

摘 要

以 GPS 進行點位量測時，觀測量是以天線相位中心為基準的，然而，天線相位中心並非天線之物理中心，且相位中心是非固定的。對於任一 GPS 天線，其相位中心會隨衛星信號來源方向而改變，因此，GPS 天線相位中心變化是相當複雜的。另外，相位中心的變化與天線形式是相關的，此種變化在混合不同型式天線同步觀測時應仔細考量修正。不同型式天線之相位中心變化主要影響為 GPS 測站之相對高程，其影響可達 10 公分（不論測站之遠近）。即使使用同型天線，仍可能造成 0.015ppm 之尺度誤差。

GPS 天線相位中心偏移量及變化量可由實驗室法及實測 GPS 觀測法分別測定。本研究將以實測 GPS 觀測法來率定相位中心偏移量及變化量，此方法較實驗室法簡易，而精度仍可達到實驗室法的水準，但所獲得者為天線間之相對改正量，因此，至少需有一部天線（參考基準）視為已知。

本研究將比較相位中心改正前後對 GPS 量測精度之影響，並建議一可行之 GPS 天線相位中心率定模式，及相位中心改正模式。

Abstract

The precise point whose position is being measured from GPS is generally assumed to be the phase center of the GPS antenna. However, the phase center of a GPS antenna is neither a physical point nor a stable point. For any given GPS antenna, the phase center will change with the direction of the signal from a satellite. Therefore, the variation of the GPS antenna phase center is very complicated. Besides, the phase center variations are antenna-type-dependent. This effect has to be carefully modified when different types of antennas are used simultaneously. Ignoring these phase center variations can lead to serious (up to 10 cm) vertical errors that are independent on the baseline length. Even if the same types of antennas are used, the main effect is a scale factor up to about 0.015ppm.

The antenna phase center offsets and its variations may stem either from anechoic chamber measurements or from estimations using GPS data. This study will estimate the antenna phase center offsets and variations from GPS data. The effort for setting up such a campaign is considerably smaller than collecting the chamber measurements. The resulting accuracy is comparable with that of the chamber tests but the disadvantage is that only the relative corrections may be estimated. Therefore at least one reference antenna has to be introduced as known.

We will compare the results of GPS measurements from phase center corrections and no corrections. And command a feasible method to calibrate antenna phase center and a correction model.

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
目 錄	iii
表目錄	v
圖目錄	vi
第一章 前言	1
1-1 研究方法	1
1-2 研究內容	1
第二章 GPS 接收儀天線相位中心特性	2
2-1 GPS 天線相位中心變化	2
2-2 相位中心變化所造成之影響	4
第三章 相位中心變化的率定方法及理論	5
3-1 實驗室法	5
3-2 實測 GPS 觀測法率定相位中心變化	6
3-2-1 實測 GPS 觀測法之概觀與背景介紹	6
3-2-2 實測 GPS 觀測法之求定理論說明	6
3-3 實驗室法與實測 GPS 觀測法之比較	8
第四章 實驗說明及資料處理	9
4-1 實驗步驟說明	9
4-2 試驗相關說明	10
4-2-1 試驗天線相關資料	10
4-2-2 試驗天線整置	13
4-3 資料處理	16

4-3-1 Bernese 4.0 版軟體介紹及計算流程	16
4-3-2 GPS 數據處理採用模式	18
第五章 研究成果及分析	19
5-1 相位中心偏移量率定結果	19
5-2 相位中心變化量率定結果	24
5-3 實驗成果之分析比較	31
5-4 GPS 天線相位中心改正於 GPS 量測之影響	35
第六章 結論與建議	41
參考文獻	42

表 目 錄

表 4-1 試驗天線型式及編號	10
表 5-1 Trimble 天線相位中心偏移量	20
表 5-2 Ashtech 天線相位中心偏移量	21
表 5-3 Leica 天線相位中心偏移量	21
表 5-4 以天線旋轉方式進行相位中心偏移量率定之比較	23
表 5-5 Trimble 天線相位中心變化量—線性函數求得	25
表 5-6 Trimble 天線相位中心變化量—球諧函數求得	25
表 5-7 Ashtech 天線相位中心變化量—線性函數求得	26
表 5-8 Ashtech 天線相位中心變化量—球諧函數求得	26
表 5-9 Leica 天線相位中心變化量—線性函數求得	27
表 5-10 Leica 天線相位中心變化量—球諧函數求得	27
表 5-11 同型天線相位中心改正前後之座標標準偏差量	35
表 5-12 混合不同型天線(Trimble-Ashtech)相位中心改正前後 之座標標準偏差量	36
表 5-13 混合不同型天線(Trimble-Leica)相位中心改正前後 之座標標準偏差量	37

圖目錄

圖 2-1 隨仰角及方位角改變的相位特性	3
圖 2-2 天線物理中心、平均相位中心與瞬間相位中心之關係 ...	3
圖 3-1 無反射無線電波實驗室	5
圖 3-2 同時求解天線相位中心偏移量及測站座標方法	7
圖 4-1 測點之相關位置圖	11
圖 4-2 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 天線參考點	11
圖 4-3 Ashtech 700718•700845 天線參考點	12
圖 4-4 Leica SR399 INTERNAL 天線參考點	12
圖 4-5 GPS 觀測衛星走勢圖 (Sky Plot)	13
圖 4-6 GPS 觀測衛星仰角走勢圖	14
圖 4-7 GPS 觀測衛星方位角走勢圖	15
圖 4-8 以 Bernese 軟體進行 GPS 天線相位中心變化 資料處理流程	17
圖 5-1 Trimble 天線相位中心偏移量	20
圖 5-2 Ashtech 天線相位中心偏移量	22
圖 5-3 Leica 天線相位中心偏移量	22
圖 5-4 Trimble 相位中心變化量—線性函數求得	28
圖 5-5 Trimble 相位中心變化量—球諧函數求得	28
圖 5-6 Ashtech 相位中心變化量—線性函數求得	29
圖 5-7 Ashtech 相位中心變化量—球諧函數求得	29
圖 5-8 Leica 相位中心變化量—線性函數求得	30
圖 5-9 Leica 相位中心變化量—球諧函數求得	30
圖 5-10 各型天線相位中心偏移量率定值與 IGS、NGS	

	公佈值之比較 (N 方向)	31
圖 5-11	各型天線相位中心偏移量率定值與 IGS、NGS 公佈值之比較 (E 方向)	32
圖 5-12	各型天線相位中心偏移量率定值與 IGS、NGS 公佈值之比較 (U 方向)	32
圖 5-13	Trimble 天線以線性函數 (P) 及球諧函數 (H) 求得之相位中心變化量與 IGS、NGS 公佈值之比較 ...	33
圖 5-14	Ashtech700718 天線以線性函數 (P) 及球諧函數 (H) 求得之相位中心變化量與 IGS、NGS 公佈值之比較 ...	33
圖 5-15	Ashtech700700 天線以線性函數 (P) 及球諧函數 (H) 求得之相位中心變化量與 IGS 公佈值之比較	34
圖 5-16	Leica 天線以線性函數 (P) 及球諧函數 (H) 求得之相位中心變化量與 IGS 公佈值之比較	34
圖 5-17	混合不同型天線 (Trimble-Ashtech) 相位中心改正前後 之座標標準偏差—U 方向	38
圖 5-18	混合不同型天線 (Trimble-Leica) 相位中心改正前後 之座標標準偏差—U 方向	39

第一章 前言

1-1 研究方法

GPS 天線相位中心變化是影響 GPS 量測精度的關鍵因素，尤其，當 GPS 觀測混合著不同型式的天線及接收儀進行時，相位中心變化在 GPS 資料處理時，是一定要加以考慮修正的。目前率定相位中心的方法有兩種，其一是以實驗室法（anechoic chamber measurement）量測相位中心變化，其二是由處理 GPS 資料率定相位中心。以實驗室法進行天線相位中心率定並不普遍，原因是以實驗室法每次僅能率定一部天線，且須在配有相關設備之實驗室才能進行。在實用上，使用者利用 GPS 從事高精度量測時，是基於”相對”定位技術，因此只要知道天線間相對的改正量即可，也許不須實驗室法之絕對改正量，所以，利用各種天線之 GPS 觀測量及已精確量測之測點來推測天線間之相對改正量，是一項經濟且實用的方法。

本研究就是利用分析 GPS 觀測量的方法來率定各種型式天線的相位中心變化情形，包括同型天線間是否有一定之規律，以及不同型天線間之相對變化情形，經由本研究，將切實瞭解到天線相位中心變化是如何影響 GPS 之精度，同時，也將可建立相位中心變化情形之量化數據，以提供 GPS 資料處理時作為修正之用。

1-2 研究內容

本研究將建立一 GPS 天線相位中心率定場，針對常使用之 GPS 接收儀進行相位中心率定，並建立相位中心改正模式。本文以下各章節之主要內容，依序概要介紹如下：

第二章 GPS 接收儀天線相位中心特性：說明 GPS 天線原理與特性及 GPS 天線相位中心變化等情形，並針對相位中心變化對 GPS 量測精度所造成之影響作一介紹。

第三章 相位中心變化的率定方法及理論：說明如何應用實驗室法與實測 GPS 觀測法率定相位中心變化，並回顧國外相關研究之結果，分析比較兩方法之優缺點。

第四章 實驗說明及資料處理：說明本研究之實驗步驟及試驗天線相關資料，並說明以 Bernese 軟體處理 GPS 觀測資料流程。

第五章 實驗成果與分析：包含各型天線相位中心率定之成果，並進行成果測試與比較。

第六章 結論與建議。

第二章 GPS 接收儀天線相位中心特性

2-1 GPS 天線相位中心變化

GPS 天線接收到衛星信號的位置稱為相位中心，目前應用於 GPS 量測工作之各型天線，其物理中心與相位中心位置通常不一致，且相位中心並非穩定的點，相位中心會隨著信號來源方向改變，此即為相位中心變化。

GPS 接收儀天線相位特性可分別以信號來源的仰角及方位角加以描述，一個理想的天線其隨著仰角而改變的相位模式應是相當平緩的，甚至應該是不受仰角變化的影響；而隨著方位角而改變的相位模式則應盡可能與方位角成正比，然而，實際的天線相位特性並非如此（圖 2-2）（Imakiire et al., 1997）。

對於同一天線而言，L1 與 L2 信號的相位中心是不相關的，僅有在偶然的情況下會有一致的情形發生；不同型天線間的相位中心亦不相同，而同型天線其相位中心則會趨於一致（Gurtner et al., 1995）。

天線相位中心會因衛星信號來源方向而改變，亦即相位中心之變化與信號來源方向之仰角及方位角有關。與仰角相關

（elevation-dependent）之相位中心變化，其主要造成相對高程量測上的誤差及測站間基線之尺度誤差，而與方位角相關

（azimuth-dependent）之相位中心變化則會導致水平位置的誤差（Rothacher et al., 1995）。

天線相位中心變化可細分為兩方面討論：

1. 天線平均相位中心的位置與天線物理中心的差異即稱為相位中心的偏移量。
2. 瞬間相位中心與平均相位中心之差異稱為相位中心變化量。

下圖 2-3 說明了天線物理中心與平均相位中心及平均相位中心與瞬間相位中心之關係：

儘管天線相位中心變化對某些 GPS 量測工作並不顯得如此重要，但對於高精度 GPS 量測而言，相位中心變化是必須加以考慮並進行修正的。

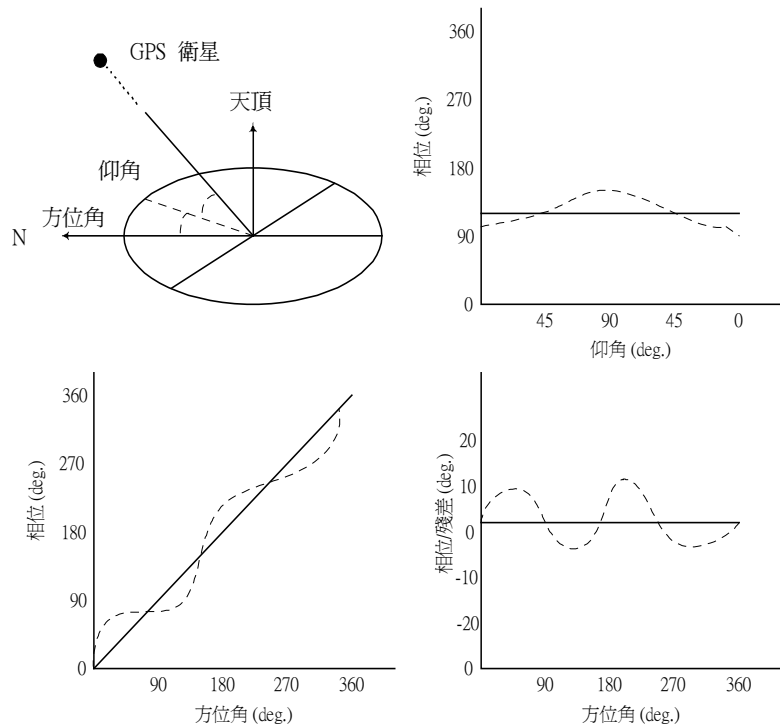
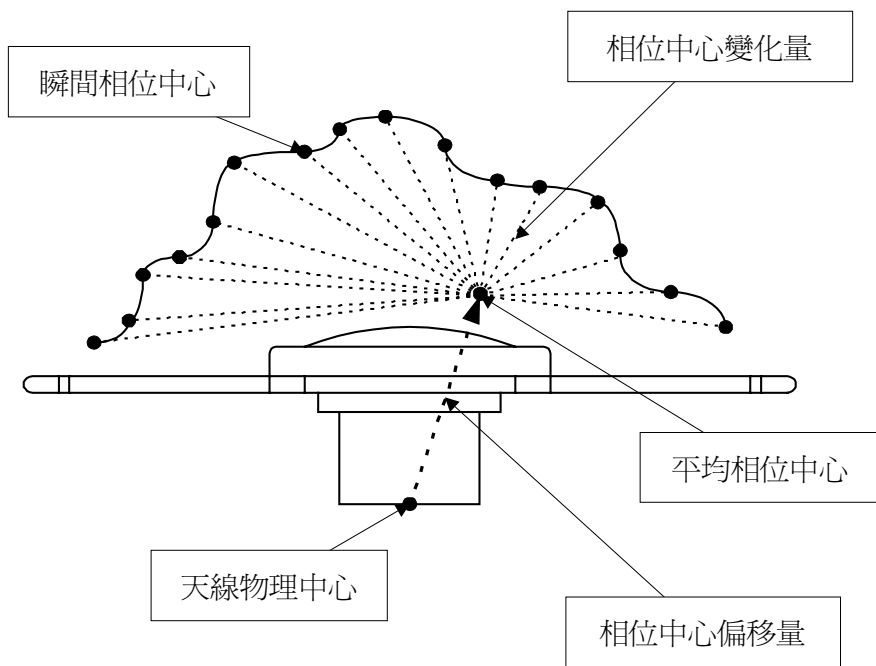


圖 2 - 1 隨仰角及方位角改變的相位特性。其中實線為理想天線的



狀態，虛線為實際天線的狀態。(Imakiire et al., 1997)

圖 2 - 2 天線物理中心、平均相位中心與瞬間相位中心之關係

2-2 相位中心變化所造成之影響

較早關於結合不同型式天線對量測工作影響的研究重點，皆在探討不同型式天線間，相位中心偏移量（平均變化量）於水平及垂直方向上的差異。在 Wettzell 進行的 EUREF-89 的試驗中（Seeger et al., 1992），率定天線間之相對相位中心偏移，其試驗包含了大多數的大地型 GPS 天線（Minimac 2816, TI-4100, Trimble 4000SLD, WM-120）。分析顯示，由 GPS 試驗所得到之相位中心偏移量與廠商所公佈之相位中心偏移的差異將近 4 公分（Guertner et al., 1989）。當時發現，若於 GPS 數據處理中加入相位中心偏移量的改正，則混合不同型式天線量測時的誤差可減低至 1 公分以下。

根據國外相關研究指出(Rothacher et al., 1995)，以混合不同形式天線於長基線進行量測時（基線長約 1200 公里），其量測結果與 ITRF93 之值相比較，發現若未進行相位中心改正，其高程之誤差可達約 11 公分，而若加入相位中心改正於 GPS 計算時，則其高程之誤差僅有 2 公分左右，因此，可知相位中心改正對 GPS 量測精度，有絕對的影響。

隨著信號仰角而改變的相位中心變化，對 GPS 成果的影響主要有以下兩項(Beutler et al., 1988)、(Rothacher et al., 1995)：

1. 混合不同型式天線進行 GPS 量測時，若天線相位中心變化不同時，其主要的影響是相對高程上的誤差，其誤差甚至可高達 10 公分，這類影響並不會因基線長度遠近而改變。
2. 若使用同型天線進行量測工作，仍會造成網形上 0.015ppm 的尺度誤差，這是因為在長基線時，天線所觀測到的同一顆衛星其仰角是不相同的。

除了隨仰角而變的相位中心變化，亦存在著隨方位角改變的相位中心變化。隨方位角而變的相位中心變化會造成水平方向上的誤差。

對於大多數 GPS 使用者而言，這些天線相位中心變化，已成為主要誤差的來源。未模式化的相位中心變化對於測定電離層及對流層模式時亦會造成系統誤差(Rothacher et al., 1995)。

根據 NGS (Mader, 1998) 相關研究指出，相位中心變化主要是受信號仰角影響，而非信號之方位角，且幾乎所有目前使用中的 GPS 天線，其相位中心模式與方位角幾乎是成對稱的，一般而言所造成誤差量並不大，主要的相位中心變化是由於信號仰角不同所引起的。因此本研究所探討之相位中心變化乃以隨信號仰角改變的相位中心變化為主。

第三章 相位中心變化的率定方法及理論

相位中心變化可以由實驗室法 (anechoic chamber measurement) 及實測 GPS 觀測法求得，以下將分別說明兩種方法，並比較其優缺點。

3-1 實驗室法 (Anechoic Chamber Measurement)

目前在國外有關天線相位中心之研究，大多是在實驗室進行如：(Schupler et al., 1991)、(Schupler et al., 1994)、(Braun et al., 1994)、(Imakiire et al., 1997)。實驗室法就是於無反射無線電波實驗室內設置一個固定的天線發射無線電信號(如圖 3-1)，另有一承載率定天線支撐架，該支撐架有兩軸 (D 軸，F 軸) 可獨立旋轉天線，使天線可改變不同的仰角及方位角 (類似經緯儀構造)，同時又可在三個獨立 (正交) 的方向移動。

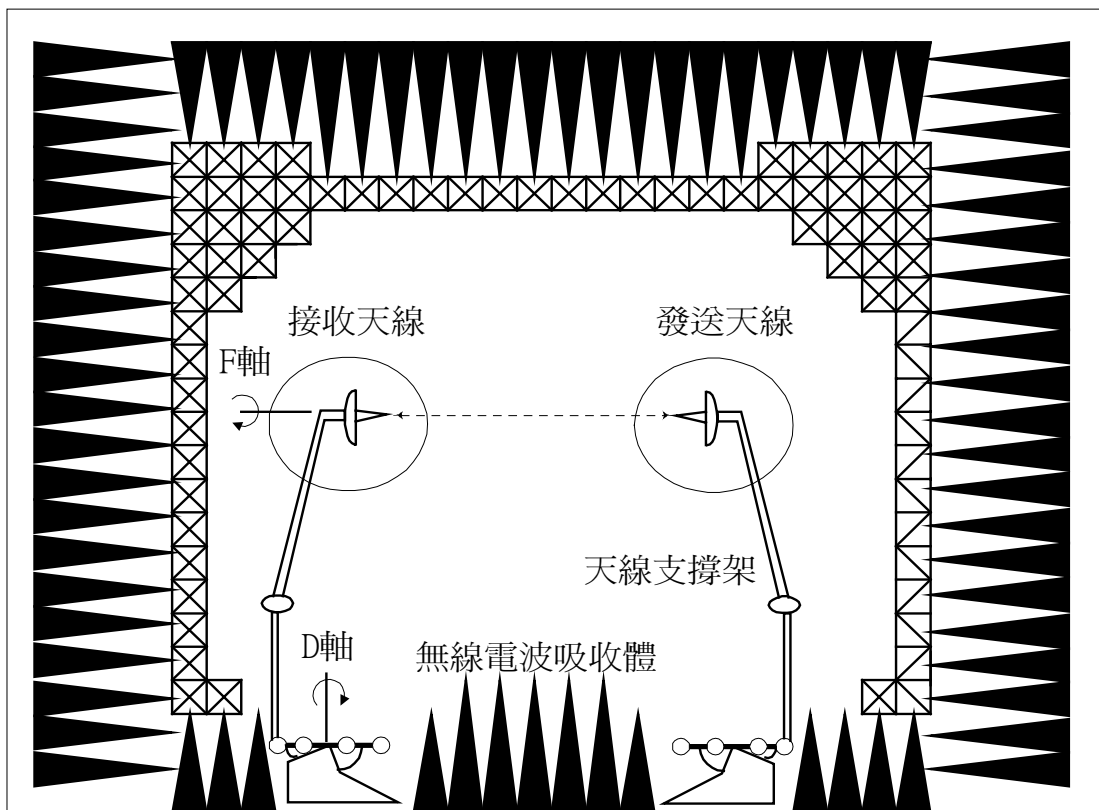


圖 3-1 實驗室法—無反射無線電波實驗室 (Imakiire et al., 1997)

率定時，首先在各種不同的方位角上旋轉天線使天頂距由-90 度變化到+90 度，當進行量測時，測試天線儘可能精確地以平均相位中

心為旋轉點，並移動旋轉中心（三度空間平移），直到相位中心隨仰角的變化（ $+z \sim -z$ ）達到最小且對稱，此平移量即天線物理中心與平均相位中心的偏移量。再由所得之記錄值，可獲悉瞬間相位中心與平均相位中心的變化量。通常在實驗室 L1 及 L2 信號須個別率定，最後，就能定義出 L1 及 L2 信號之相位特性與仰角及方位角之關係。

實驗室法僅能測得隨著仰角及方位角改變的相位中心變化，相位中心偏移量仍無法精確得知（Imakiire et al., 1997）。由實驗室法所測定之相位中心變化為絕對量，其優點就是可針對單一天線進行測定，然而與實測 GPS 觀測法比較之下，以實驗室法完成所有天線之測試要花費更多心力。實驗室所獲得的天線改正量在實際上並未廣泛的使用（Rothacher et al., 1996），原因是每一根天線都有不同的修正值，且須在配有相關設備之實驗室才能進行，儘管此法較科學、精確，但仍未能廣泛推行。

3-2 實測 GPS 觀測法率定相位中心變化

3-2-1 實測 GPS 觀測法之概觀與背景介紹

以實測 GPS 觀測法率定相位中心變化之相關研究，起先僅率定簡單之垂直向及水平向之相位中心偏移量，其方法是在已知座標點位上進行測試（Gurtner et al., 1989）（Mireault et al., 1993），特別是 UNAVCO 的 GPS 小組定期公佈之天線測試報告。

於 1994 年，才開始有少數團體以實測 GPS 觀測法測定與仰角相關之相位中心改正模式，其中（Mader et al., 1994）以 GPS 後級處理殘差測定與仰角相關之改正量，而（Breuer et al., 1995）則建立低階多項式之係數為改正參數。

於 1995 年，（Rothacher et al., 1995）則修改了 Bernese GPS 軟體，以作為計算與仰角相關及同時考慮仰角及方位角之相位中心改正模式之參數。

3-2-2 實測 GPS 觀測法之求定理論說明

以實測 GPS 觀測法率定之相位中心改正量為相對之改正量，因此須選一部天線為參考天線，實測 GPS 觀測法測定相位中心偏移量及變化量可分為兩步驟：1. 計算相位中心偏移量 2. 計算與仰角及方位角相關之相位中心變化量。

測定相位中心偏移量：

計算相位中心偏移量時，可與測站點位座標一同計算，其原理以下圖 3-2 說明。

A.天線互換測站方式：

$$(I + II) / 2 = r_A - r_B \quad (3 - 1)$$

$$(I - II) / 2 = \Delta r_1 - \Delta r_2 \quad (3 - 2)$$

B.天線不動旋轉 180°：

$$(III + IV) / 2 = r_A - r_B \quad (3 - 3)$$

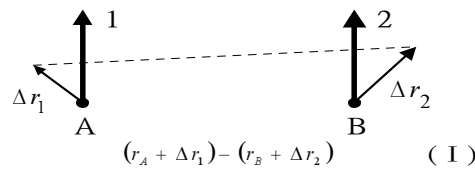
$$(III - IV) / 2 = \Delta r_1 - \Delta r_2 \quad (3 - 4)$$

由方法 A 及 B 之觀測結果進行分析都可以同時計算出點位座標及兩天線間之相對相位中心偏移改正量。

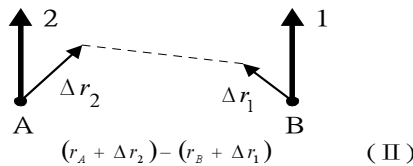
以此方法計算時，為了避免法方程式奇異，全部測站座標約制在 ±3mm。經過旋轉的天線，天線偏移水平分量自由解算，垂直向偏量則約制在 ±5cm。為避免多路徑效應之影響而使成果惡化，低於仰角 20° 以下之 GPS 資料不使用。

以天線互換的方法可以求得天線間水平及垂直之相對偏移量，而以天線旋轉 180° 的方法，只能求得天線間水平相對偏移量。

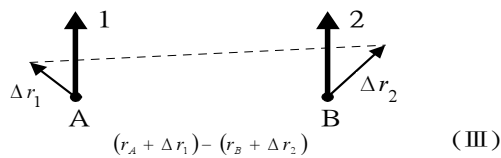
SESSION I



SESSION II



SESSION III



SESSION IV

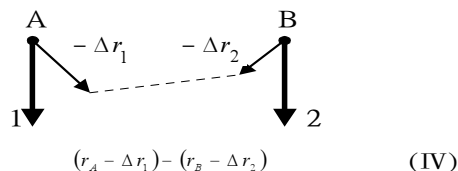


圖 3 - 2 同時求解天線相位中心偏移量及測站座標方法

測定天線隨仰角及方位角改變之相位中心變化量：

Bernese GPS 軟體，提供了計算與仰角及方位角相關之相位中心

變化量改正模式。分別以：

(1) 逐段式線性函數(piece-wise linear function)

(2) 相位中心變化之球諧函數展開式係數 (Rothacher et al.,1995) ,

$$\Delta\phi(\alpha, z) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{p}_{nm}(\cos 2z) \cdot (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha) \quad (n \geq m) \quad (3-5)$$

$\Delta\phi(\alpha, z)$ = 於天頂距 z , 方位角 α 之相位中心改正 ,

\tilde{p} : 正規化之 Legendre 函數 (Schare et al., 1995, equ.(6)) ,

a_{nm} 及 b_{nm} 為待求之球諧函數係數 , 為避免法方程式奇異 , a_{00} 不能求。

以實測 GPS 觀測法測定相位中心變化時 , 必須要有測站之已知座標 , 其精度須在 $\pm 1\text{mm}$ 以內 (至少高程須達到此要求) 。 GPS 法只能求出相對之相位中心改正量 , 因此 , 至少要有一組天線是用 ”實驗室法” 推求之相位中心變化當作已知值。

3-3 實驗室法與實測 GPS 觀測法之比較

根據 Rothacher 於 1995 之研究指出 , 以混合不同形式天線於長基線進行量測時 (基線長約 1200 公里) , 其量測結果與 ITRF93 之值相比較 , 使用實驗室法所獲得之絕對改正量於 GPS 計算時 , 於基線長度值會造成約 1.5 公分之誤差 (0.015ppm 尺度誤差) , 而使用實測 GPS 觀測法之改正值時 , 並沒有發生此類的誤差 , 因此 , 以實驗室法測定之相位中心變化進行 GPS 改正 , 仍存在可議之處。

在實用上 , 使用者利用 GPS 從事高精度量測時事基於 ”相對” 定位技術 , 只要知道天線間相對的改正量就可以了 , 也許不須實驗室法之絕對量 , 因此 , 利用各種天線之 GPS 觀測量及已精確量測之測點來推測天線間之相對改正量 , 是一項經濟且實用的方法。

第四章 實驗說明及資料處理

由第三章中可得知，以實驗室法進行 GPS 天線相位中心之率定，不僅需要設置無反射電波實驗室進行試驗，且其成果目前仍有可議之處，相對之下，以實測 GPS 觀測方法，測定天線相位中心變化，不僅容易進行，且對 GPS 測量高程精度之改進具有顯著之效果，因此，本研究將以實測 GPS 觀測法進行 GPS 天線相位中心之率定。

本章將針對本研究之實驗步驟、率定天線之型式及 GPS 資料處理方法作一介紹。

4-1 實驗步驟說明

- 一、首先挑選適當的地區，建立 GPS 天線相位中心率定測網，測網應考慮可同時放置多種型式天線（5~6 種或以上），且測網要有利於 GPS 觀測，及可避開干擾或多路徑效應。測點設置採強制定心方式，即每一次整置天線皆可定心至同一位置。
- 二、將待率定之天線整置於已知座標之測點上，進行連續多天之 24 小時觀測。進行天線互換測站及天線旋轉等測試。天線旋轉為天線於觀測時段內改變不同之方位，方位改變分別為 0° ， 90° ， 180° ， 270° ；改變方式有：
 - A. 所有天線同步改變
 - B. 不同步改變天線方位
- 三、進行 GPS 資料分析，探討相位中心不作修正時，檢視其影響 GPS 成果（相較於已知測點座標）之大小及其各座標之分量。
- 四、處理 GPS 資料未知數時，同時求解相位中心改正模式之相關係數： r_0 及 $f(\alpha, z)$ ；其中， r_0 是相位中心偏移量，相位中心變化量 $f(\alpha, z)$ 為一與方位角和天頂距相關之函式，此函式將分別以多項式及球諧函數來描述天線相位中心相對於平均相位中心的變化情形。
- 五、分析同型天線間之差異，並推求不同天線間之相對改正量，尋求一種一般化的改正模式或改正函數之係數，提供給使用者對觀測量進行相位中心變化之修正，以進一步改善 GPS 高程之偏差。
- 六、進行相位中心改正模式測試。

4-2 試驗相關說明

本試驗測網建立於中央研究院地球科學所頂樓，各測站之通視性良好，應可避免多路經效應之影響，測點之相關位置如圖 4-1。

4-2-1 試驗天線相關資料

本研究所試驗之 GPS 天線廠牌包括 Trimble、Ashtech 及 Leica 等，其中，Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n：0220049315 為本試驗之參考天線（reference antenna），此天線之相位中心偏移量及相位中心變化量等數據，採用 IGS 公佈之此型式天線改正值，因此，本試驗所率定之天線相位中心偏移量及相位中心變化量，皆相對於 IGS 公佈之率定值。本試驗所率定之天線型號及序號如下表 4-1 所示：

天線相位中心偏移量是相對於天線之物理中心水平及垂直向的偏差量，此天線物理中心除了製造廠商公佈之位置外，IGS 也訂定了相關的天線物理中心參考點，此天線參考點一般以 ARP（antenna reference point）表示。一致的 ARP 對於天線相位中心變化率定而言相當重要，建議 GPS 使用者應以 IGS（International GPS Service）公佈之 ARP 為天線物理中心，如此，進行天線相位中心變化改正才能有一致性的成果並利於成果交換，IGS 公佈之 ARP，相關說明如下圖 4-2, 4-3 及 4-4:

表 4 - 1 試驗天線型式及序號

廠牌	接收儀型式	天線型式	天線序號 S/N	天線編號
Trimble	4000SSE	TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	TRM.#9315
Trimble	4000SSE	TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	TRM.#4689
Trimble	4000SSE	TR GEOD L1/L2 GP	0080122231	TRM.#2231
Trimble	4000SSE	TR GEOD L1/L2 GP	0080078476	TRM.#8476
Ashtech	Z-12	700718	12072	ASH.700718
Ashtech	Z-12	700845	12077	ASH.700845
Ashtech	Z-12	700700	11733	ASH.700700
Leica	SR399	INTERNAL	094463	LEI.#4463
Leica	SR399	INTERNAL	095727	LEI.#5727

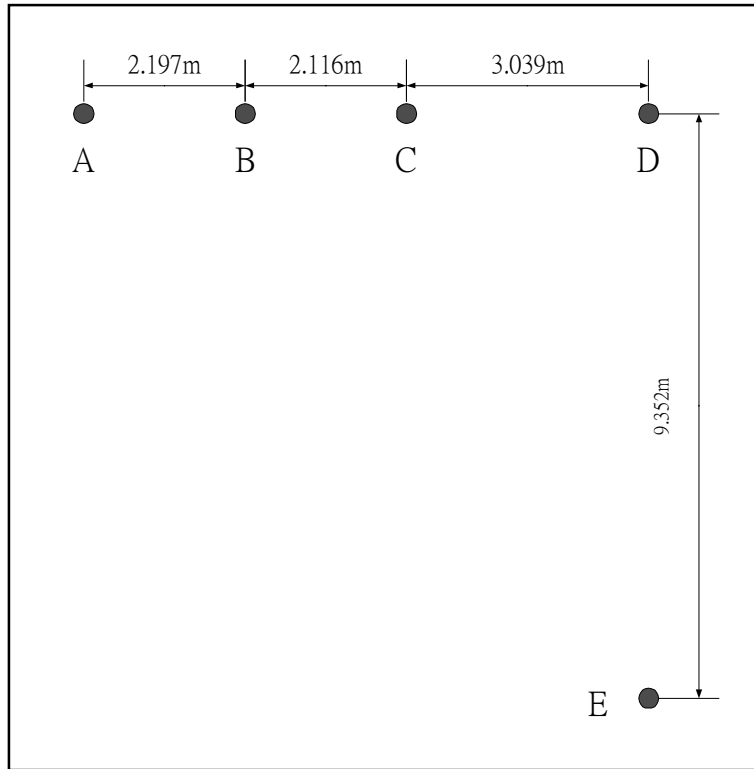


圖 4 - 1 測點之相關位置圖

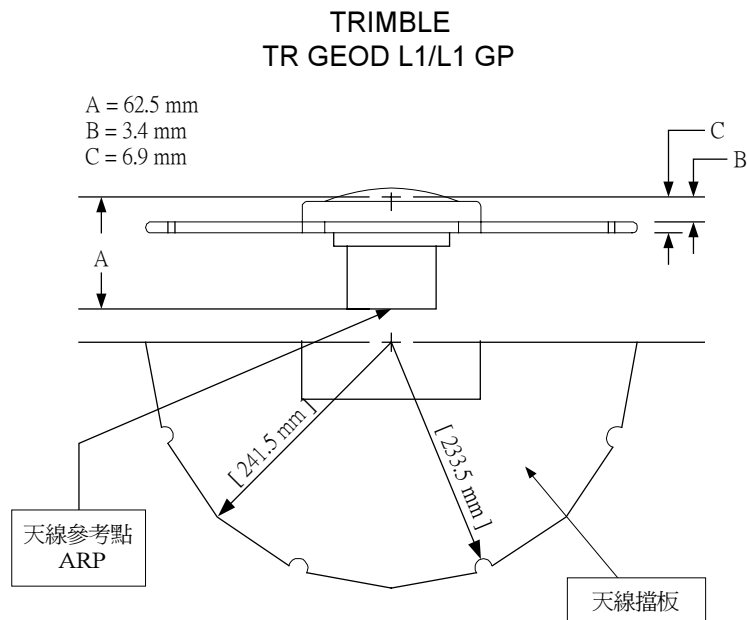


圖 4 - 2 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 天線參考點

ASHTECH
700718 • 700845

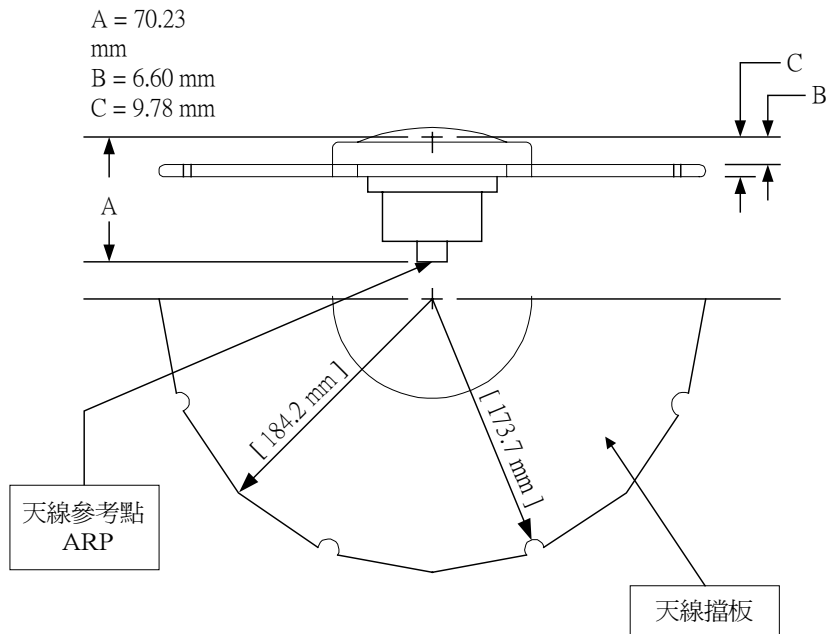


圖 4 - 3 Ashtech 700718 • 700845 天線參考點

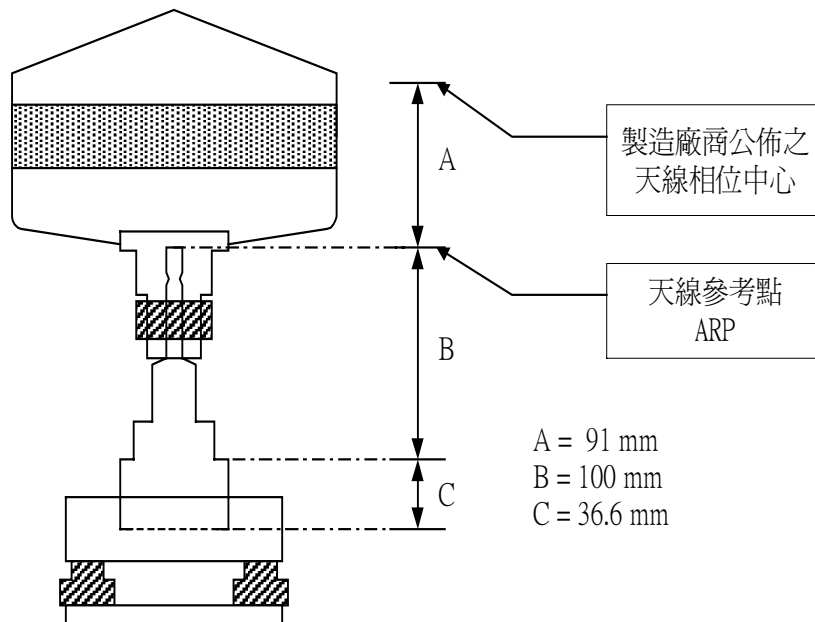


圖 4 - 4 Leica SR399 INTERNAL 天線參考點

4-2-2 試驗天線整置

本試驗共進行 21 天，每日 24 小時之連續觀測，天線整置每日情形如下表 4-2、4-3、4-4 所示，GPS 觀測衛星走勢圖 (Sky Plot) 如圖 4-5 所示，衛星仰角及方位角走勢圖如圖 4-6、圖 4-7 所示：

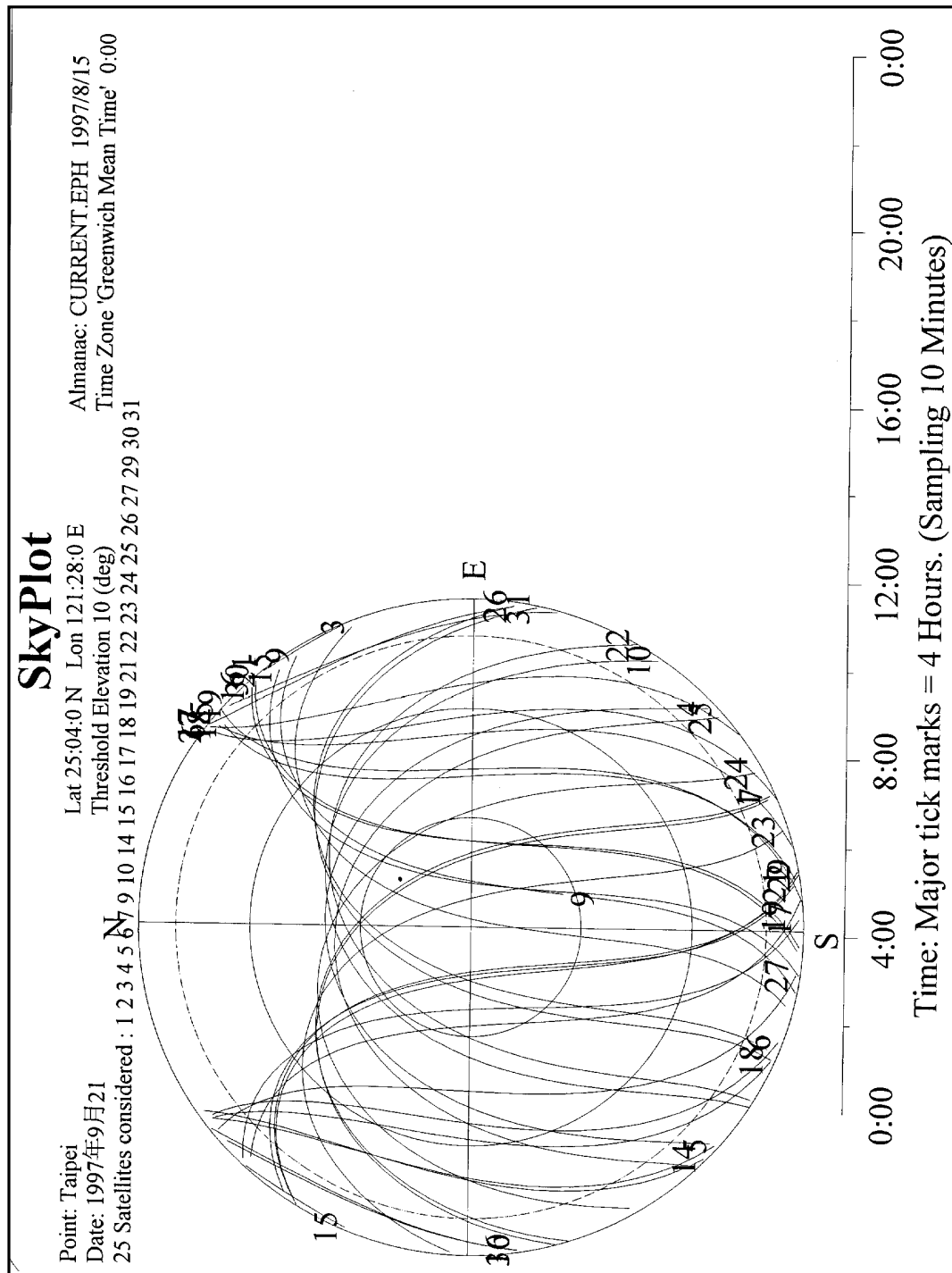


圖 4 - 5 GPS 觀測衛星走勢圖 (Sky Plot)

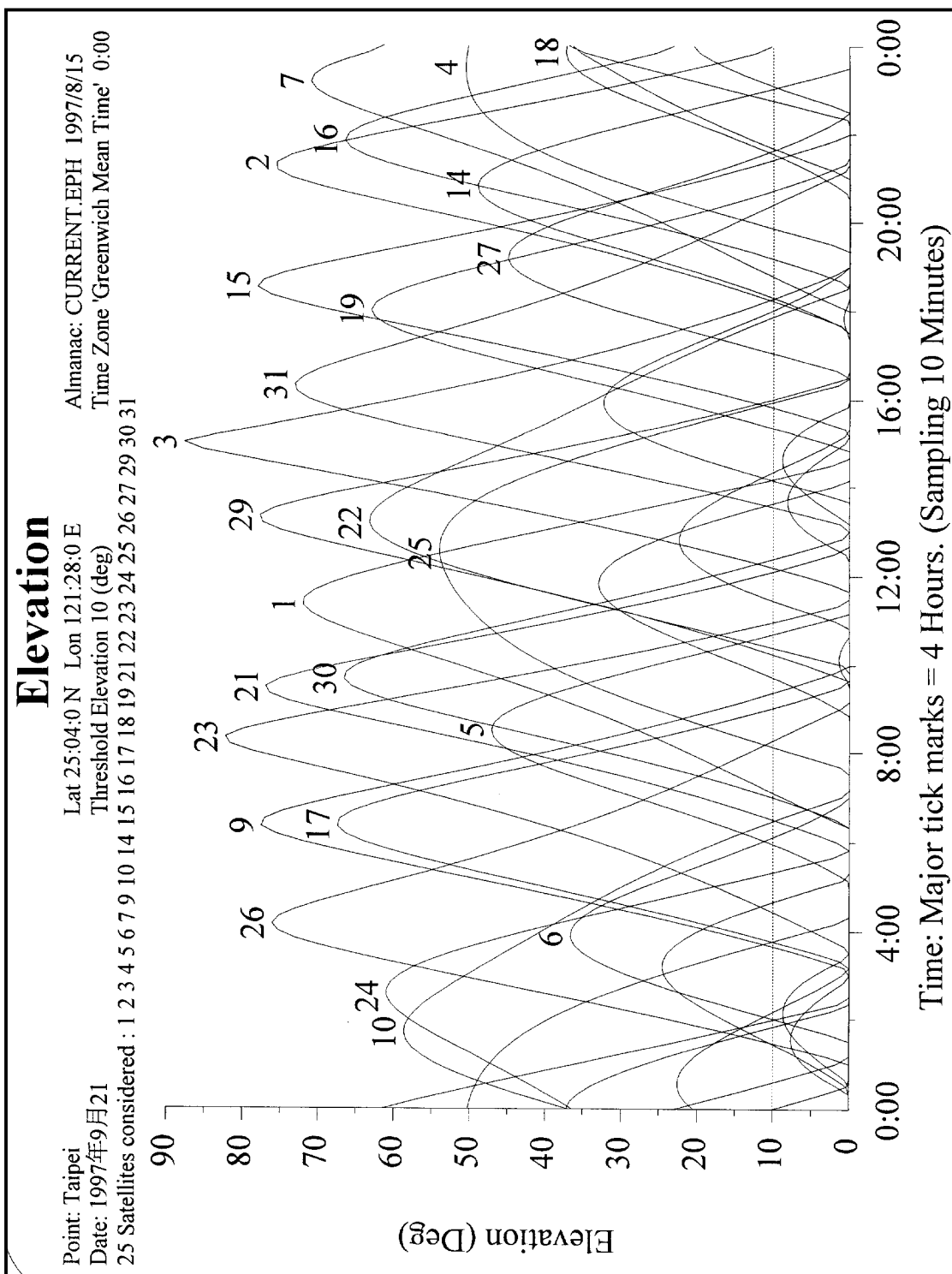


圖 4 - 6 GPS 觀測衛星仰角走勢圖

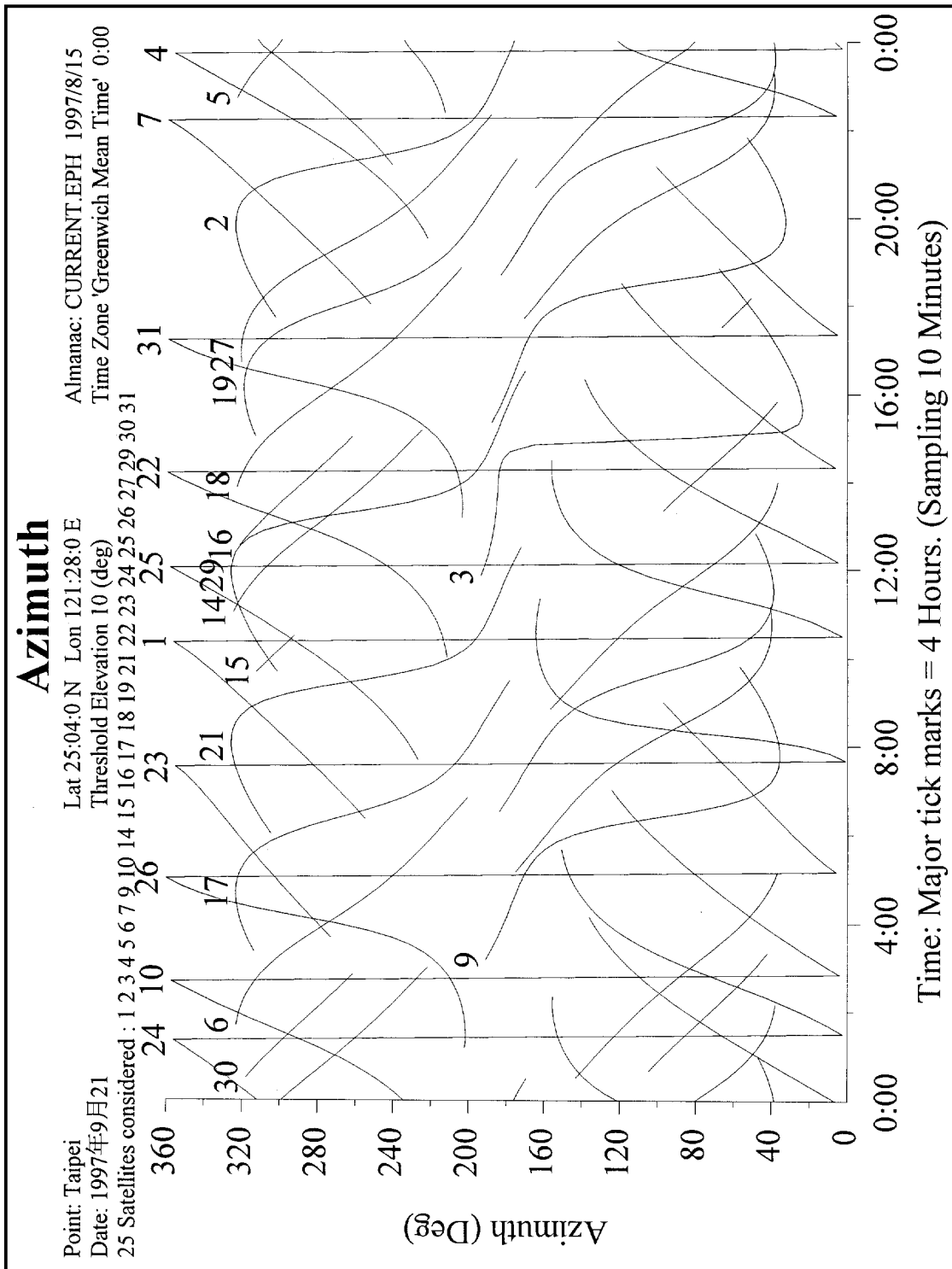


圖 4 - 7 GPS 觀測衛星方位角走勢圖

4-3 資料處理

4-3-1 Bernese 4.0 版軟體介紹及計算流程

本研究中所採用之 GPS 衛星觀測資料處理軟體為 Bernese4.0 版，Bernese 計算軟體是由瑞士伯恩大學天文所(Institute of Astronomy, University of Berne) 所研發的。由於是為研究目的而研發的，除具有一般性 GPS 資料處理功能外。更具有推求軌道參數、極運動 (Polar motion) 參數、地球轉動 (Earth Rotation) 參數、區域性及全球性電離層模式推求、對流層折射附加參數與模擬 GPS 資料之功能

(Rothacher et al., 1996)。此軟體是以 FORTRAN 語言撰寫而成，附有原始程式，可依所需修改，亦可加入新的模式。

GPS 衛星測量資料計算處理流程，如圖 4-8 所示。其概略流程如下：

1. 首先將同時段之原始觀測資料轉換為 IGS 所定義之標準交換格式 (Receiver Independent Exchange Format, 簡稱 RINEX)，再將之轉換成 Bernese 資料格式。
2. 自 IGS 精密星曆檔中讀取各衛星之時錶資訊以供後級處理之用。
3. 將精密星曆 (Precise ephemeris) 轉成表列格式 (Tabular orbit)，再組成 Bernese 格式軌道，作為資料編修與後處理之用。
4. 進行電碼資料之檢查 (Code ckeck)，剔除錯誤之觀測量。
5. 配合精密星曆 (如 SIO、IGS) 之軌道資料以進行單點定位 (Single point positioning)，計算測站座標及接收儀的時錶改正量。
6. 再組成一次差相位觀測量 (Single difference)，即將所有測站依最短基線與最多觀測量之原則，組成線性獨立的一次差觀測量。
7. 進一步利用三次差成果以雙站式之 L1 及 L2 進行週波脫落 (cycle slip) 之偵測與補償。
8. 以此觀測量組成二次差進行各種參數估算。
9. 固定已精確量測之測站座標值，以 IGS 公佈之參考天線相位中心偏移量為參考值，分別解算每一個天線之相位中心平均偏移量。
10. 代入各天線之相位中心平均偏移量，以 IGS 公佈之參考天線相位中心變化量為參考值，計算各天線之相位中心變化量。

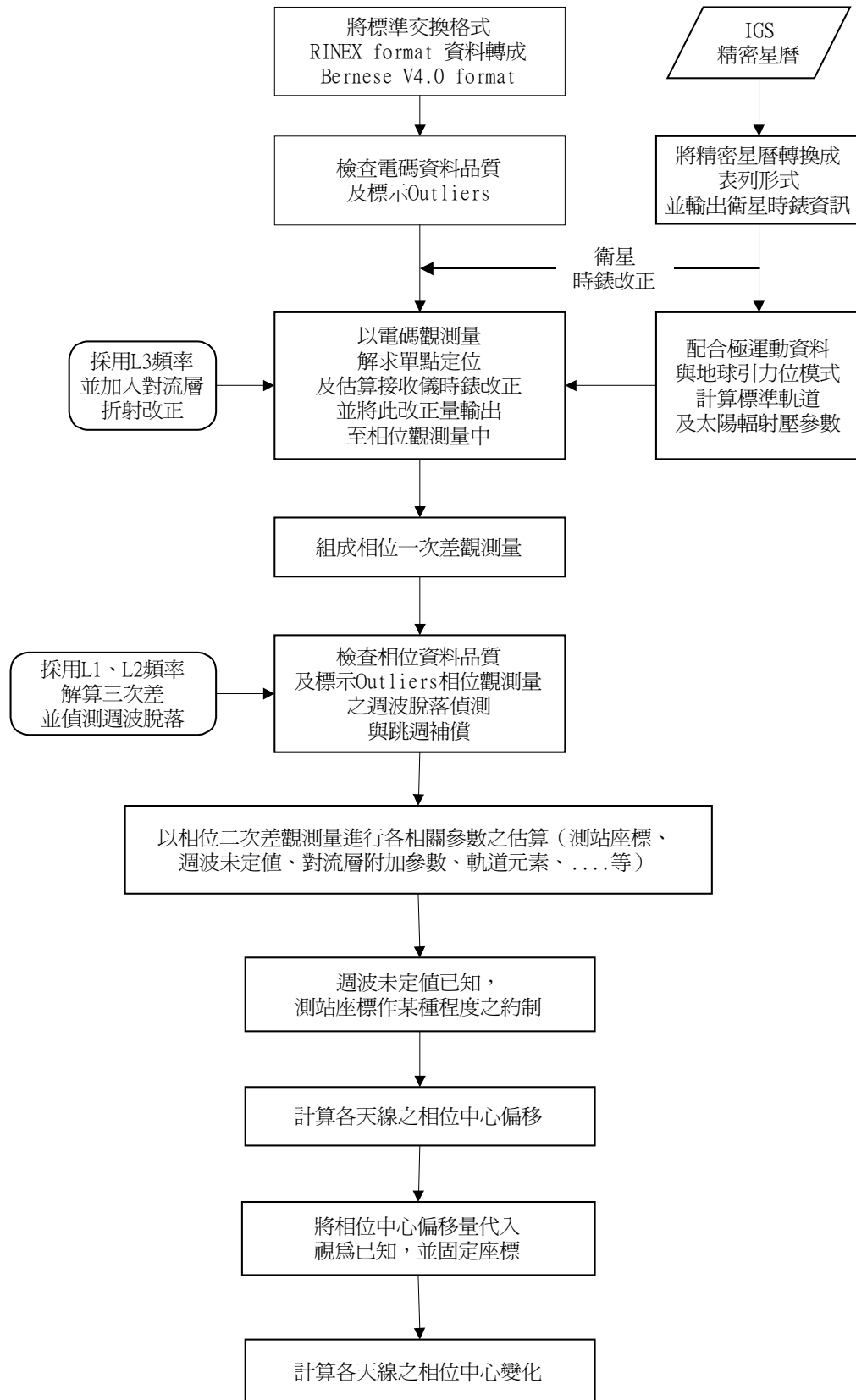


圖 4 - 8 以 Bernese 軟體進行 GPS 天線相位中心變化資料處理流程

4-3-2 GPS 數據處理採用模式

在處理過程中，所採用的模式略述如下：

1. 基本觀測量：選定仰角 20 度以上部分，避免在低仰角度觀測所造成的影響。
2. 軌道部分：採用 IGS 精密星曆。因精密星曆的軌道精度約可達 20 公分，因此所有軌道參數視為已知，固定而不加以求解。
3. 對流層延遲修正：採用 Saastamoinen 修正模式，以海平面標準氣象資料，推求各測點的對流層修正起始值。
4. 固定站部分：以測點 A 為參考座標，引測至其他各點。
5. 極運動改正：採用 IERS(International Earth Rotation Service)Bulletin B 所公佈之值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正之，並將座標值由瞬間極之座標系修正至 J2000 座標系上，以為軌道計算及座標轉換等之應用。
6. 引力位模式：採用 GEM-T3 (Goddard Earth Model T3) (8×8)，以為軌道計算及座標轉換之應用。
7. 相位未定值求解之過程：先以寬巷 L_5 觀測量求解整週波數未定值，再將解得寬巷之未定值代入無電離層效應 L_3 之觀測方程式中，分別求解 L_1 及 L_2 未定值，此時測站座標和未定值是一併求解的，每一次累算只固定一個未定值成整數，直到不再有未定值可固定成整數為止。
8. 相位中心偏移量計算是以 IGS 所公佈之 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 天線之相位中心偏移量為參考值，推算其他各天線之相對偏移量。相位中心變化量亦是以 IGS 公佈之相位中心變化量為參考值，推算其他各天線之相位中心變化值。

第五章 研究成果與分析

本研究共率定了三種廠牌，五種型式之天線。其中，是以 Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n: 0220049315 此天線為參考天線，其相位中心偏移量及相位中心變化量，均以 IGS 公佈之此型式天線的改正值為參考值。以 Bernese V4.0 軟體計算其他天線之相位中心改正值。分別以天線互換測點及天線旋轉等方式，計算各天線之相位中心偏移量，再將此天線偏移量代入模式中視為已知計算各天線之相位中心變化量（相對於平均相位中心）。本章將比較以天線互換測點及天線旋轉所測得之相位中心偏移量的差異，分析其優缺點，建議一較可行的天線相位中心偏移量率定方法。並將比較各天線相位中心隨信號仰角變化的模式，探討其對 GPS 測量所造成之影響。另外，將與 NGS (National Geodetic Survey) 及 IGS 所公佈之各天線相位中心率定值進行分析比較。

5-1 相位中心偏移量率定結果

相位中心偏移量的率定，是以各天線於測點所測得之座標值與精確座標值比較而得。如第三章所示，各天線相位中心偏移量，可分別以天線互換測點及天線旋轉等方式求得，應用 Bernese 軟體，可同時解算各測點之座標值與天線相位中心偏移量，但須將其中一天線視為參考天線，其相位中心偏移量視為已知（代入 IGS 公佈之值）。在進行天線相位中心偏移量計算時，各測站座標固定為已知座標值，相位中心偏移量標準差於水平方向約制為 0.017m，垂直方向則約制在 0.05m。為避免多路徑效應影響，仰角低於 20° 的信號不列入計算。

Trimble 天線相位中心偏移量率定結果

Trimble TR GEOD L1/L2 GP 各天線以交換測點方式測得之相位中心偏移量結果如表 5-1 所示，(DOY-261 至 DOY-264 每天所測得之結果如附表 1)。圖 5-1 為各天線偏移量（水平 N 方向、E 方向、垂直 U 方向）的平均值，其中天線編號僅以序號後四碼表示。

表 5 - 1 Trimble 天線相位中心偏移量

天線型式	天線序號 (s/n)	頻率	相位中心偏移(mm)			
			NORTH	EAST	UP	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	1	1.5	-1.2	75.1	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0080078476	1	1.5	-1.3	75.4	
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	1	2.0	-1.2	75.6	
TR GEOD L1/L2 GP	0080122231	1	1.2	-1.5	75.4	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	2	-1.1	1.7	69.2	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0080078476	2	-1.4	1.7	69.4	
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	2	-1.4	1.5	69.4	
TR GEOD L1/L2 GP	0080122231	2	-2.3	1.0	69.5	

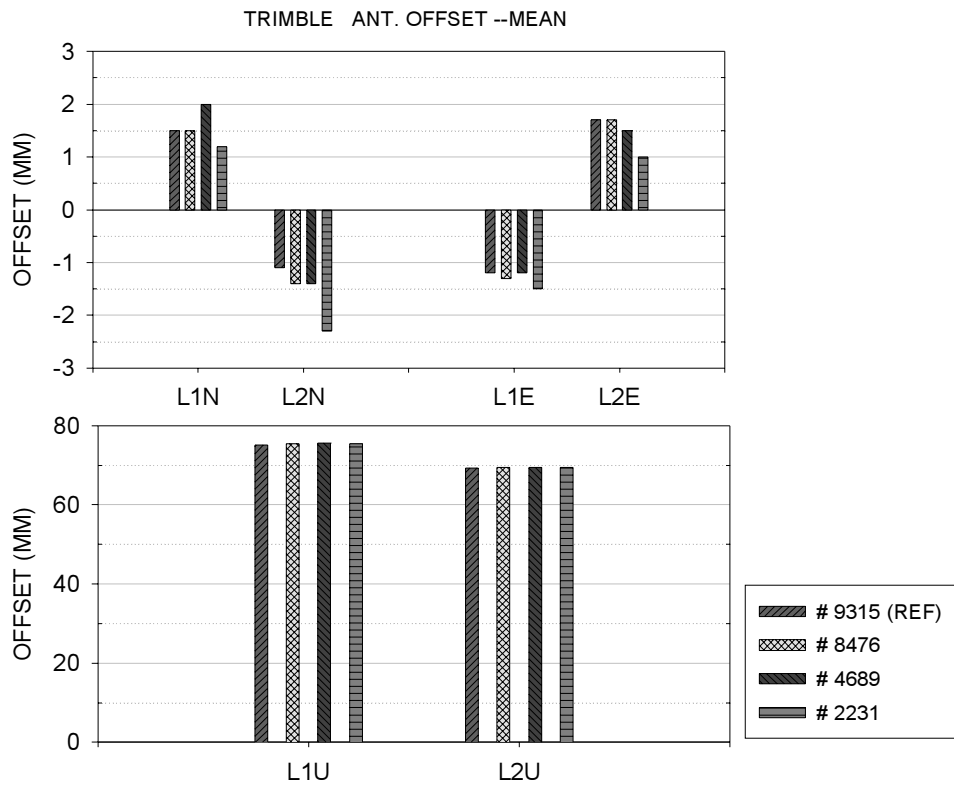


圖 5 - 1 Trimble 天線相位中心偏移量(DOY 261,262,263,264 平均值)

Ashtech 天線相位中心偏移量率定結果

Ashtech 天線包括 700718,700845 及 700700 等型號，各天線以交換測點方式測得之相位中心偏量結果如表 5-2 及圖 5-2 所示，(DOY-305 及 DOY-307 兩天所測得之結果如附表 2)，仍以 Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n: #9315 為參考天線，另並一同率定 Trimble s/n: #4689，以確認其率定結果是否準確。天線編號為序號後兩碼。

表 5 - 2 Ashtech 天線相位中心偏移

天線型式	天線序號 (s/n)	頻率	相位中心偏移(mm)			
			NORTH	EAST	UP	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	1	1.5	-1.2	75.1	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	1	1.8	-1.2	74.7	
ASH 700718	12072	1	-1.9	0.7	83.0	
ASH 700845	12077	1	-2.0	0.6	86.4	
ASH700700	11733	1	-2.8	-0.2	53.8	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	2	-1.1	1.7	69.2	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	2	-1.7	1.5	68.8	
ASH 700718	12072	2	0.4	-0.1	65.4	
ASH 700845	12077	2	0.1	-0.5	68.2	
ASH700700	11733	2	0.2	0.3	53.4	

Leica 天線相位中心偏移量率定結果

Leica 天線為 SR399 INTERNAL 型號天線，各天線以交換測點方式測得之相位中心偏量結果如表 5-3 及圖 5-3 所示，

(DOY-338,340,342,344 等四個時段所測得之結果如附表 3)，以 Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n: #9315 為參考天線，另並一同率定 Trimble s/n: #4689，以確認其率定結果。其中，Leica 天線序號 095727 於 DOY-340 所接收之資料太少，暫不列入計算，天線編號為序號後四碼。

表 5 - 3 Leica 天線相位中心偏移量

天線型式	天線序號 (s/n)	頻率	相位中心偏移(mm)			
			NORTH	EAST	UP	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	1	1.5	-1.2	75.1	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	1	1.7	-1.3	75.2	
LEI. INTERNAL	094463	1	2.1	1.1	117.3	
LEI. INTERNAL	095727	1	1.9	1.2	118.2	
TR GEOD L1/L2 GP	0220049315	2	-1.1	1.7	69.2	REF
TR GEOD L1/L2 GP	0220004689	2	-1.5	1.4	69.4	
LEI. INTERNAL	094463	2	1.9	-2.9	116.6	
LEI. INTERNAL	095727	2	1.4	-2.5	116.2	

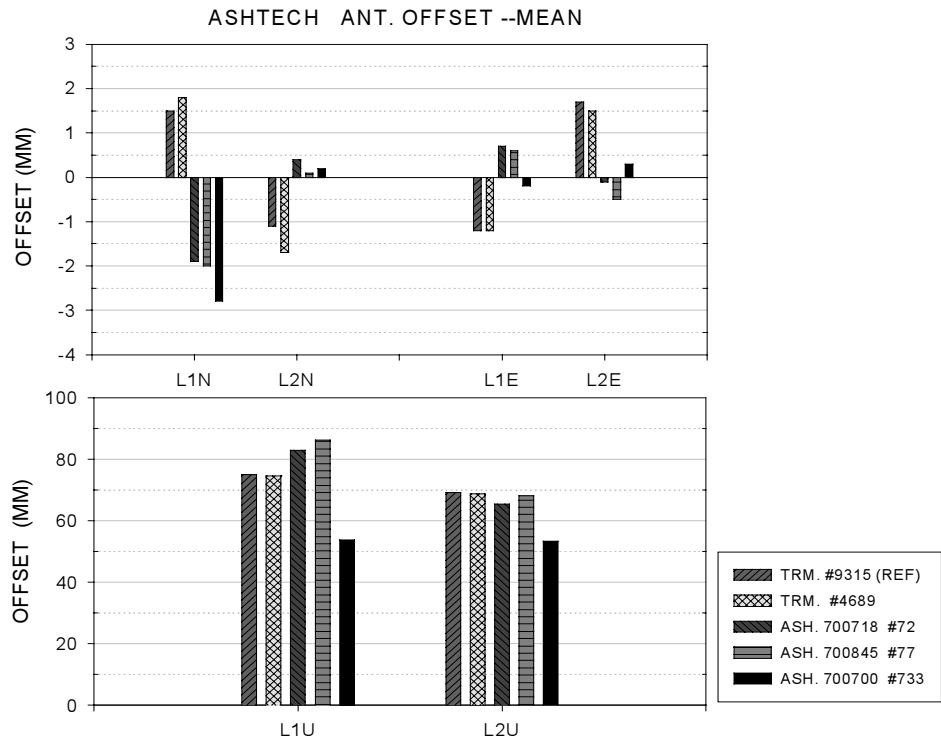


圖 5 - 2 Ashtech 天線相位中心偏移量 (DOY:305,307 平均值)

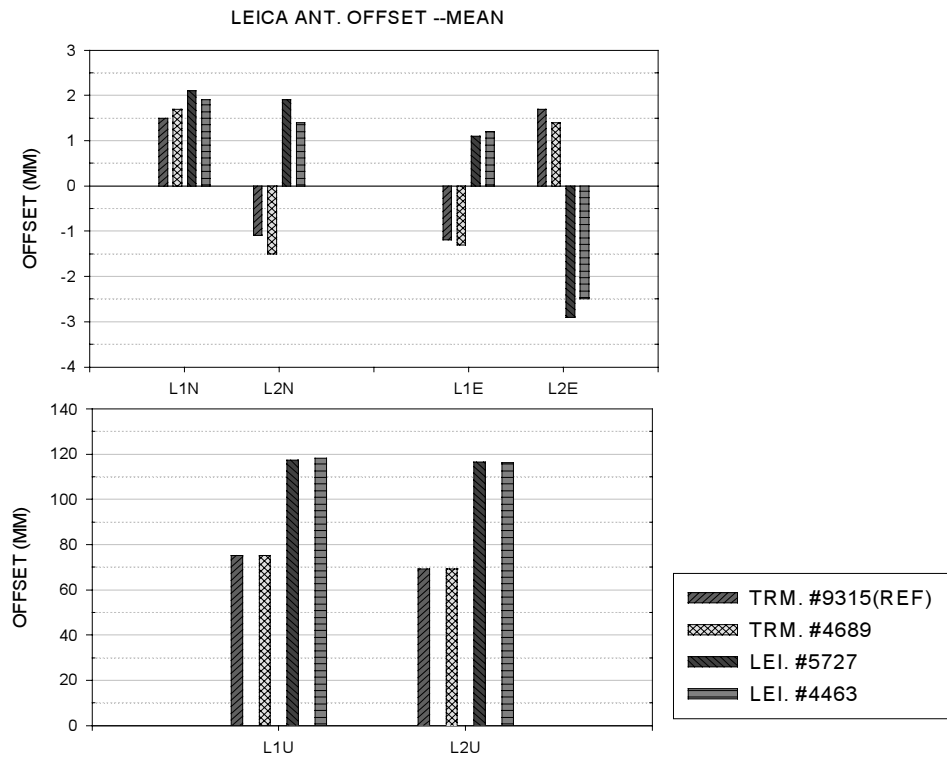


圖 5 - 3 Leica 天線相位中心偏移量 (DOY:338,340,342,344 平均值)

Ashtech 天線以旋轉方式進行相位中心改正之結果

下表 5-4 為 Ashtech 天線分別旋轉 180°，90°，270°（以天線指北方向為準）率定天線相位中心偏移之結果。

表 5-4 以天線旋轉方式進行相位中心偏移率定之比較

	L1天線相位中心偏移(mm)				L2天線相位中心偏移(mm)			
	N	E	N	E	N	E	N	E
天線對準方式	天線對準北方		天線旋轉180°		天線對準北方		天線旋轉180°	
TR #4689	-0.7	0.5	0.7	-0.5	2	-2	-2	2
ASH 700718	-3.4	1.9	3.4	-1.9	4.2	-4.8	-4.2	4.8
ASH 700845	-3.2	1.2	3.2	-1.2	4.5	-5.4	-4.5	5.4
ASH700700	-4.5	1.3	4.5	-1.3	4.6	-4.8	-4.6	4.8
天線對準方式	天線對準北方		天線旋轉90°		天線對準北方		天線旋轉90°	
TR #4689	0.5	1.3	1.3	-0.5	-1.6	-1.5	-1.5	1.6
ASH 700718	5.1	0.1	0.1	-5.1	-2.1	2.4	2.4	2.1
ASH 700845	4	-0.2	-0.2	-4	-2.9	2.4	2.4	2.9
ASH700700	6.7	1.7	1.7	-6.7	-3	0.5	0.5	3
天線對準方式	天線對準北方		天線旋轉270°		天線對準北方		天線旋轉270°	
TR #4689	-1.4	-1	1	-1.4	1.5	1.7	-1.7	1.5
ASH 700718	1	-2.5	2.5	1	-2	3	-3	-2
ASH 700845	1.4	-2.6	2.6	1.4	-1.6	3.2	-3.2	-1.6
ASH700700	1	-3.2	3.2	1	-1.9	3.9	-3.9	-1.9

根據以上之相位中心偏移量率定結果得知，同型天線間之相位中心偏移差異量並不大，Trimble 各天線之差異量接維持在 0.5mm 以下，而 Leica 約在 1mm 以下。但各型天線其 L1 及 L2 之相位中心偏移量並不相同，其中差異最大的為 Ashtech 700718 及 700845 兩種天線的垂直向偏差，高達 18mm。不同型天線之差異；如 Trimble 及 Leica 天線，其相位中心偏移量於水平方向的差異量約 5mm、垂直方向約 40mm。不同型天線相位中心偏移量的差異主要為垂直向的相位中心偏移量，這可能會造成混合不同型天線進行 GPS 量測時之誤差。

以天線交換測站的方式率定天線相位中心偏移量，不僅可求得平面及垂直向的相位中心偏移量，且其效果也相當良好，天線於不同測站率定之相位中心偏移量相當一致，而以天線旋轉的方式進行相位中心偏移量率定，隨天線旋轉角度之改變，相位中心偏移方向改變情形亦相當一致，但如第三章所提，以此方式僅能求得相位中心水平方向的偏移量，無法消除垂直向的相位中心偏移量。

5-2 相位中心變化量率定結果

天線相位中心變化量將分別以線性函數及球諧函數展開式係數求得，將比較其相位中心變化曲線的差異。相位中心變化如第二章所提(Mader,1998)相關研究指出，目前使用中的 GPS 天線，大多數的相位中心變化與方位角是成對稱的，相位中心變化主要是受信號仰角的影響，因此，本研究將探討相位中心隨仰角變化的情形，及其對 GPS 量測精度的影響。

Trimble 天線相位中心隨仰角變化之率定結果

Trimble TR GEOD L1/L2 GP 天線相位中心變化量的率定，是以 #9315 此天線為參考天線，其相位中心變化量為 IGS 公佈之此型號天線相位中心變化量，其餘天線之相位中心偏移量為前述之各天線之平均相位中心偏移量。本試驗是個別考慮單一天線間變化量的差異，因此所代入之天線相位中心偏移量為各天線所率定之的相位中心偏移量。

Trimble 天線隨仰角改變的相位中心變化量，分別以逐段式線性函數及球諧函數展開式係數求得，其中，球諧函數之 $\text{degree } n_{\max}=10$, $\text{order } m_{\max}=0$ (因為僅考慮仰角)，四個觀測天之平均值分別如下表 5-5、5-6 及圖 5-4、5-5 所示：

Ashtech 天線相位中心隨仰角變化之率定結果

Ashtech 天線相位中心變化量的率定，共率定了 700718,700845 及 700700 等型號天線，仍以 TRM.#9315 此天線為參考天線，六個觀測天之平均值分別如下表 5-7、5-8 及圖 5-6、5-7 所示：

Leica 天線相位中心隨仰角變化之率定結果

Leica SR399 Internal 天線相位中心變化量的率定，仍以 TRM.#9315 此天線為參考天線，四個觀測天之平均值分別如下表 5-9、5-10 及圖 5-8、5-9 所示：

表 5 - 5 Trimble 天線相位中心變化—線性函數求得

Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n: #9315 (REF)															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0.0	1.8	4.6	8.1	11.7	14.5	16.1	16.9	16.9	16.2	14.9	13.4	11.9	10.4	9.0
L2	0.0	0.3	0.9	1.8	3.0	4.1	4.9	5.4	5.6	5.6	5.3	4.5	3.6	2.8	2.1
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #8476															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	2.6	4.9	8.5	12.1	14.9	16.4	17.1	17.2	16.4	15.1	13.8	12.2	10.9	9.3
L2	0	0.3	0.5	1.7	2.6	3.7	4.6	4.9	5.4	5.2	5	4.3	3.4	2.4	1.7
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #4689															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	3.1	5.1	9.1	12.5	15.1	16.7	17.4	17.5	16.8	15.4	14.2	12.3	11.3	9.7
L2	0	0.5	1	2.1	3	4	5	5.2	5.7	5.5	5.3	4.7	3.6	2.8	2.4
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #2231															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	2.7	4.7	8.6	12.1	14.8	16.5	17.3	17.4	16.6	15.2	13.9	12.1	11	9.5
L2	0	0.4	0.8	2.1	3	3.9	5.1	5.2	5.6	5.6	5.2	4.7	3.5	2.8	2.1

表 5 - 6 Trimble 天線相位中心變化--球諧函數求得

Trimble TR GEOD L1/L2 GP s/n: #9315 (REF)															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0.0	1.8	4.6	8.1	11.7	14.5	16.1	16.9	16.9	16.2	14.9	13.4	11.9	10.4	9.0
L2	0.0	0.3	0.9	1.8	3.0	4.1	4.9	5.4	5.6	5.6	5.3	4.5	3.6	2.8	2.1
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #8476															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	1	3.7	7.2	10.8	13.6	15.1	15.8	15.8	15.1	13.8	12.4	10.9	9.5	7.9
L2	0	0.4	0.8	2.1	3	3.9	5.1	5.2	5.6	5.6	5.2	4.7	3.5	2.8	2.1
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #4689															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.9	3.6	7.2	10.7	13.4	14.9	15.7	15.7	14.9	13.7	12.3	10.7	9.4	7.8
L2	0	0.4	1.2	2.1	3.1	4.1	4.9	5.3	5.6	5.6	5.2	4.7	3.7	2.8	2.3
Trimble TR GEOD L1/L2 GP Elevation-Dependence Variation (mm) #2231															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	1	3.6	7.2	10.8	13.5	15.1	15.9	15.9	15.1	13.9	12.5	10.9	9.5	8
L2	0	0.5	1.5	2.3	3.3	4.4	5.2	5.6	5.9	5.9	5.5	4.9	3.9	3.1	2.3

表 5 - 7 Ashtech 天線相位中心變化--線性函數求得

Reference Antenna : TRM. s/n: #9315															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0.0	1.8	4.6	8.1	11.7	14.5	16.1	16.9	16.9	16.2	14.9	13.4	11.9	10.4	9.0
L2	0.0	0.3	0.9	1.8	3.0	4.1	4.9	5.4	5.6	5.6	5.3	4.5	3.6	2.8	2.1
ASHTECH Elevation-Dependence Variation (mm)															
Type:700718 s/n: 12072															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	4.6	4.9	7.2	10.7	11.9	12.3	11.8	12.3	12.8	12.1	10.9	9.6	6.8	4.3
L2	0	0.81	-1.77	-3.91	-6.45	-7.54	-8.52	-9.73	-8.57	-8.56	-9.16	-9.89	-8.64	-8.22	-9.22
Type:700845 s/n: 12077															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	3.5	5.3	7.5	10.9	12.5	13.2	13.6	13.8	14.1	13.2	11.8	11.2	7.9	6.6
L2	0	-0.31	-0.67	-2.8	-5.23	-6.37	-8	-8.18	-7.55	-7.07	-7.74	-8.08	-7.21	-7.21	-6.17
Type:700700 s/n: 11733															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	7.9	8.2	10.1	11.2	10.3	9.6	9.6	11	11.9	11.7	10.1	9.8	7.1	7.2
L2	0	1.17	0.36	0.79	1.36	2.67	3.83	4.96	5.56	4.23	4.06	3.91	3.23	4.06	-0.48

表 5 - 8 Ashtech 天線相位中心變化--球諧函數求得

ASHTECH Elevation-Dependence Variation (mm)															
Type:700718 s/n: 12072															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.2	1.4	3.9	6.8	8.4	8.5	8.3	8.7	9.1	8.5	7.3	5.9	3.3	1.1
L2	0	-0.35	-1.93	-4.59	-6.72	-7.93	-9.11	-9.79	-9.27	-8.93	-9.76	-10.1	-9.18	-8.79	-9.69
Type:700845 s/n: 12077															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.7	2.5	5.2	8.1	10	10.6	10.9	11.3	11.4	10.5	9.5	8.3	5.6	4.6
L2	0	0.1	-0.52	-2.53	-4.7	-6.22	-7.41	-7.85	-7.21	-6.83	-7.42	-7.6	-6.99	-6.76	-5.55
Type:700700 s/n: 11733															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.9	2.9	4.7	5.4	5	4.1	4.2	5.5	6.4	5.9	5	3.8	2.1	1.8
L2	0	-0.69	-1.45	-1.02	-0.17	0.71	2.15	3.39	3.38	2.78	2.31	1.85	1.93	1.64	-2.43

表 5 - 9 Leica 天線相位中心變化--線性函數求得

Reference Antenna: TRM s/n: #9315															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0.0	1.8	4.6	8.1	11.7	14.5	16.1	16.9	16.9	16.2	14.9	13.4	11.9	10.4	9.0
L2	0.0	0.3	0.9	1.8	3.0	4.1	4.9	5.4	5.6	5.6	5.3	4.5	3.6	2.8	2.1
Leica SR399 Internal Elevation-Dependence Variation (mm)															
s/n: #5727															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	4.4	5.5	7.2	9.6	10.9	11.7	11.5	12.2	12.2	13	10.6	9.9	7.2	4.6
L2	0	-1.8	0.6	-1.2	-0.9	-0.4	1.1	3.8	2.8	1.1	1.9	0	-0.5	-0.8	1.3
s/n: #4463															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	3.3	4.9	6.1	8.8	10	10.3	10.6	10.8	11.3	12	9.4	8.7	6.5	3.5
L2	0	-1	1.1	-0.6	-0.7	-0.9	0.9	3.7	2.9	1.3	2.1	-0.3	0	-1.3	1.7

表 5 - 10 Leica 天線相位中心變化--球諧函數求得

Reference Antenna: TRM s/n: #9315															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0.0	1.8	4.6	8.1	11.7	14.5	16.1	16.9	16.9	16.2	14.9	13.4	11.9	10.4	9.0
L2	0.0	0.3	0.9	1.8	3.0	4.1	4.9	5.4	5.6	5.6	5.3	4.5	3.6	2.8	2.1
Leica SR399 Internal Elevation-Dependence Variation (mm)															
s/n: #5727															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.8	2.6	4.5	6.4	8.1	8.6	8.7	9.1	9.6	9.3	8.3	6.4	4.5	0.9
L2	0	0.2	0.5	0.3	-0.1	0.4	2.4	4.1	3.7	2.4	2.1	1.5	0	0.5	1.3
s/n: #4463															
Z(°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
L1	0	0.6	2	3.9	5.9	7.4	7.8	7.9	8.3	8.8	8.7	7.4	5.6	4	0
L2	0	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.5	1.5	3.4	3.2	2.1	1.6	0.8	-0.4	-0.3	1.7

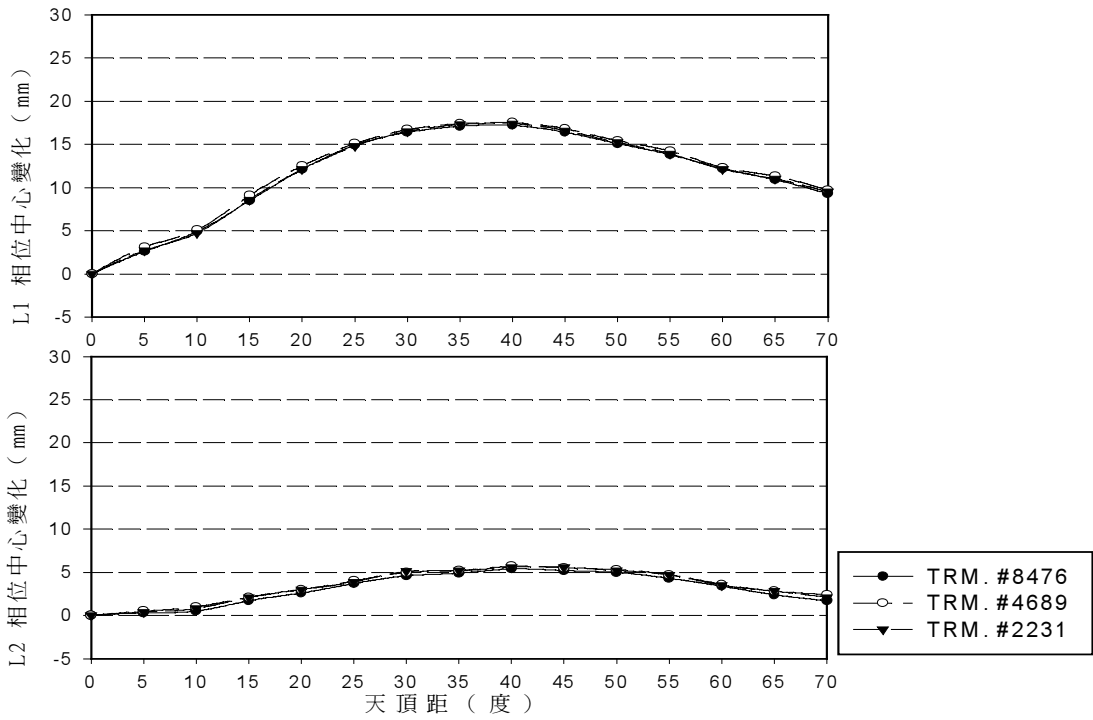


圖 5 - 4 Trimble 相位中心變化--線性函數求得(四個觀測天之平均值)

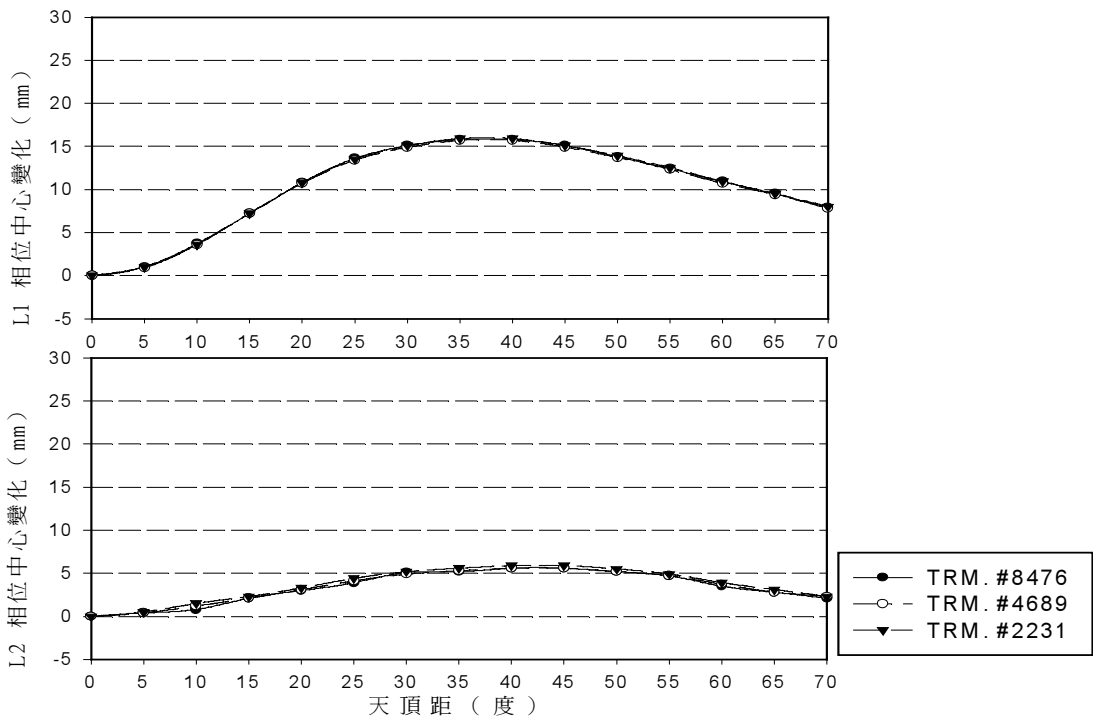


圖 5 - 5 Trimble 相位中心變化—球諧函數求得(四個觀測天平均值)

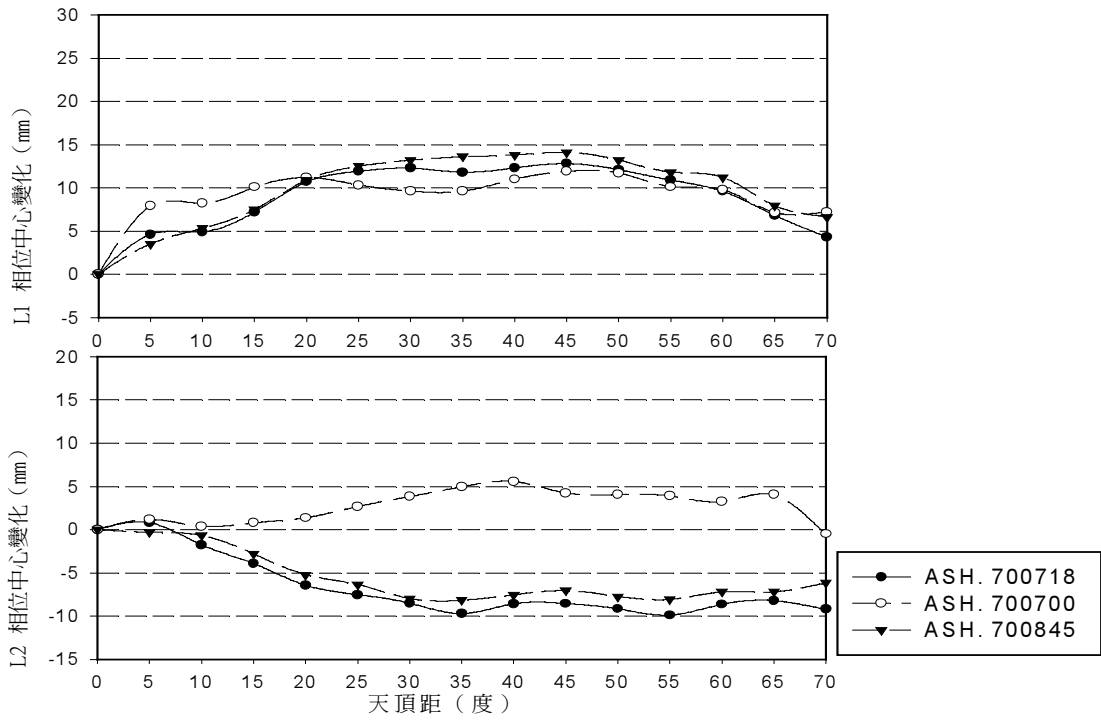


圖 5 - 6 Ashtech 相位中心變化--線性函數求得 (五個觀測天平均值)

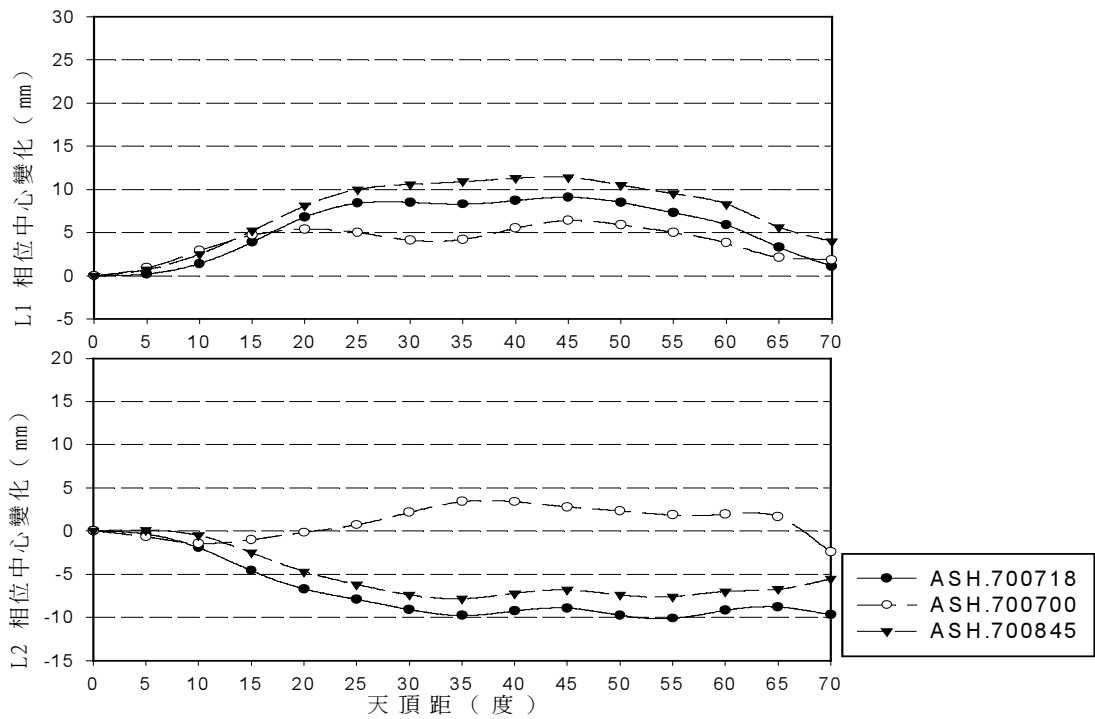


圖 5 - 7 Ashtech 相位中心變化—球諧函數求得(五個觀測天平均值)

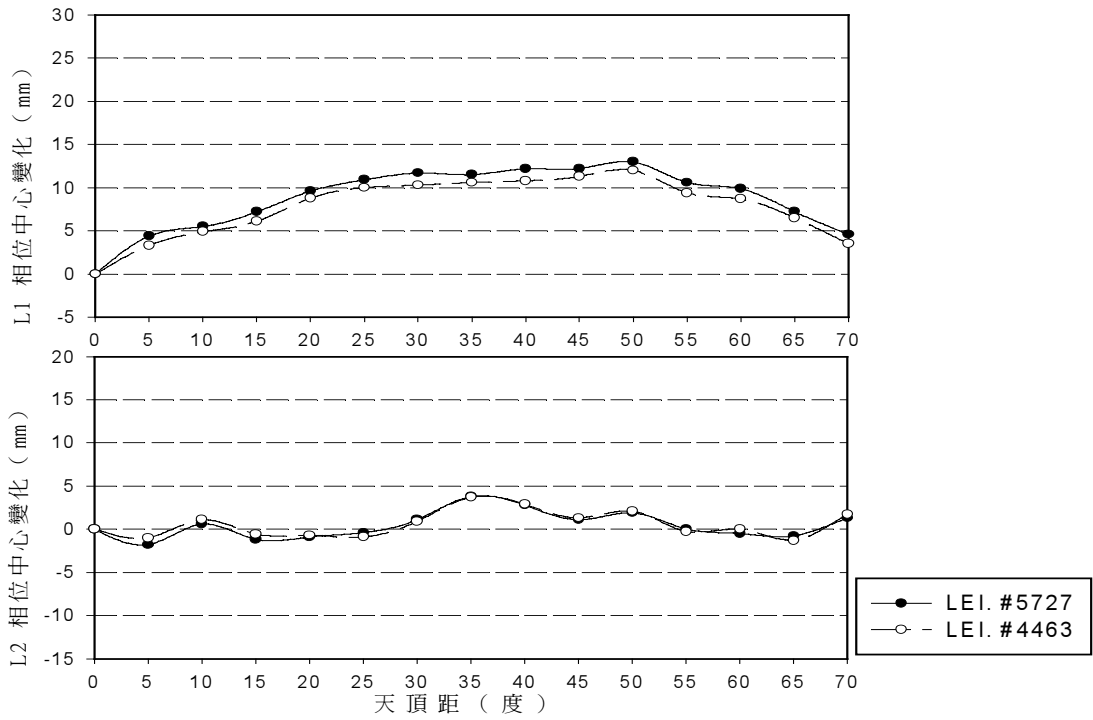


圖 5 - 8 Leica 相位中心變化--線性函數求得 (四個觀測天之平均值)

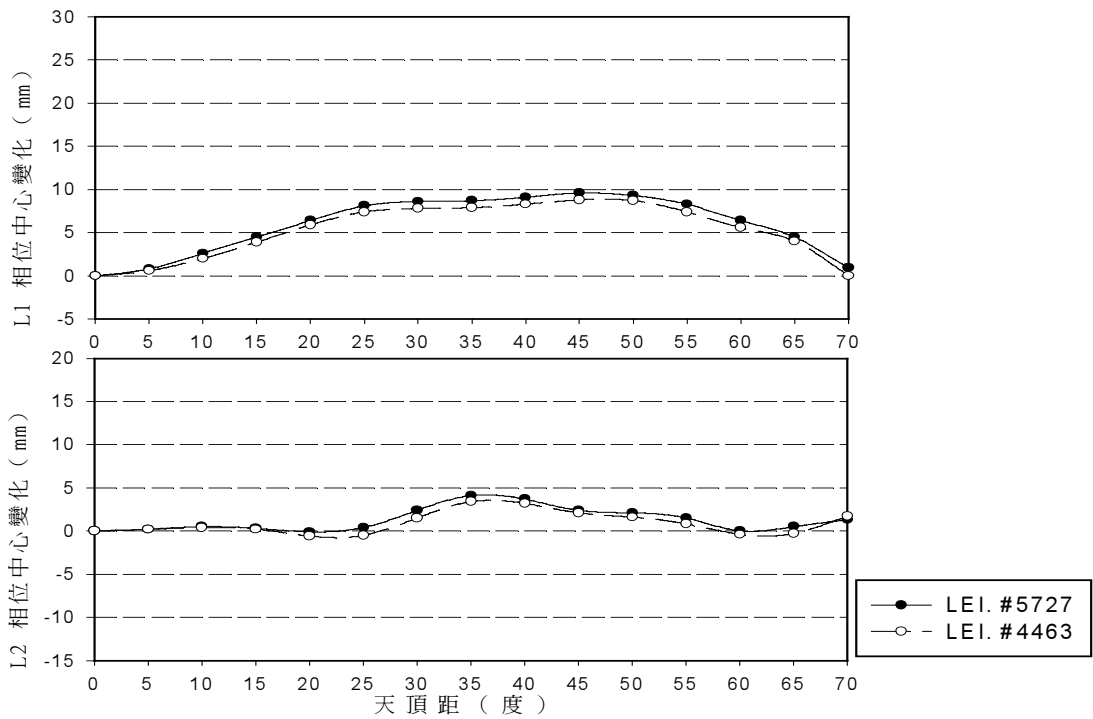


圖 5 - 9 Leica 相位中心變化—球諧函數求得 (五個觀測天平均值)

由以上相位中心變化量率定之結果得知，同型天線之相位中心變化模式相當接近，但 L1 及 L2 的變化情形並不相同，L2 相位中心變化模式一般較 L1 平緩。不同型天線之相位中心變化模式則有較大之差異，如 Ashtech 與 Trimble 及 Leica 之比較。比較由線性函數及球諧函數求得之結果發現，在 Trimble 試驗中，兩者之結果相當接近，但在 Ashtech 及 Leica 的試驗中則有些許差異。因本試驗僅考慮與仰角相關之相位中心變化量，或許並不需要以球諧函數來計算相位中心變化，但若同時考慮方位角及仰角之相位中心變化時，則以球諧函數計算相位中心變化似乎較具物理意義。

5-3 實驗成果之分析與比較

以下將比較本研究所率定之各型天線相位中心偏移量及變化量與 IGS 及 NGS 所公佈值之差異，並將應用於實際 GPS 量測計算中，分析相位中心變化改正對 GPS 精度之影響。

下圖 5-10,5-11,5-12 為本試驗所率定之各型天線相位中心偏移量與 IGS、NGS 公佈值之比較，其中，ASH. 700700 僅有 NGS 率定值，而 LEI 之率定值 IGS 與 NGS 公佈值相同，以下分別為各型天線於 N、E、U 三方向之相位中心偏移量。圖 5-13~圖 5-16 為各型天線之相位中心變化量與 NGS、IGS 公佈值之比較，包括多項式逼近及球諧函數求出之結果，其中，Trimble 及 Leica 同型天線求出之結果相當接近，故僅列出一部天線之結果進行比較。

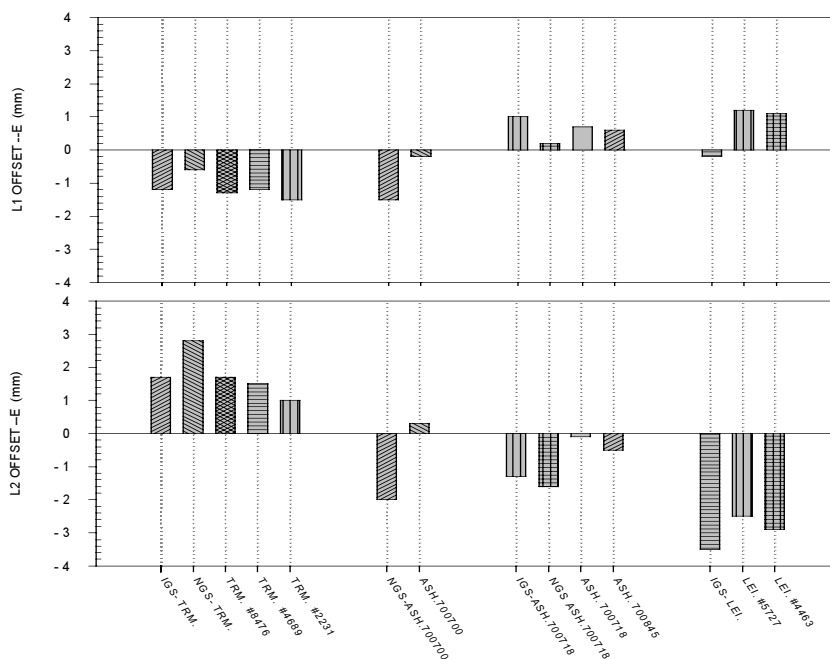


圖 5-10 各型天線率定值與 IGS、NGS 公佈值之比較 (N 方向)

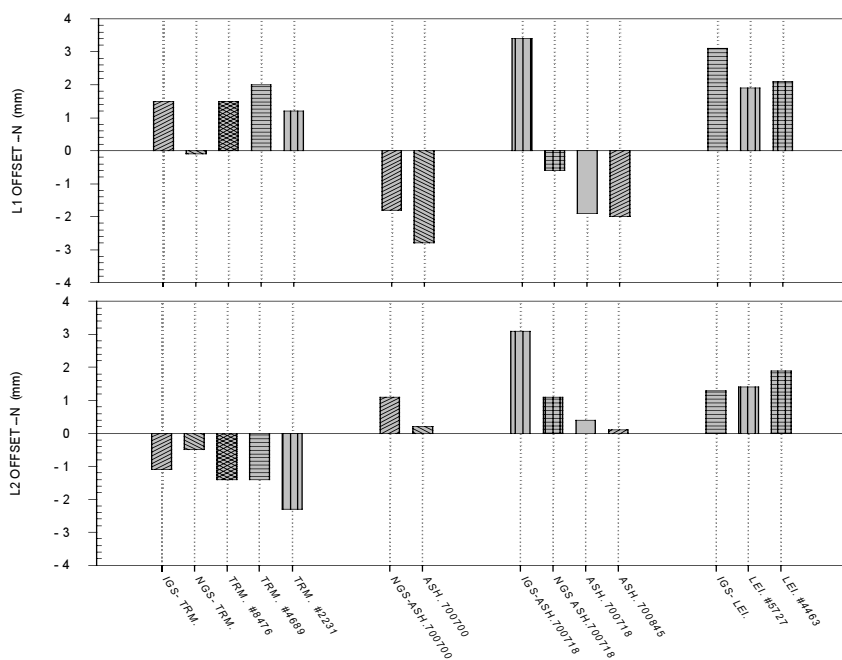


圖 5 - 11 各型天線率定值與 IGS、NGS 公佈值之比較 (E 方向)

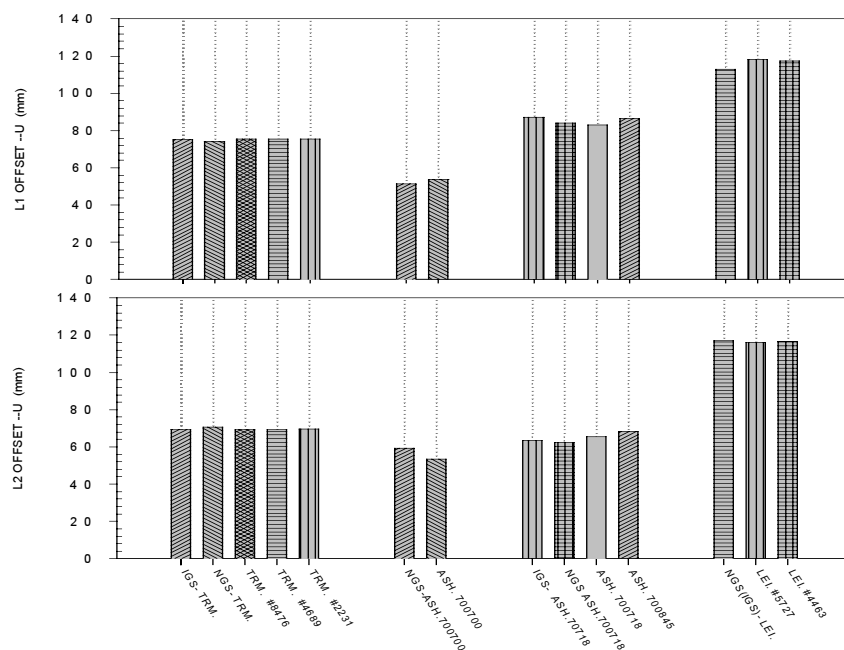


圖 5 - 12 各型天線率定值與 IGS、NGS 公佈值之比較 (U 方向)

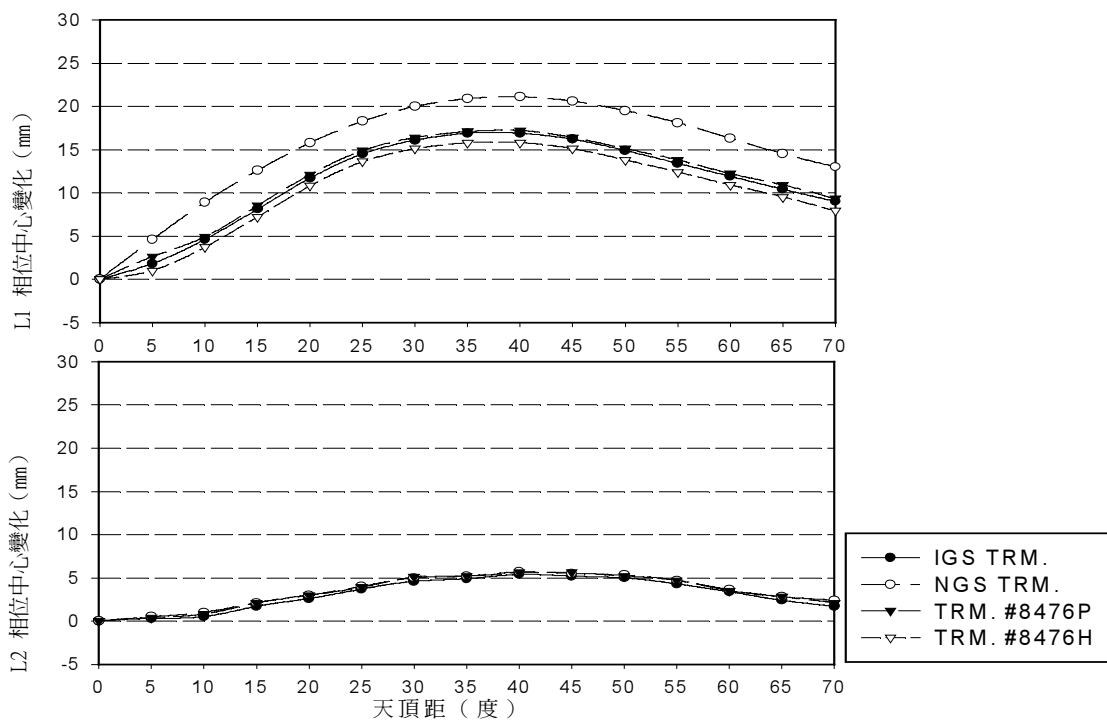


圖 5 - 13 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 以線性函數 (P) 及球諧函數(H)求得之相位中心變化與 IGS、NGS 公佈值之比較

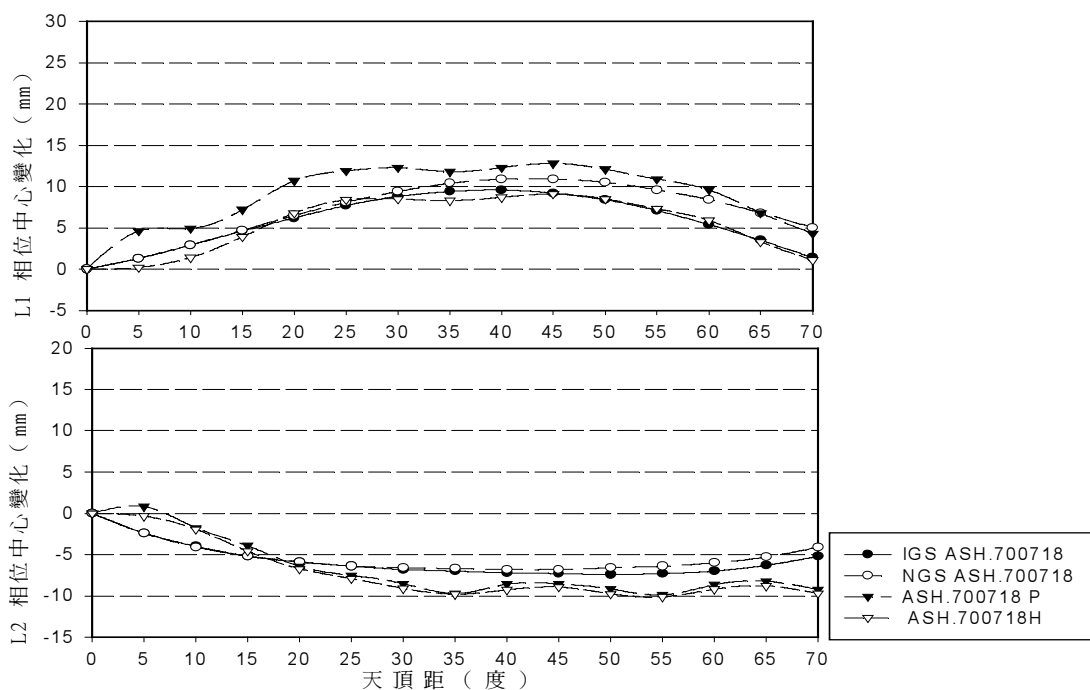


圖 5 - 14 Ashtech 700718 以線性函數 (P) 及球諧函數(H)求得之相位中心變化與 IGS、NGS 公佈值之比較

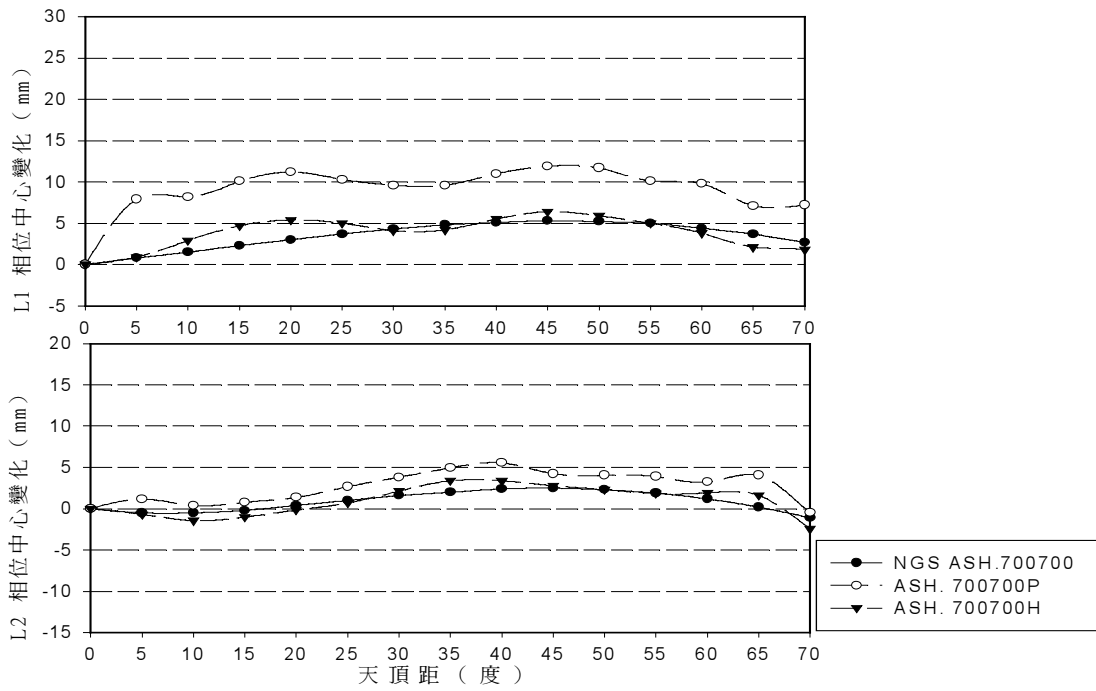


圖 5 - 15 Ashtech 700700 以線性函數 (P) 及球諧函數(H)求得之
相位中心變化與 NGS 公佈值之比較

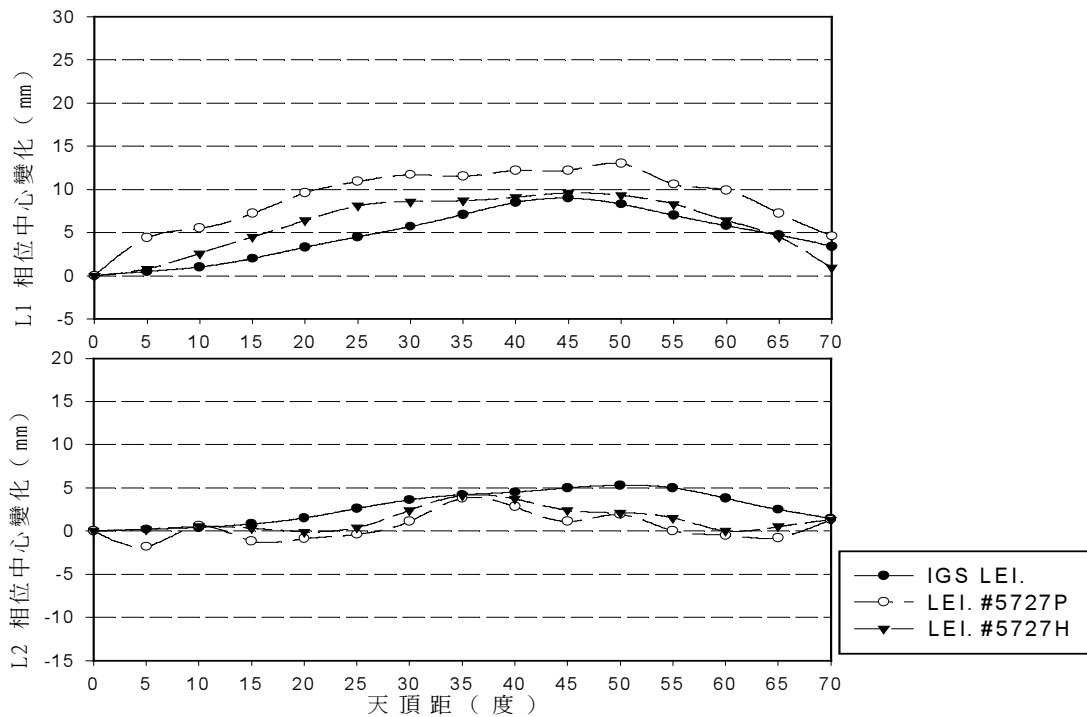


圖 5 - 16 Leica SR399 INTERNAL 以線性函數 (P) 及球諧函數(H)
求得之相位中心變化與 IGS 公佈值之比較

由以上比較發現，IGS、NGS 與本試驗所率定之相位中心偏移量差異並不大，較顯著的差異均發生在垂直向的偏移量，約為 8~10mm(Leica 及 Ashtech 天線)。相位中心變化量部分，以線性函數及球諧函數所得到之結果皆相當接近，Trimble 天線之結果於 L1 部分與 NGS 公佈之值差異較大，但與 IGS 公佈之值則相當吻合，Ashtech 700718 型天線之結果與 IGS 及 NGS 公佈之值有些許差異(最大約為 5mm)，Ashtech 700700 型天線與 NGS 公佈之值差異較大的為 L1 部分(最大約 8mm)，Leica 天線以線性函數及球諧函數所得之結果差異較大，其中以球諧函數所得之結果較接近 IGS 公佈之值。相位中心變化於不同型天線間有明顯差異，即使同型天線其變化模式亦不盡相同。

5-4 GPS 天線相位中心改正於 GPS 測量之影響

本節將比較各型天線於 GPS 量測時，以同型天線進行量測及混合不同型天線進行量測，其相位中心偏移及變化對量測精度之影響。以下列各項試驗所得之座標值與已知座標值比較，計算於水平及垂直向之座標誤差，並比較各種模式之天線相位中心偏移及變化於 GPS 量測時之改正效果，提供一個適當之天線相位中心修正模式。

以同型天線進行量測時：

本試驗所採用之天線為 Trimble TR GEOD L1/L2 GP，一共四部。共進行四個觀測天，以天線 TRM.#9315 為固定站，於不同改正情形之座標誤差值如下表 5-11 所示，每天之座標誤差量如附表

表 5 - 11 同型天線相位中心改正前後之座標標準偏差量

信號頻率	L1			L2			L1			L2		
誤差方向	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
相位中心改正情形	無相位中心改正之座標誤差						偏移量改正後之座標誤差					
	RMS(mm)						RMS(mm)					
TRM. #9315	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2
TRM. #4689	0.6	0.2	2.4	0.3	0.3	2.5	0.3	0.2	1.8	0.3	0.3	2.3
TRM. #2231	0.5	0.4	2.3	1.4	0.8	2.6	0.3	0	2	0.3	0.2	2.3
TRM. #8476	0.2	0.3	2.3	0.3	0.3	2.6	0.2	0.3	1.9	0.3	0.2	2.4

混合不同型天線進行量測時(Trimble-Ashtech):

所採用之天線為 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 兩部與 Ashtech 700718,700845 及 700700 等三種型式天線混合進行量測。共進行六個觀測天，以天線 TRM.#9315 為固定站。於不同改正情形之座標誤差值如下表 5-12 所示，每天之座標誤差量如附表

表 5 - 12 混合不同型天線 (Trimble-Ashtech)

相位中心改正前後之座標標準偏差量

信號頻率	L1			L2			L1			L2		
誤差方向	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
相位中心改正情形	無相位中心改正之座標誤差 RMS(mm)						偏移量改正後之座標誤差 RMS(mm)					
TRM. #9315	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8
TRM. #4689	0.7	0.8	1.6	0.7	0.5	1.2	2.8	3	1	2.9	3.1	1
Ash. 700718	3.5	3.2	9.9	3.4	4.2	16.4	2.8	4.5	6.3	3.5	4.7	11.3
Ash. 700845	3.3	2.6	16	3.5	4.3	9.7	2.5	4.1	1.1	4.1	4.6	8.3
Ash. 700700	3.8	3.3	33.5	3	3.2	20.2	2.3	5.8	6.2	3.7	4.2	8.1
相位中心改正情形	以IGS公佈之偏移量改正後 座標誤差RMS(mm)						以NGS公佈之偏移量改正後 座標誤差RMS(mm)					
TRM. #9315	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8
TRM. #4689	2.4	2.7	1.7	2.9	3.1	1.2	1	1.2	1.7	2.7	5	1.2
Ash. 700718	7.6	2.1	10.6	4.1	5.3	8.8	2.9	3.6	7.8	4	5	6.2
Ash. 700845	7.4	1.5	1.7	4.1	5.6	2	2.9	2.9	2.5	4	5.4	2.5
Ash. 700700	2.3	5.8	6.2	3.7	4.2	8.1	1.9	5.2	5.5	3.9	4.8	7.8
相位中心改正情形	以線性函數求出之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)						以球諧函數求出之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)					
TRM. #9315	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8
TRM. #4689	2.8	2.9	1.1	2.9	3.1	1	2.8	3	1.3	3	3.2	1.1
Ash. 700718	2.5	4.4	5.8	4	4.9	4.8	2.6	4.4	5.6	4	4.9	4.8
Ash. 700845	2.3	4	1.8	4.6	4.8	2	2.2	4	3.3	4.5	4.7	1.9
Ash. 700700	1.6	5.7	5.6	3.6	4.2	7.4	1.6	5.7	5.5	3.6	4.3	7.5
相位中心改正情形	以IGS公佈之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)						以NGS公佈之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)					
TRM. #9315	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8
TRM. #4689	2.4	2.7	1.7	2.9	3.1	1.2	1	1.2	1.7	2.7	5	1.2
Ash. 700718	7.6	2.1	6.9	4.4	5.4	5.1	2.9	3.6	7.8	4	5	6.2
Ash. 700845	7.3	1.3	3.7	4.4	5.7	4.1	2.9	2.9	2.5	4	5.4	2.5
Ash. 700700	1.6	5.7	7.5	3.7	4.2	8.3	1.9	5.2	5.5	3.9	4.8	7.8

混合不同型天線進行量測時(Trimble-Leica):

所採用之天線為 Trimble TR GEOD L1/L2 GP 兩部與 Leica SR399 INTERNAL 天線兩部混合進行量測。共進行四個觀測天，以天線 TRM.#9315 為固定站。於不同改正情形之座標誤差值如下表 5-12 所示，每天之座標誤差量如附表。IGS 與 NGS 公佈之 Leica 此型號相位中心改正值相同，因此僅列出 IGS 相位中心改正結果。

表 5 - 13 混合不同型天線 (Trimble-Leica)
相位中心改正前後之座標標準偏差量

信號頻率	L1			L2			L1			L2		
誤差方向	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
相位中心改正情形	無相位中心改正之座標誤差 RMS(mm)						偏移量改正後之座標誤差 RMS(mm)					
TRM. #9315	-0	-0	2.4	-0	-0	2.4	-0.2	-0.2	2.4	-0.2	-0.2	2.4
TRM. #4689	0.7	0.4	2.5	0.9	1.3	2.4	0.7	0.3	2.4	0.6	1.2	2.2
LEI. #5727	1.1	2.6	52	0.6	2.1	42	0.8	0.3	1.5	0.7	0.7	2.8
LEI. #4463	0.9	2.5	50	2.6	5.2	55	0.6	0.5	1.2	1.0	0.7	2.8
相位中心改正情形	以線性函數求出之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)						以球諧函數求出之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)					
TRM. #9315	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2
TRM. #4689	0.8	0.4	2.2	0.7	1	2.1	0.8	0.4	2.3	0.7	1	2.3
LEI. #5727	0.8	0.4	2.2	0.7	0.4	1.8	0.8	0.4	2.4	0.7	0.4	2
LEI. #4463	0.6	0.5	2.2	1	0.7	3.3	0.6	0.5	2.4	1	0.7	3.2
相位中心改正情形	以IGS公佈之偏移量改正後 座標誤差RMS(mm)						以IGS公佈之相位中心變化 改正後座標誤差RMS(mm)					
TRM. #9315	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2	0.1	0.1	2.2
TRM. #4689	0.7	0.4	2.5	0.9	1.3	2.4	0.7	0.4	2.5	0.9	1.3	2.4
LEI. #5727	1.4	1.3	5.4	1.4	1	4.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.1	1.5
LEI. #4463	1.3	1.5	6.2	0.8	1.2	2.7	1.4	1.5	1.5	1	1.2	4.5

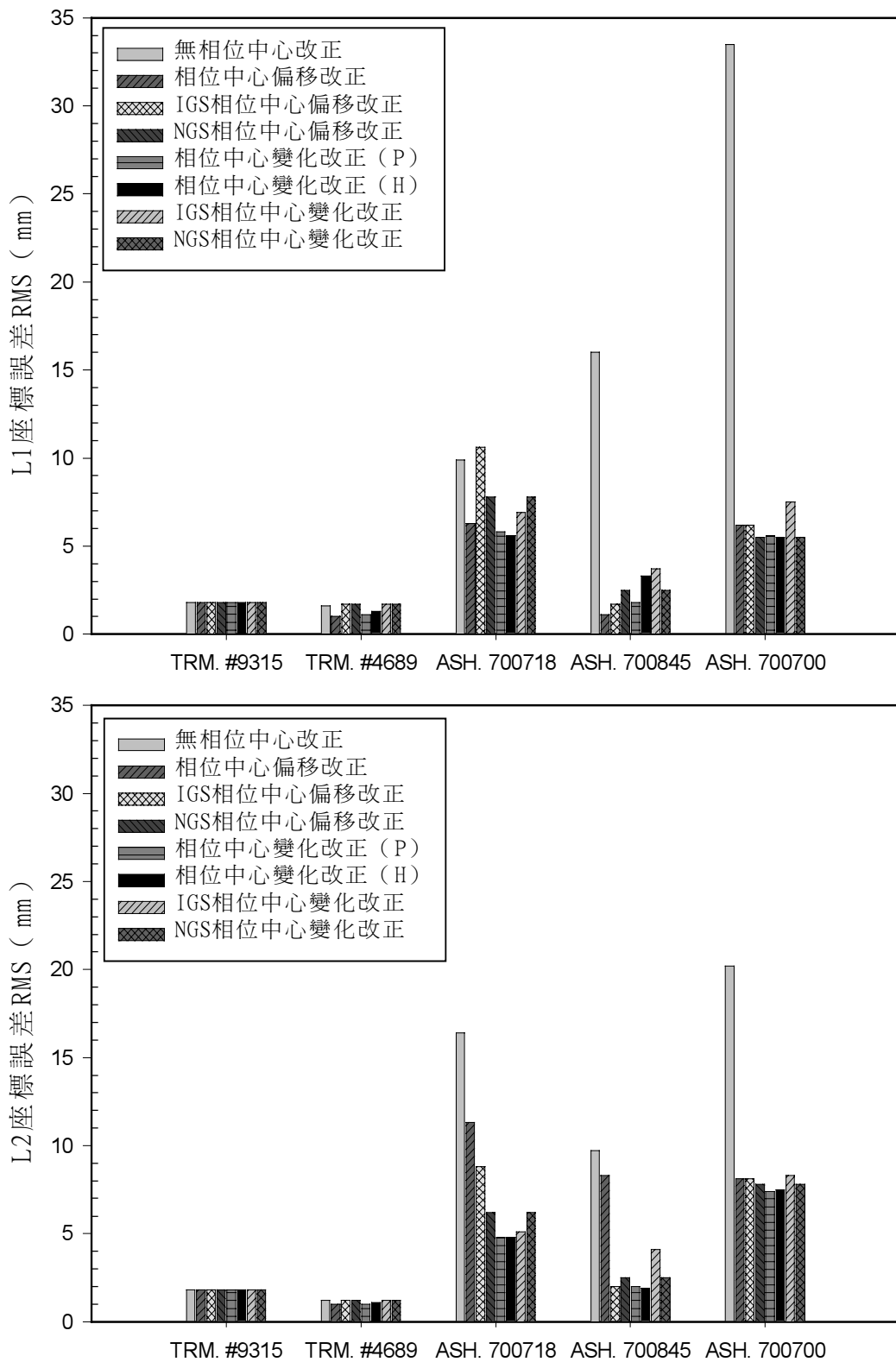


圖 5 - 17 混合不同型天線(Trimble-Ashtech)相位中心改正前後

座標標準偏差—U 方向

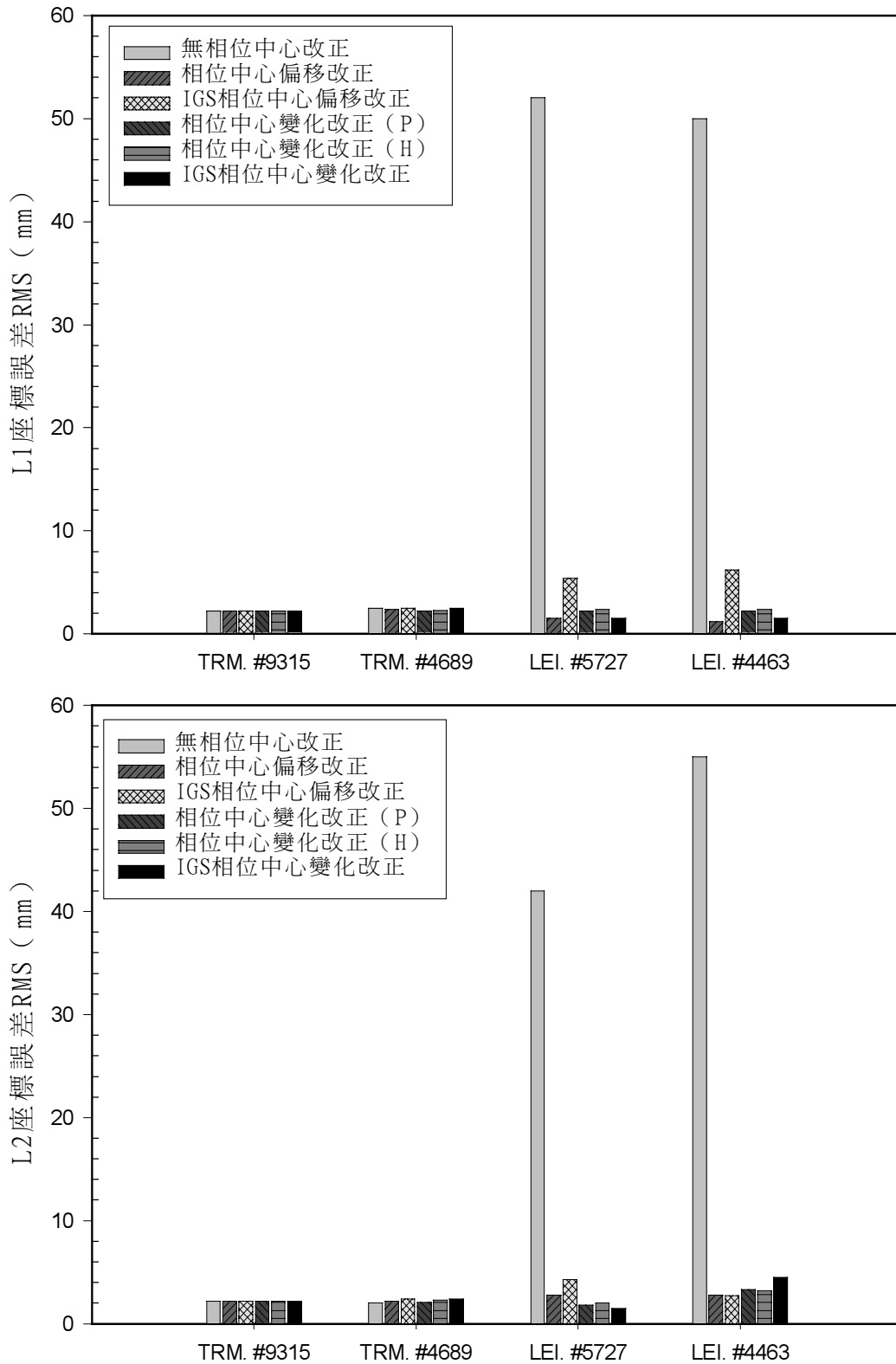


圖 5 - 18 混合不同型天線(Trimble-Leica)相位中心改正前後
座標標準偏差—U 方向

由以上測試之結果得知，以同型天線進行 GPS 觀測時，若不進行任何相位中心改正，於水平方向最大標準偏差約為 1.4mm，垂直向約為 2.6mm(表 5-11)，進行相位中心偏移改正及相位中心變化改正後，水平方向之標準偏差皆維持在 0.3mm 以下，垂直向的標準偏差則約有 0.4mm 的改善，差異並不顯著。

但以混合不同型式天線量測時，Trimble-Ashtech 若未進行相位中心改正，於水平方向的標準偏差最大約 4mm，進行相位中心偏移量及變化量的改正後 L1 標準偏差約為 2~3mm，L2 則較看不出改善的效果，但可明顯發現，以 IGS 公佈值進行改正時，於 L1—N 方向的標準偏差反而增大。

Trimble-Leica 混合時，於水平方向最大的標準偏差約為 5.4mm，但進行相位中心改正後，則標準偏差都維持在 1mm 以下，其中，以本試驗所得之相位中心率定結果進行改正的成果較 IGS 公佈值的改正成果好。

如前所提，相位中心偏移與變化主要影響 GPS 於高程的量測精度，以同型天線 (Trimble) 進行觀測時，若未進行相位中心改正，高程之標準偏差約為 2.5mm，對量測精度並不會造成重大影響，但以混合天線進行觀測若未有相位中心改正時，如 Trimble-Ashtech 高程標準偏差最大達 34mm，Trimble-Leica 最大達 56mm，Ashtech 部分天線進行相位中心偏移量改正後，仍有約 10mm 的標準偏差，但再進行相位中心變化量改正後，標準偏差可減小至 5mm 左右。Leica 天線進行相位中心偏移量及變化量改正後，其標準偏差約為 3mm，相位中心變化量改正部分與僅相位中心偏移量改正差異不大，原因應是 Trimble 天線與 Leica 天線之相位中心變化模式並無顯著差異。

從以上成果亦可看出，整體而言，以本試驗所率定之個別天線相位中心偏移及變化進行改正時，較以 IGS 或 NGS 公佈值 (其值為同型式多天線之平均值) 進行改正時，更能提高 GPS 的量測精度，另外，以線性函數及球諧函數求得之相位中心變化，應用於相位中心改正時，並無明顯差異。

第六章 結論與建議

本研究採用實測 GPS 觀測法進行 GPS 天線相位中心率定，並進行相位中心改正對 GPS 精度影響之測試，由成果之比較與評估，作成結論及建議如下：

- 一、GPS 天線相位中心變化對 GPS 高程量測精度的確造成影響，尤其在混合不同型天線進行量測。對高精度 GPS 量測而言應考慮相位中心偏移量及變化量的改正。
- 二、以實測 GPS 觀測法率定 GPS 天線相位中心偏移及變化是可行的且成果良好，但以實驗室法率定絕對之 GPS 天線相位中心變化仍有其必要性，可用以檢測實測 GPS 觀測法的成果外，以建立更可靠且一致的相位中心改正模式。
- 三、以旋轉天線方式進行相位中心偏移率定，僅能消除天線水平方向偏移，而以天線互換測站方式則可率定天線水平及垂直向偏差。
- 四、以線性函數及球諧函數求得之相位中心隨仰角變化模式，一般而言差異並不大。
- 五、由實驗成果得知，不同型之 GPS 天線其相位中心偏移及變化有顯著差異，即使同型天線仍非完全一致，對高精度 GPS 量測而言，應考慮針對個別天線進行相位中心偏移及變化的率定。本研究所率定之各型天線相位中心偏移及變化，與 IGS 及 NGS 公佈之相位中心改正值雖相當接近但仍有差異，應用於 GPS 改正時，個別考慮單一天線之相位中心改正有助於提升 GPS 量測精度。
- 六、於 GPS 量測時，若天線未進行相位中心偏移量及變化量等率定或 GPS 軟體無法對相位中心進行修正時，可考慮以天線及接收儀整組互換測站方式進行量測，取其平均值則可得到較正確之座標，可避免因相位中心變化所造成之系統性誤差。
- 七、為建立更可靠且一致性高之天線相位中心改正模式，應先建立一標準 GPS 天線相位中心率定模式與率定基線場。
- 八、除了率定各型天線之相位中心偏移及變化外，未來更應致力於 GPS 天線之設計與改良等研究，改善各型天線相位中心變化模式。

參考文獻

- 陳春盛，1996。對流層模式改良及高精度 GPS 高程之研究（二），國科會專題研究報告 NSC85-2211-E009-017。
- 郭隆晨，1991。GPS 相對定位誤差之研究，成功大學航測研究所碩士論文。
- 顏進祥，1996。GPS 應用於高程測量之研究-以五股、長良地區的沈陷量為例，國立交通大學土木工程研究所碩士論文。
- Braun, J., G. Rocken, and J. Johnson, 1994. Consistency of High Precision GPS Antennas, EOS Transactions, AUG 1994 Fall Meeting, Vol.75, No.44, pp.173.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, and T. Schildknecht, 1988. Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations, Monograph 12, School of Suverying, University of New South Walea, Australia.
- Beutler, G., E. Brockmann, S. Fankhauser, W. Gurtner, J. Johnson, L. Mervart, M. Rothacher, S. Schaer, T. Springer, and R. Weber, 1996. The Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland.
- Geiger, A., 1988. Modelling of Phase Center Variation and its Influence on GPS-Positioning, Lecture Notes in Earth Sciences, Vol.19, pp.381~392, Spring Verlag Berlin, Heidelberg.
- Gurtner, W., G. Beutler, and M. Roathacher, 1989. Combination of GPS Observation Made with Different Receiver Types, Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico, March 13-17, Vol.1, pp.362~374.
- Gurtner, W., and R. Liu, 1995. The Central Bureau Information System, in IGS 1994 Annual Report, edited by R. Liu J. F. Zumberge and R.E. Neilan, pp.43~57, IGS Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California U.S.A.
- Imakiire, T., Y. Iimura, S. Saga, H. Morishita, A. Tsuchiya, F. Kudo, S. Ishikawa, and

- Y. Iwana, 1997. Results of Phase Characteristics Measurements of GPS Receivers Antennas(2), Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 43, No. 2, pp.79-90.
- King, R.W., E.G. Masters, C. Rizos, A. Stolz, and J. Collins, 1988. Surveying with GPS , Monograph 9, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington.
- Kleusberg, A., and P.J.G. Teunissen(eds.), 1996. GPS for Geodesy, Lectures Notes in Earth Sciences, Springer Verlag.
- Mader, G.L., GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey, <http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/Projects/ANTCAL/>.
- Mireault, Y., and F. Lahaye, 1993. Evaluation of Inter-receiver Biases Between Ashtech, Leica, Rogue, and Trimble GPS Receivers, EOS Transactions, AUG 1993 Fall Meeting, Vol. 74, No. 43, p.197.
- Rothacher, M., S. Schaer, L. Mervart, and G. Beutler, 1995. Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data, in IGS Workshop Proceedings on Special Topics and New Directions, edited by G. Gendt and G. Dick, pp.77~92, GeoForschungs Zentrum, Potsdam, Germany.
- Rothacher, M., W. Gurtner, S. Schaer, R. Weber, and H.O. Hase, 1996. Azimuth-and Elevation-Dependent Phase Center Corrections for Geodetic GPS Antennas Estimated from GPS Calibration Campaigns, in IAG Symposium No.115, edited by W. Torge, pp.335~339, Springer-Verlag.
- Schaer, S., G. Beutler, L. Mervart, M. Rothacher, and U. Wild, 1995. Global and Regional Ionosphere Models Using the GPS Double Difference Phase Observable, in IGS Workshop Proceedings on Special Topics and New Directions, edited by G. Gendt and G. Dick, pp.77~92, Geo-Forschungs Zentrum, Potsdam, Germany.
- Schupler, B.R., and T.A. Clark, 1991. How Different Antennas Affect the

GPS-Observable, GPS World, Nov./Dec. 1991, pp.32~36.

Schupler, B.R., R.L. Allshouse, and T.A. Clark, 1994. Signal Characteristics of GPS User Antennas, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 41, No.3, pp.277~295.

Seeger, H., W. Augath, R. Bordly, C. Boucher, B. Engen, and W. Gurtner, 1992. Status-Report on EUREF-GPS-Campaign 1989 to the IAG EUREF-Subcommission.

Spilker, J.J., 1978. GPS Signal Structure and Characteristics, Institute of Navigation, Vol. 25, No.2, pp.121~146.

Wells, D.E., N. Back, D. Deikaraoglou, A. Kleusberg, E.J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R.B. Langley, M. Nakiboglu, K.P. Schwarz, J. Tranquilla, and P. Vanicek, 1986. Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates Fredericton, New Brunswick, Canada.