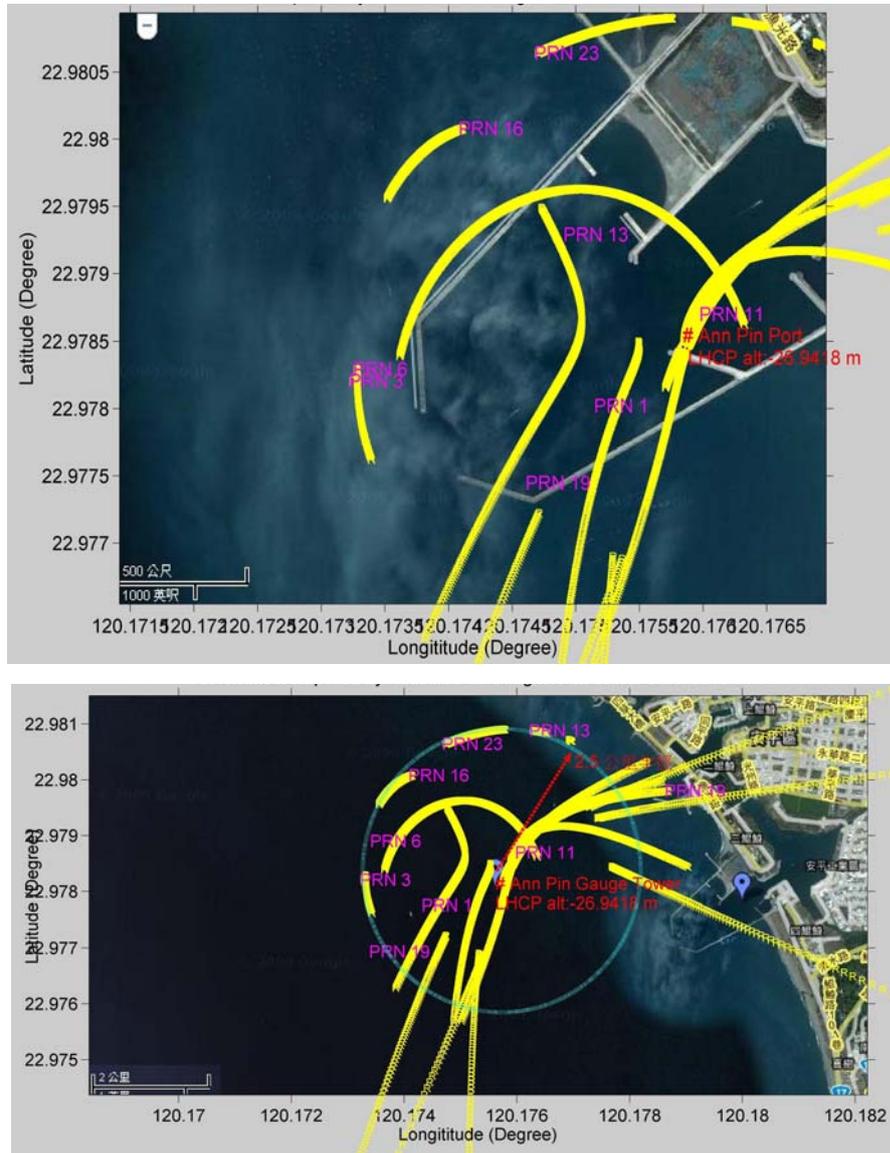


圖 IV-1 安平港燈塔與外海模擬 RGPS 監測海面範圍圖

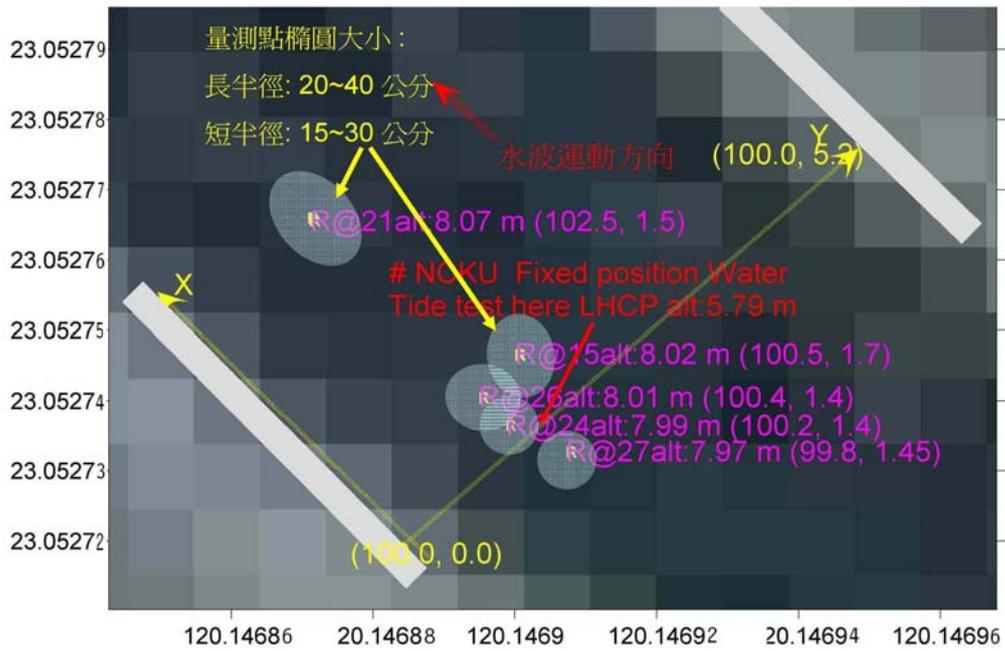


圖 IV-2 大型斷面水槽模擬 RGPS 反射點測量點大小範圍圖

附錄 V 期中期末報告審查意見處理情形表

■期中□期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：應用 GPS 反射信號建立波高量測系統(1/4)

執行單位：國立成功大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<p>一、李忠潘委員(書面審查)</p> <p>1. 波浪週期的量測方法及精度評估應可更詳細敘述。</p>	<p>1. 謝謝委員指正。本計畫 RGPS 觀測由於訊號遺失問題，波形的時間變化無法完整得到，波浪週期是由斷面水槽波高計量測結果估計得到的。</p>	<p>符合</p>
<p>二、黃國書委員：</p> <p>2. GPS 資料接收之細節(數位資料或是類比信號？取樣頻率？)。請詳細說明，評估能測得之最短波為何？</p> <p>3. 圖 9、圖 10 與相關文字敘述請註明為成功大學水工試驗所大型斷面水槽；圖 22 之英文 Ann-Lan Lab 請改為 Tainan Hydraulics Laboratory</p> <p>4. 衛星 GPS 信號與波高計量測信號之同步如何完成，或如何確定？</p> <p>5. 空間解析度如何決定？</p>	<p>2. 謝謝委員指正。計畫中相關衛星訊號將再詳細說明。訊號接收頻率目前為 5Hz，因此 2sec 波浪應可以量到。</p> <p>3. 圖中臺南水工所中英文均將正確表示。</p> <p>4. 衛星訊號和波高計量測目前無法同步，波形比較是使用波形平移符合的方式。</p> <p>5. 同一時間可使用衛星訊號仍然在 6 顆左右，因此空間解析度無法達到波長的量測。</p>	<p>符合</p> <p>已修正</p> <p>已修正</p> <p>已修正</p>

<p>三、岳景雲委員：</p> <p>1. 第 2-8 頁註明水深？造波時間 2 分鐘取取樣頻率？共有多少資料？不規則波 $H_{1/3}$ 為何？</p> <p>2. 第 3-8 頁水深 $H=3.25$ 公尺改為 $d=3.25$ 公尺</p> $\eta = \frac{A^+ + A^-}{2} \sin(kx - \omega t)$ <p>$A^+=0.48\text{m}$、$A^-=-0.37\text{m}$ 合成波高是否大於 60 公分？</p> <p>3. 第 4-1 頁圖 22 註明紅色代表為何？藍色代表為何？是否加平均水位線，判別波峯值、波谷值是否一樣？</p> <p>4. 利用 GPS 建立實驗室波高有其創新，建議強調其優點，可否量測波長？取代傳統波高計？</p>	<p>1. 謝謝委員指正。計畫中 RGPS 訊號接收頻率為 5Hz，不規則波部份將完整表示。</p> <p>2. 計畫中所使用波形函數為近似表示，波高將以試驗值作修正。</p> <p>3. 圖形中表示曲線將再說明清楚。</p> <p>4. 本計畫所利用 GPS 反射訊號觀測水位的方法，將補充說明其優缺點。</p>	<p>已補充說明</p> <p>已補充說明</p> <p>已補充說明</p> <p>已補充說明</p>
<p>四、臧效義委員：</p> <p>1. 圖的符號說明應在文中加強。</p> <p>2. 量測結果建議加強相關物理意義之探討，以確認 GPS 量測技術之可行性。</p>	<p>1. 謝謝委員指正。圖所用符號將詳細說明。</p> <p>2. 本計畫利用 GPS 反射訊號觀測水位所得結果，將詳細說明所代表物理意義。</p>	<p>已補充說明</p> <p>已補充說明</p>
<p>伍、簡仲環委員：</p> <p>1. 報告內容文字多有誤植或闕漏，請詳細檢視後修正。圖示部分也應補充或修正，例如圖 22 之紅實線與藍虛線、圖 28 之圖示誤植等。</p> <p>2. 波形方程式之建立與 R-GPS 量測波高之關連性或必要性，請再詳細說明。量測精</p>	<p>1. 謝謝委員指正。報告內容將重新檢視改正錯誤。</p> <p>2. 本計畫利用 GPS 反射訊號觀測水位所得結果和波高計量測的比較將再作詳細說明。</p>	<p>於期末報告內修正</p> <p>於期末報告內補充</p>

<p>度是否與可有效接收衛星有關也請說明，由圖 26 顯示似乎有關，在此情況下實際量測作業如何處理？因為在不同的時間量測衛星不一定可有效接收其訊號。</p>		
<p>3. 結論部分請加強 R-GPS 量測及波高計量測結果之比較，同時也應對 R-GPS 量測波浪之可能限制有所說明。</p>	<p>3. 對於本計畫所利用方法觀測水位的限制也將再補充說明。</p>	<p>於期末報告內補充</p>

□期中■期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：應用 GPS 反射信號建立波高量測系統(1/4)

執行單位：國立成功大學

參與審查人員 及其所提之意見	合作研究單位 處理情形	本所計畫承辦 單位審查意見
<p>一、李忠潘委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. RGPS 的取樣頻率是否可提高？ 2. 如何由圖 23 及 24 的原始資料找出如波高計測得的波形，尚有進步的空間。 3. 文章的文字敘述可更詳細 	<ol style="list-style-type: none"> 1. RGPS 應用於水位、波浪的觀測為 10 Hz，具有 25 Hz 發展潛力。 2. 目前觀測資料為 10 Hz，若資料不遺失應該可以觀測到波峯及波谷變化。 3. 感謝委員指正，將對整個報告內容作完整修改。 	<p>已適當說明</p> <p>已適當說明</p> <p>已修正</p>
<p>二、黃國書委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 在前言及結論與建議中應再敘述 4 年之全程工作目標以及各分年之工作目標，俾更完整呈現計畫之全貌。 2. 天線(信號接收器)與測點之角度或距離關係為何？有限制嗎？ 3. 第 29 頁，4.1 節大斷面水槽之試驗水深為何？建議後續進行時先以較線性波為主，俾同時能與理論波形比較。 4. 期中報告意見回覆之一，用 5Hz 測 2 秒週期之波浪似嫌不足，一般一個正弦(sin)波起碼要 12 點去解析，此應 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，為求全程計畫更為明確，將加入全程以及各分年之工作目標。 2. 依天線架設高度(距離水面 30 公分~250 公尺)反射點距離從 10 公分~4.5 公里。主要限制為天線架設高度與地形遮閉影響。 3. 大斷面水槽之試驗水深為 3 公尺，後續波浪之觀測將先由線性波浪著手。 4. 謝謝委員指教，量測點的大小，由量測點至天線之幾何關係決定，本實驗因天線距水面最大為 2 公尺，量測點最大橢 	<p>已修正</p> <p>已適當說明</p> <p>已適當說明，納入後續計畫考量</p> <p>已適當說明</p>

<p>為後續努力之方向。另意見回覆之四指的是量測點的大小，亦請就此作一說明。</p> <p>5. 除第一章之外各章節文字太過簡略，無法有效傳達所要表達的原意，建議應作修改。</p>	<p>圓長半徑 30 公分、短半徑 20 公分，最小橢圓長半徑 20 公分、短半徑 15 公分。</p> <p>5. 感謝指正，將重新編輯內容做完整說明，及以附錄增加補充說明。</p>	<p>已修正</p>
<p>三、岳景雲委員：</p> <p>1. GPS 應用於實驗室波高量測構想不錯。</p> <p>2. 參考文獻編排寫法格式請統一。</p> <p>3. 國內研究此方面論文請加強說明。</p> <p>4. 方程式內之符號請說明。</p> <p>5. 圖 38 中請註明安平港碼頭，儀器位置方便閱讀。</p> <p>6. 軟硬體好壞及人為操作因素是否會影響量測精度，如何提昇精度是後續應加強。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝指正，遵照辦理。</p> <p>3. 將增加有關 RGPS 在濕土壞、水流應用之文獻。</p> <p>4. 遵照辦理。</p> <p>5. 遵照辦理。</p> <p>6. 提昇觀測的正確性將是未來計畫內容的重點。</p>	<p>感謝委員指教</p> <p>已修正</p> <p>已補充修正</p> <p>已修正</p> <p>已修正</p> <p>已適當說明，納入後續計畫考量</p>
<p>四、臧效義委員：(書面審查)</p> <p>1. 文獻回顧建議增加在波浪量測應用的相關資料，或文字中特別突顯在該方面之應用情況。</p> <p>2. 第 32 頁 4.1.2 節提及受儀器硬體限制而導致的每 6 秒既有 4 至 6 筆資料遺失，遺失率達 15%，應該要檢討改善之做法。</p> <p>3. 中型水槽之紀錄應為水位，但第 35 頁 4.2.2 節第一行仍稱之「波高計紀錄」。如是用波高計量水位，則應確認波高計之精度。</p>	<p>1. 感謝委員建議，將增加水位與波浪相關應用內容。</p> <p>2. 資料遺失部份已藉由硬體、下載指令、與軟體更新解決，且成功應用在中型水槽，完成 10 Hz 下載。</p> <p>3. 感謝委員指正，修正為水位。</p>	<p>已補充說明</p> <p>已補充說明</p> <p>已修正</p>

<p>4. 安平港之驗證仍以水位為主，但本計畫以波高量測為目的，宜增加現場波浪之比較以評估系統適用性。</p>	<p>4. 目前初步作法為利用潮位站資料作驗證，波高部份未來再逐一驗證。</p>	<p>已補充說明</p>
<p>伍、簡仲環委員：</p>		
<p>1. 期中審查部分意見未納入期末報告作補充或說明，請詳細檢視後修正。例如「波形方程式之建立與 R-GPS 量測波高之關連性或必要性，請再詳細說明。量測精度是否與可有效接收衛星有關也請說明」。</p>	<p>1. 感謝委員指正，遵照辦理。</p>	<p>已修正</p>
<p>2. 報告文字敘述似乎有跳躍情形，不易瞭解其含意，請再檢視後修正。參考文獻與報告內容無法對應，也請一併修正。</p>	<p>2. 報告內容將重新檢視修正。</p>	<p>已修正</p>
<p>3. 衛星訊號反射點會受哪些因素影響？請補充說明。不同衛星之反射點不同，此對波浪量測之影響為何？反射點分佈圖之座標精度請修正。</p>	<p>3. 報告內容將重新修正補充說明。</p>	<p>已補充說明</p>
<p>4. 應對 R-GPS 量測波浪之可能限制有所說明。目前成果顯示對於空間上及時間上差異不大之水面變化量測效果較佳，如水庫水面。相較對於時空間變化較劇烈之海面波浪，其量測效果仍有待改進。</p>	<p>4. 目前初步作法為利用潮位站資料作驗證，波高部份未來再逐一驗證。</p>	<p>已適當說明，納入後續計畫考量</p>
<p>5. 報告請參照本中心相關規定格式修正、編排。</p>	<p>5. 報告內容將按照港研中心規定編輯。</p>	<p>已修正</p>

附錄 VI 期末報告簡報資料

MOTC-IOT-98-H3DB006

應用GPS反射信號建立波高量測系統(1/4)

期末簡報

報告人：李兆芳 教授 / 沈立忠 博士
國立成功大學海洋科技與事務研究所

1

目錄

- 一、研究目的
- 二、研究方法與流程
- 三、本年度的工作內容
- 四、大型斷面水槽觀測儀器配置及計算結果
- 五、中型斷面水槽觀測儀器配置及計算結果
- 六、安平港內潮位站附近觀測儀器配置及計算結果
- 七、結論與建議

2

一、研究目的

- 基於GPS反射訊號的應用逐漸廣泛與成功，本計畫乃提出應用RGPS來量測波浪的構想，因其為非接觸性量測，不干擾水體運動以及不受惡劣氣候影響的水位變化量測方法。
- 應用RGPS直接訊號和反射訊號進行波浪水位觀測，藉以建立另一種在實驗水槽中或對實際海面執行波浪水位量測之技術。

3

二、研究方法與流程

- 本研究主要係利用右旋圓柱型極化及左旋圓柱型極化天線，分別接收衛星直接訊號與其水面稍減弱之反射訊號，測算所接收各組反射訊號之實際水面或海面反射點。其觀測量所提供之定位與測高結果(平面坐標與高程)，主要以透過GPS衛星反射訊號與比對訊號相位觀測量、訊號強度、時間延遲修正量、大氣延遲修正量，完成求解反射位置與高程。

$$\sum \varepsilon_{p1s}^2 \leq 1.0 \quad ;$$

$$\varepsilon_{p1s} = P_{1s} - (R_s + c(dt - dT))_s - I + D$$

ε_{p1s} : 最小方乘誤差量

P_{1s} : 虛擬實距(CA碼觀測量)

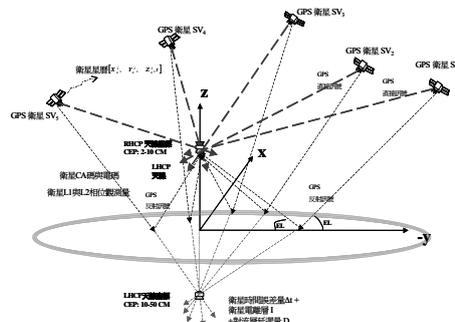
R_s : 衛星至觀測點實距

C : 波速(光速)

$dt-dT$: 接收儀與衛星之時間差修正量

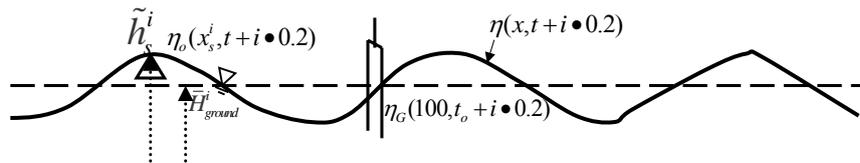
I : 電離層延遲修正量

D : 對流層延遲修正量



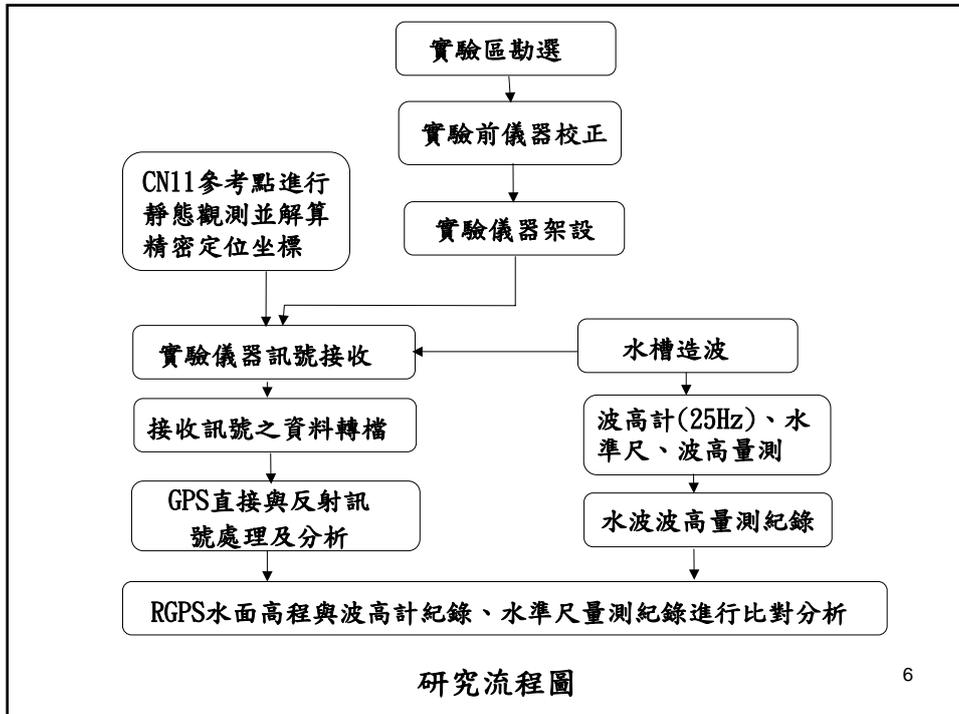
4

- RGPS應用於斷面水槽波形與海面海浪之變化量測實驗，進行GPS直接與反射訊號之相位觀測、GPS反射點坐標定位分析、斷面水槽波形與海面海浪之水位高程變化計算。應用時序分析，可推求規則性波形與浪高。為比較與分析RGPS水面高程測量之精度，並與波高計紀錄、水準尺量測紀錄進行比對分析。



- 實驗與研究流程圖，如下圖。

5



研究流程圖

6

實驗區勘選



大型斷面水槽



中型斷面水槽



安平港內潮位站附近

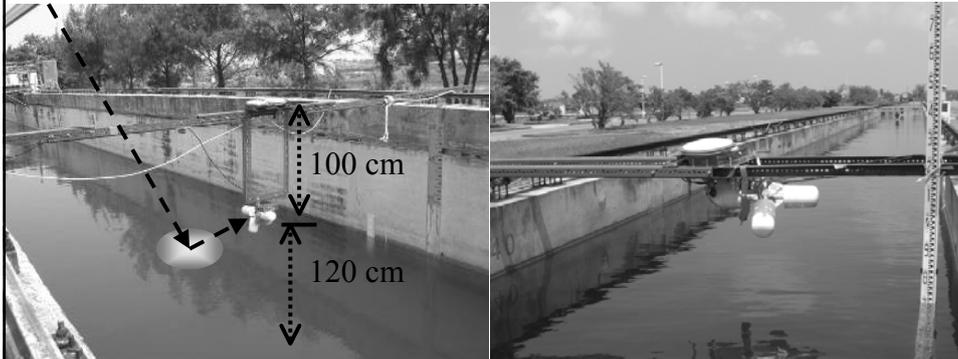
7

實驗前儀器校正



8

實驗儀器架設



9

實驗整組試驗儀器設備功能



RHCP右弦天線

功能：接收雙頻GPS訊號，過濾多迴路雜訊(含GPS水面反射訊號)



LHCP左弦天線

功能：接收水面一次反射GPS訊號



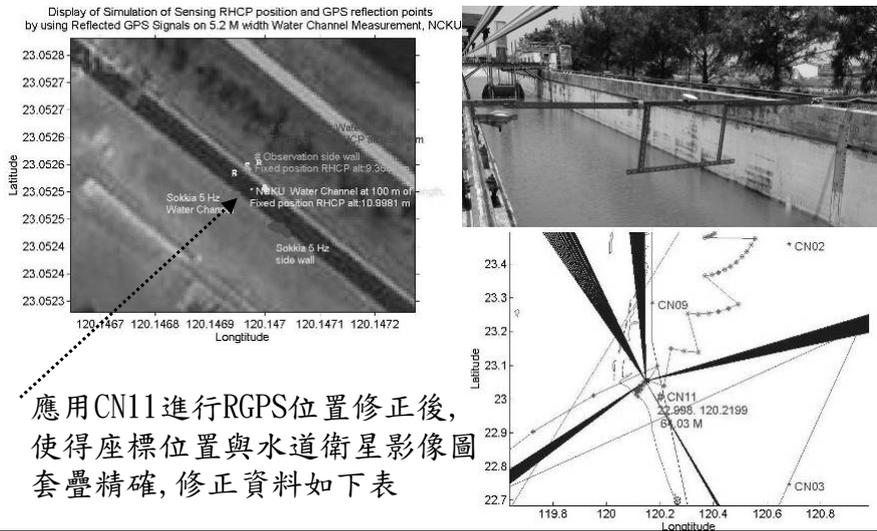
GPS雙頻接收儀

功能:L1/L2雙頻GPS接收儀

10

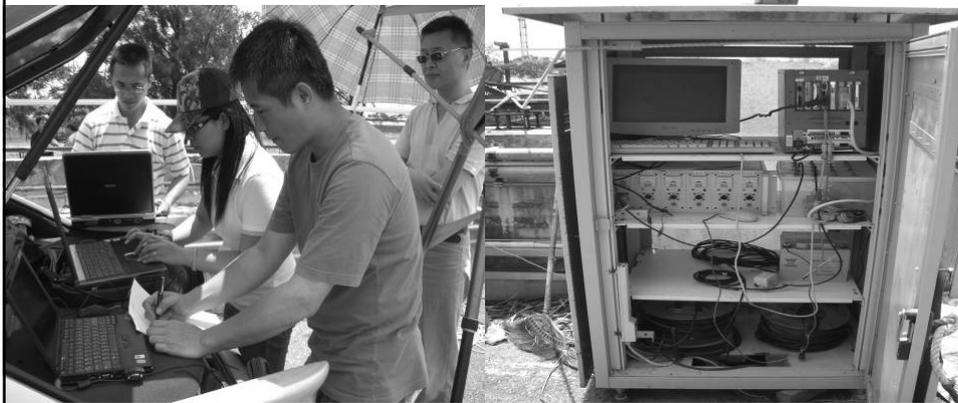
CN11參考點進行靜態觀測並解算精密定位坐標

如圖所示以CN11 參考座標N 22.988 E 120.2199 64.83 m為成功大學臺南水工試驗所大型水槽實驗RGPS座標進行位置修正。



實驗儀器訊號接收

實驗儀器接受與訊號處理與水位計25Hz量測紀錄



接收訊號之資料轉檔

RGPS Digital GPS O檔

```

2.10 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE
Convert Water Channel GTM 28-Apr-2009 08:25 PGH / RUN BY / DATE
5 Hz download and suggest with assign log command will be COMMENT
stable control COMMENT
Signal Strength values S1,S2 are in dBHz COMMENT
University 1 Rd. NCRU. MARKER NAME
MARKER NUMBER
L. C. Shen SGRG, NCRU OBSERVER / AGENCY
SOKKIA-2700 NovAtel GPSCard REG # / TYPE / VERS
Novatel RHCP antenna600 ANT # / TYPE
-2948951.1773 5077589.7972 2482075.6202 APPROX POSITION XYZ
20.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/M
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2
1 1 6 G09 G15 G18 G21 G24 G27 G24 WAVELENGTH FACT L1/2
1 1 2 G26 G27 WAVELENGTH FACT L1/2
COMMENT
COMMENT
COMMENT
COMMENT
8 C1 L1 D1 S1 P2 L2 D2 S2 # / TYPES OF OBSER
0.2000 INTERVAL
2009 04 28 04 54 6.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
2009 04 28 04 58 43.0000000 GPS TIME OF LAST OBS
15 LEAP SECONDS
END OF HEADER
09 04 28 04 54 6.0000000 0 60 9G 9G21G27G21G21
19892399.19143 104535252.82143 35.91043 36.400 19892397.89741
814560831.07751 27.98041 26.700
19892399.05943 104535262.82143 35.89843 36.400 19892402.00441
81456043.10251 28.00041 28.700
20538048.48647 107928165.45347 119.53947 43.600 20538049.43741
84099878.17651 90.14541 26.600
22227815.12543 116807968.74543 -2507.57443 34.900 22227816.60841 3
91019166.87151 -1953.98441 19.700
20538048.48347 107928168.45147 119.47347 43.600
    
```

觀測時間與間隔

觀測時間衛星數與PRN代號

PRN 9 虛擬實距, L1相位
量, L1訊號強度, L1都卜
勒值, P2虛擬實距, L2相位
量, L2訊號強度, L2都卜
勒值

PRN	Virtual Range	L1 Phase	L1 Power	P2 Virtual Range	L2 Phase	L2 Power
09	04	28	04	54	6.0000000	0 60
19892399.19143	104535252.82143	35.91043	36.400	19892397.89741		
814560831.07751	27.98041	26.700				
19892399.05943	104535262.82143	35.89843	36.400	19892402.00441		
81456043.10251	28.00041	28.700				
20538048.48647	107928165.45347	119.53947	43.600	20538049.43741		
84099878.17651	90.14541	26.600				
22227815.12543	116807968.74543	-2507.57443	34.900	22227816.60841	3	
91019166.87151	-1953.98441	19.700				
20538048.48347	107928168.45147	119.47347	43.600			

GPS直接與反射訊號處理及分析

CN11提供2009.04.11修正資料納入GPS定位軟體進行座標修正如下表:

經度修正為: -8.68172 E-05

緯度修正為: -9.68444 E-05

高度修正為: 0.5197 m

RGPS座標位置分別以5Hz(0.2秒)與10秒間隔下載觀測量之修正後座標

Station	Time	Height	Lat	Long	Water	Correction
361041 TM-97 (meters)	23	3	9.44161	23.05262267	water	Correct for CN11
361042 TM-97 (meters)	23	3	9.3205	23.05258903	water	Correct for CN11
361043 TM-97 (meters)	23	3	9.37311	23.05260364	water	Correct for CN11
CN11 TM-97 (meters)	22	59	55.55939	22.9987665	60°30	Correct for CN11

修正量

水槽造波



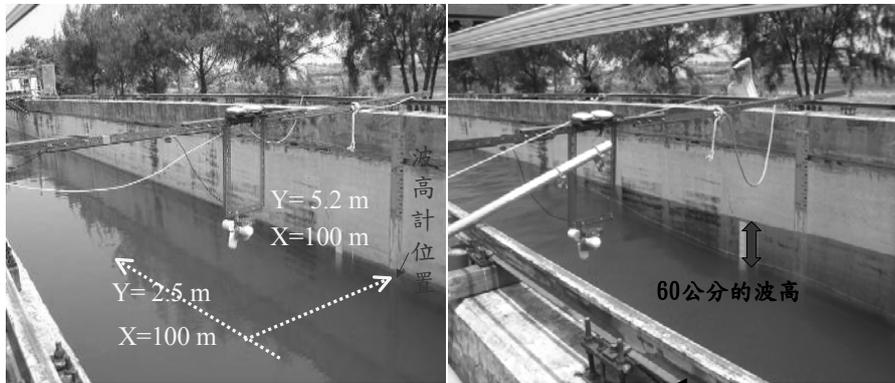
15

三、本年度的工作內容

- 在成大台南水工試驗所大型斷面水槽進行波高量測。
- 在成大台南水工試驗所中型斷面水槽進行靜止水面觀測，和穩定下降水位觀測。
- 在臺南安平港內進行水位觀測。
- 應用時序分析，推求規則性波形與浪高。
- 與波高計、潮位儀、水準尺量測紀錄進行比對分析，以驗證RGPS水面高程測量結果之精度及一致性。

16

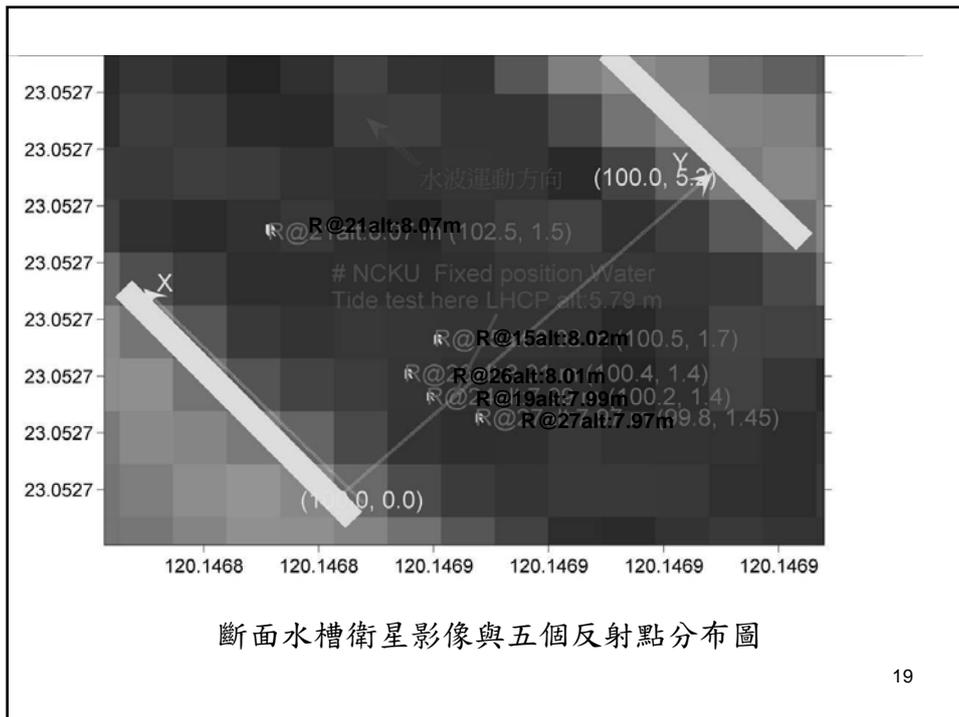
四、大型斷面水槽觀測儀器配置及計算結果



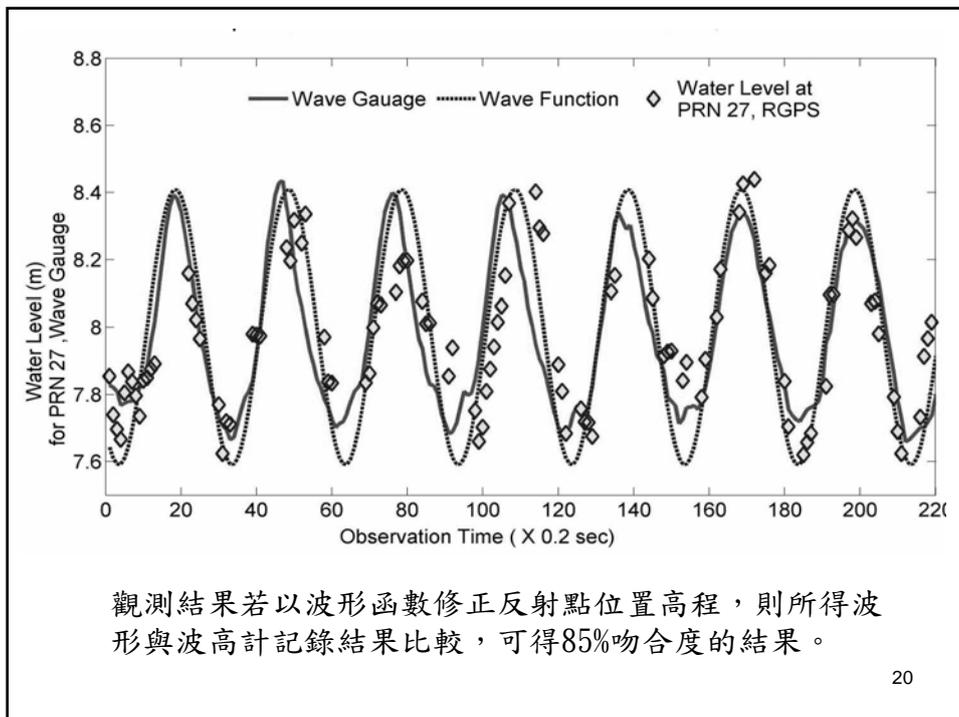
大型斷面水槽觀測儀器配置：觀測規則波波高60cm週期為6秒的波浪。

17





19



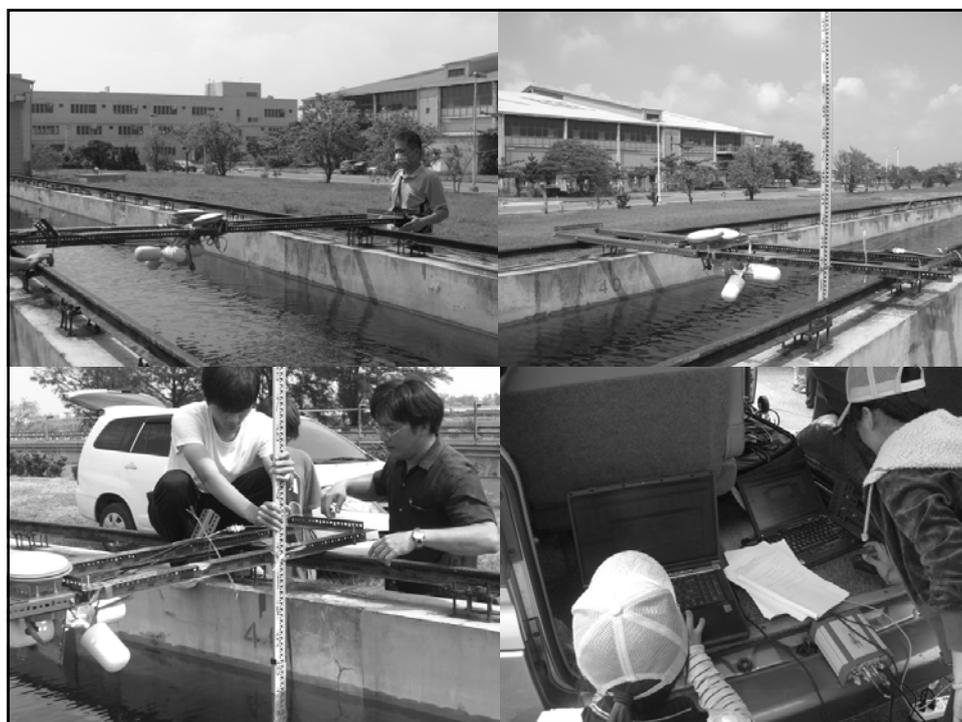
20

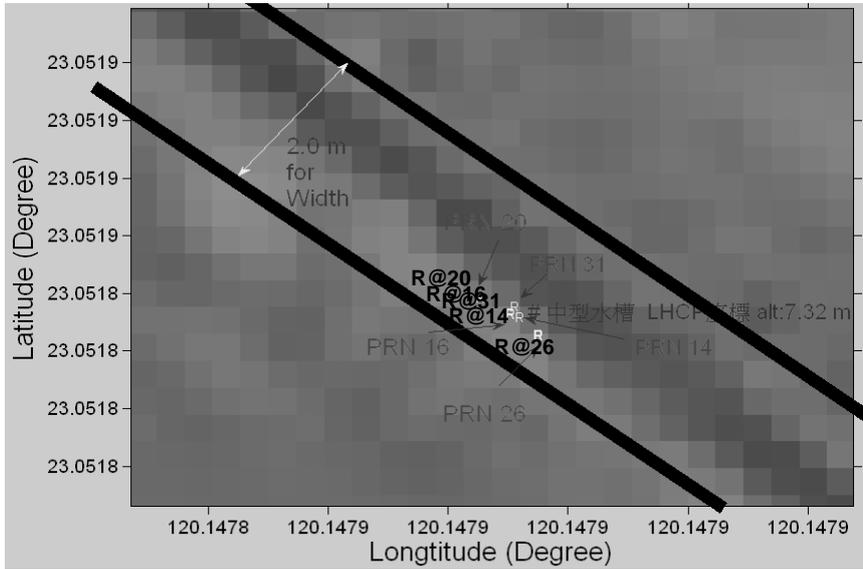
五、中型斷面水槽觀測儀器配置及計算結果



中型斷面水槽進行觀測儀器配置：靜止水面觀測，以及1小時連續下降水位30公分觀測。

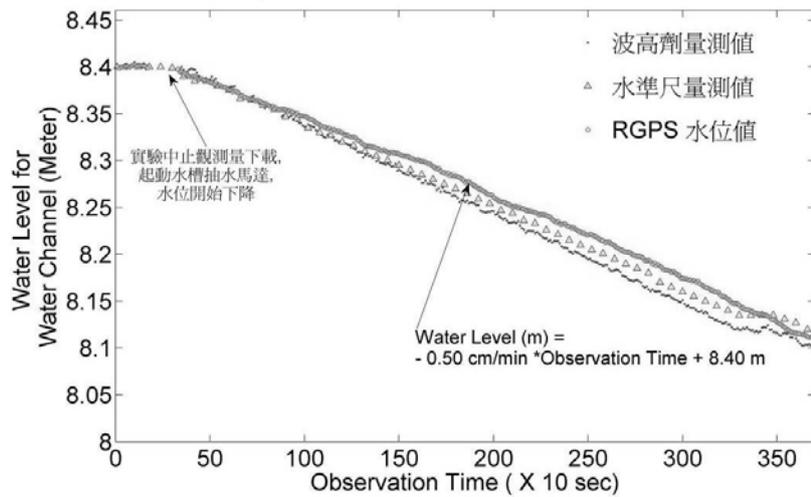
21



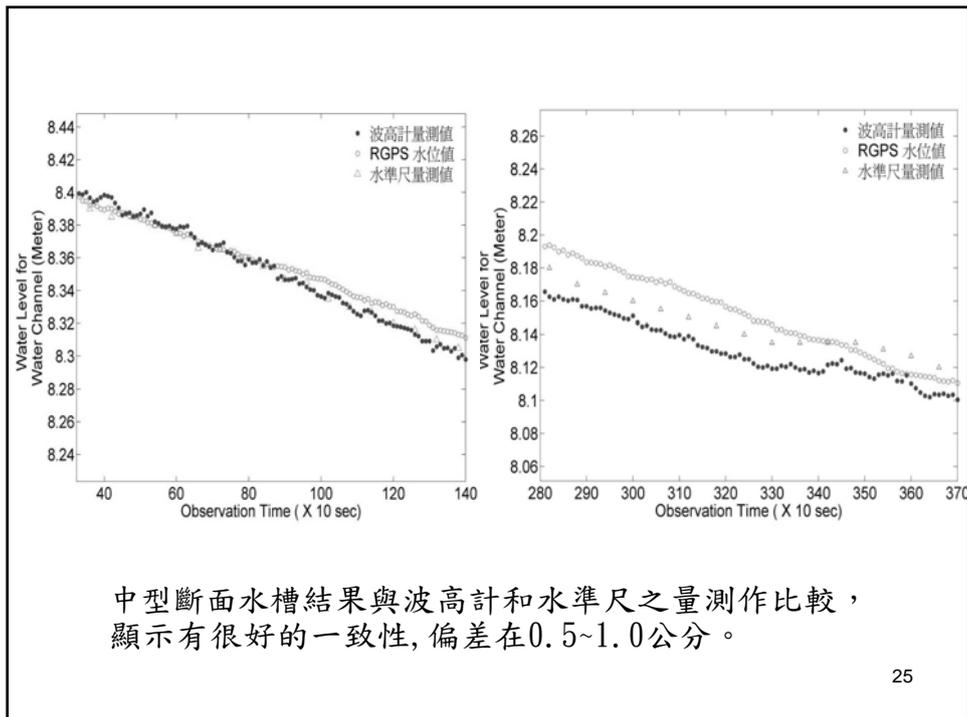


中型水槽衛星影像與五個反射點分布圖

23

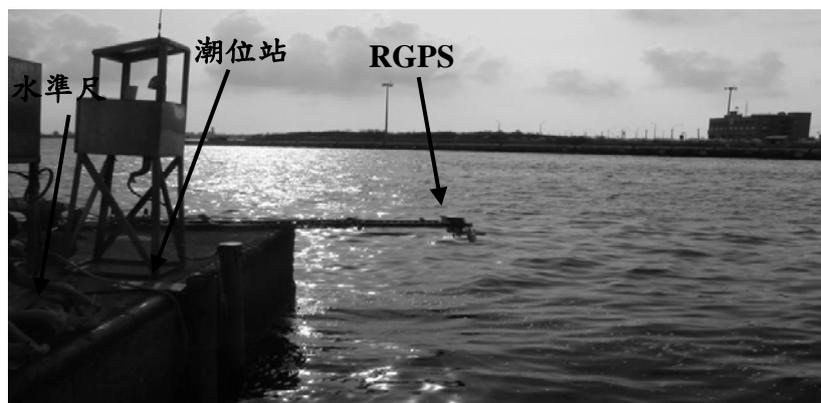


24



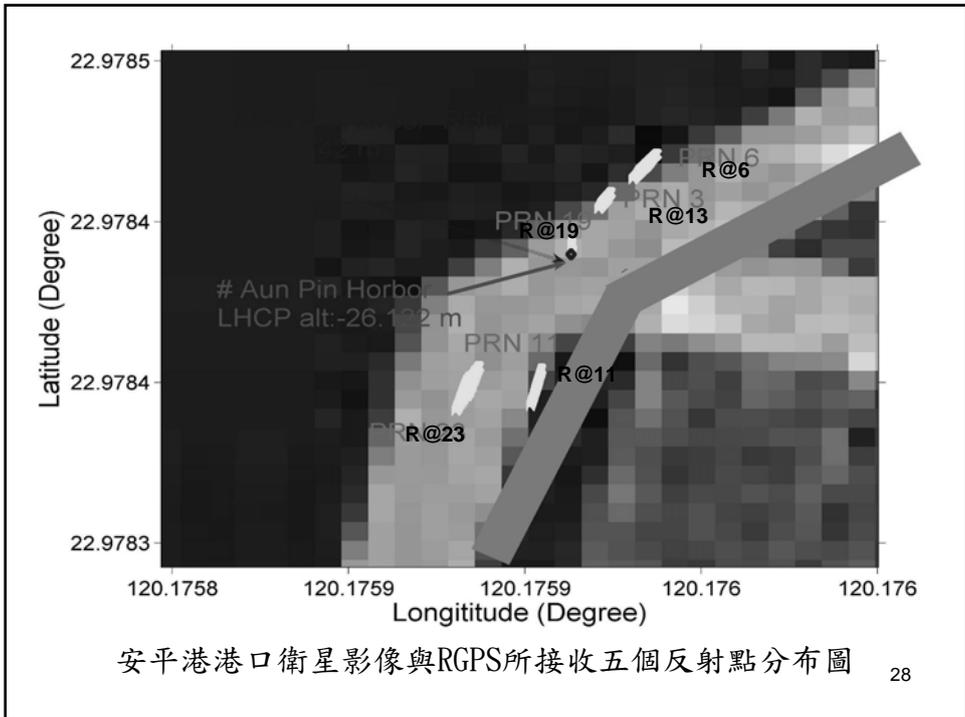
25

六、安平港內潮位站附近觀測儀器配置及計算結果

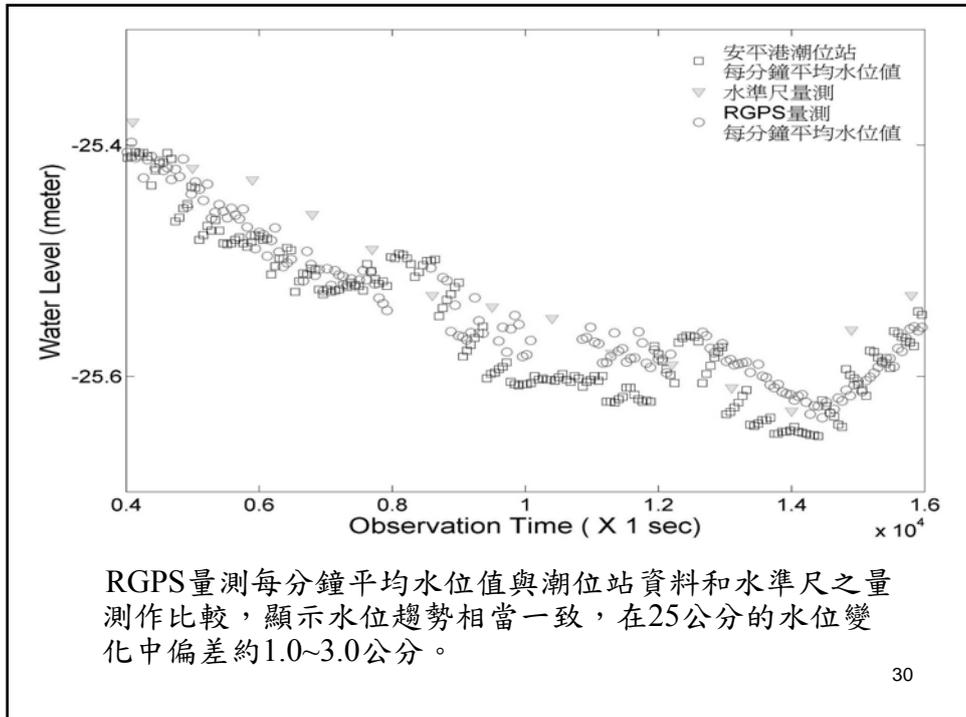
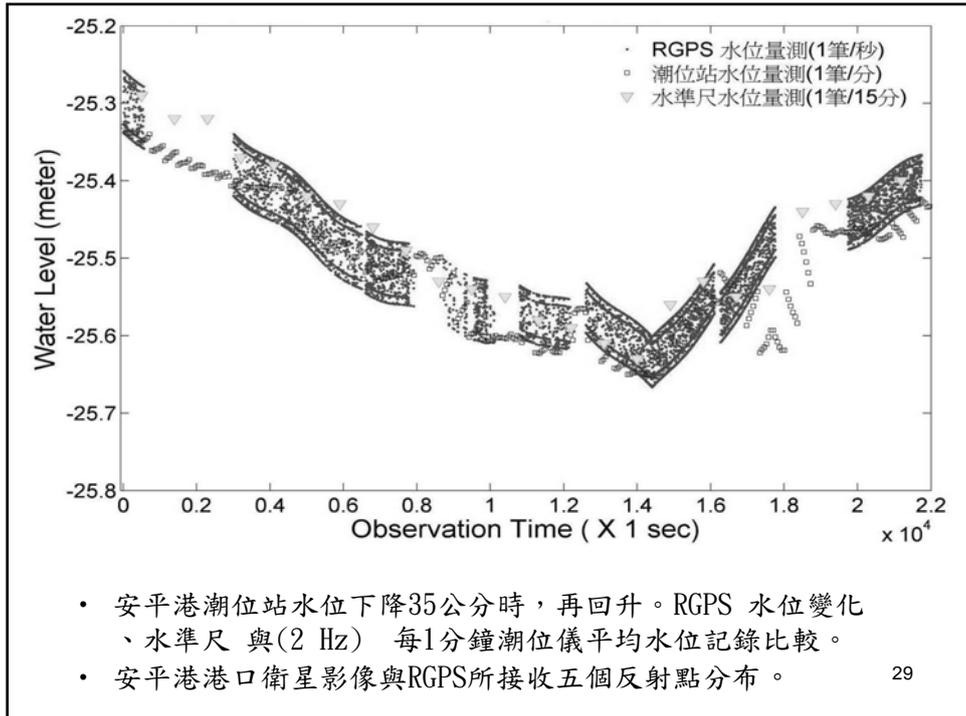


安平港潮位站進行觀測儀器配置：6小時之海水面變化觀測。

26



安平港港口衛星影像與RGPS所接收五個反射點分布圖



七、結論與建議

- (1) 在大型斷面水槽中觀測規則波，波高 60 cm 週期為 6 秒的波浪。本研究觀測結果若以波形函數修正反射點位置高程，則所得波形與波高計記錄結果比較，可得 85 % 吻合度的結果。
- (2) 在中型斷面水槽進行靜止水面觀測，以及 1 小時連續下降水位 30 公分觀測，結果與波高計和水準尺之量測作比較，顯示有很好的一致性，偏差在 0.5 ~ 1.0 公分。

31

- (3) 另外在安平港內潮位站附近進行 6 小時之海水面變化觀測，結果也與潮位站資料和水準尺之量測作比較，顯示水位趨勢相當一致，在 25 公分的水位變化中偏差約 1.0 ~ 3.0 公分。
- (4) 本項研究初步利用 GPS 直接訊號和反射訊號進行波浪水位觀測，所得結果在精度與一致性上與波高計相當吻合，並顯示未來具有應用價值及發展潛力。建議下年度將針對各種波浪條件和 RGPS 觀測範圍進行研究。

32

簡報完畢
敬請指教