

交通部中央氣象局

委託研究計畫(期末)成果報告

井下地震儀微震觀測(III)

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-101-E-04

執行期間：101年1月1日至101年12月31日

計畫主持人：馬國鳳

執行機構：國立中央大學

中華民國 101年 11月 22日

政府研究計畫(期末)報告摘要資料表

| | | | |
|--------|--|--------|-------------------|
| 計畫中文名稱 | 井下地震儀微震觀測(III) | | |
| 計畫編號 | MOTC-CWB-101-E-04 | | |
| 主管機關 | 交通部中央氣象局 | | |
| 執行機構 | 國立中央大學 | | |
| 年度 | 101 | 執行期間 | 101/1/1~101/12/31 |
| 本期經費 | 346 千元整 | | |
| 執行進度 | 預定 (%) | 實際 (%) | 比較 (%) |
| | 100 | 100 | 0 |
| 經費支用 | 預定(千元) | 實際(千元) | 支用率 (%) |
| | 346 | 293 | 84.6 |
| 研究人員 | 計畫主持人 | 協同主持人 | 研究助理 |
| | 馬國鳳 | | 林欣儀 |
| | | | |
| 報告頁數 | 25 | 使用語言 | 中文 |
| 中英文關鍵詞 | 微地震、方位角修正、走時差、orientation correction | | |
| 研究目的 | <p>台灣為一地震活躍的地區。為了有效監測地震的發生，中央氣象局設置了新一代之地震觀測系統。此一系統為一低雜訊的井下監測系統，可以有效的避免地震訊號受地表環境的干擾，提升地震定位的精確度、增進地震測報的效能。為了促使此觀測系統之有效運作，本研究將針對井下監測站與地表站之走時差做分析，並探討井下地震儀之方位角校準。</p> <p>在方位角修正上，可採用的方式包括：一、透過計算 P 波質點運動方向的特徵值及特徵向量值，推估地震儀方位角對於地理座標正北方的修正量。再藉由地震事件到測站之後方位角的估計，我們可以推估出各地震儀的方位角修正量。二、則透過地表參考站，以交叉相關比對(Cross-correlation)地表站與井下站之地震訊號完成井下地震儀之方位角校正。</p> | | |
| 研究成果 | 本研究透過計算 P 波質點運動方向的特徵值及特徵向量 | | |

值，推估地震儀方位角對於地理座標正北方的修正量。再藉由地震事件到測站之後方位角的估計，可以推估出各地震儀的方位角修正量。透過此法，井下地震儀的修正將不需要任何地表參考站，而可以獨力完成方位角之校正；另外透過地表參考站，以交叉相關比對(Cross-correlation)地表站與井下站之地震訊號完成井下地震儀之方位角校正。分析結果顯示，在採用波形交叉相關比對法時，建議採用清楚可辨視之波相使用。例如，較大地震事件(>ML5)的訊號其地表站的訊號訊噪比高，此時可用波形交叉相關比對法完成井下儀器的方位角修正。另外，若地表的淺層場址效應對波形產生影響，此時可能會造成交叉相關比對法的修正誤差。因此，本研究建議在地表站訊號的訊噪比低或明顯受到場址效應影響，以及無地表參考站資料可用的情況下，應使用後方位角-特徵值校準法完成方位角修正。

在走時差的分析上，大部分的觀測站其走時差皆相當穩定，井下加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 秒，而井上加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 至 0.3 秒的區間，此外，井上加速度儀比井下加速度儀慢約 0.1 至 0.2 秒的時間。我們另外採用 6 月份之地震事件針對 TTN 及 WLCH 站做走時分析，結果也與上述一致。而 ILA 的井下加速度儀在 2 月份的走時有異常，可能要再加以確認走時紀錄。

| 測站 ^o | 修正角度(°) ^o | | 修正方式\備註 ^o CC: Cross-Correlation ^o BA: Back-Azimuth ^o | 裝設 ^o 時間 ^o |
|-------------------|--|--|---|------------------------------------|
| | HLX.02 ^o | HHX.02 ^o | | |
| HWA ^o | 213 ^o | 2 ^o | CC ^o | 2008/10- ^o |
| WJS ^o | 0 ^o | 359 ^o | CC ^o | 2009/10- ^o |
| CHY ^o | 14 ^o | 19 ^o | CC ^o | 2009/12- ^o |
| WDLH ^o | 356 ^o | 359 ^o | CC ^o | 2011/01- ^o |
| ILA ^o | 11 ^o | 6 ^o | CC ^o | 2008/10- ^o |
| NTC ^o | 2 ^o | 359 ^o | CC ^o | 2008/10- ^o |
| LAY ^o | 344 ^o | 345 ^o | CC ^o | 2009/12- ^o |
| TTN ^o | 317/346 ^o 0 ^o | 314/334 ^o 355 ^o | CC/BA (2012/02/04 ML 5.6) ^o BA (2012/06/06 ML 5.9) ^o | 2011/01- ^o |
| NCUH ^o | 352 ^o | 352 ^o | CC ^o | 2011/01- ^o |
| NTS ^o | 28 ^o | 15 ^o | CC ^o | 2008/10-2011/10- ^o |
| NMLH ^o | 357 ^o | 358 ^o | CC ^o | 2011/10- ^o |
| NWL ^o | 352 ^o | 351 ^o | CC ^o | 2011/12- ^o |
| OWD ^o | 353 ^o | 354 ^o | CC ^o | 2011/12-2012/05- ^o |
| SLG ^o | 165 ^o | 1 ^o | CC ^o | 2011/12- ^o |
| WCHH ^o | -- ^o | -- ^o | HHN broken ^o | 2011/01-2012/05- ^o |
| ENAH ^o | -- ^o | -- ^o | HLX.01 data only ^o | 2011/01- ^o |
| NNSH ^o | -- ^o | 356 ^o | HLX.02 no signal ^o | 2011/01- ^o |
| SSP ^o | 15 ^o | 356 ^o | HLX.01 noisy signal ^o | 2011/12- ^o |
| WLCH ^o | 281/359 ^o 0 ^o | 276/10 ^o 350 ^o | CC/BA (2012/02/17 ML 4.1) ^o BA(2012/06/06 ML 5.9) ^o | 2011/12- ^o |
| EGFH ^o | 359 ^o | 0 ^o | CC ^o | 2011/12- ^o |

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 具體落實應用情形 | 此研究成果將提供並協助中央氣象局設置之地震儀器走時及方位角之修正。 |
| 計畫變更說明 | (若有) |
| 落後原因 | (若有) |
| 檢討與建議 (變更或落後之因應對策) | |

(以下接全文報告)

井下地震儀微震觀測(III)

馬國鳳 林彥宇 王郁如 鄭惠文 林欣儀
國立中央大學地球物理研究所

郭鎧紋 陳達毅 蔡宜宏
中央氣象局地震測報中心

摘 要

台灣為一地震活躍的地區。為了有效監測地震的發生，中央氣象局設置了新一代之地震觀測系統。此一系統為一低雜訊的井下監測系統，可以有效的避免地震訊號受地表環境的干擾，提升地震定位的精確度、增進地震測報的效能。為了促使此觀測系統之有效運作，本研究將針對井下監測站與地表站之走時差做分析，並探討井下地震儀之方位角校準。

在方位角修正上，可採用的方式包括：一、透過計算 P 波質點運動方向的特徵值及特徵向量值，推估地震儀方位角對於地理座標正北方的修正量。再藉由地震事件到測站之後方位角的估計，我們可以推估出各地震儀的方位角修正量。透過此法，井下地震儀的修正將不需要任何地表參考站，而可以獨力完成方位角之校正；二、則透過地表參考站，以交叉相關比對(Cross-correlation)地表站與井下

站之地震訊號完成井下地震儀之方位角校正。本研究針對 2012 年 2 月的 20 個測站做分析後，顯示大部份的儀器都不需要做方位角修正。但 HWA 和 SLG，則分別在井下加速度站(HLX.02)需有 213° 及 165° 的旋轉角度修正量。TTN 站因地表站的訊號受到淺層場址影響，利用交叉相關比對法所估計的修正角度誤差較大。而採用後方位角-特徵值校準法同時修正 2 月及 6 月的地震事件後，明顯顯示該測站的方位角不需校準。WLCH 站同樣因地表站訊號較為複雜，利用兩種方法分析 2 月份之地震事件所得的校準角度差異量大，無法確認正確的校準角度，因此另外採用 6 月份波形訊號良好之地震事件，以後方位角-特徵值法校準，結果顯示該方位角為正確的，不需另作修正，與觀測上所得的結果一致。

因此，建議在採用波形交叉相關比對法時，應採用清楚可辨視之波相使用。例如，較大地震事件(>ML5)的訊號其地表站的訊號訊噪比高，此時可用波形交叉相關比對法完成井下儀器的方位角修正。另外，若地表的淺層場址效應對波形產生影響，此時可能會造成交叉相關比對法的修正誤差。故本研究建議在地表站訊號的訊噪比低或明顯受到場址效應影響，以及無地表參考站資料可用的情況下，使用後方位角-特徵值校準法完成方位角修正為比較好的選項。

在 2 月份資料的走時差分析上，大部分觀測站的走時差皆相當穩定，井下加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 秒，而井上加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 至 0.3 秒的區間，此外，井上加速度儀比井下加速度儀慢約 0.1 至 0.2 秒的時間。我們另外採用 6 月份之地震事件針對 TTN 及 WLCH 站做走時分析，結果也與上述一致。而 ILA 的井下加速度儀在 2 月份的走時有異常，可能要再加以確認走時紀錄。

Taiwan is located in an active seismogenic region. In order to comprehensively monitor the seismicity occurring in Taiwan, a new generation of seismographic network, borehole seismographic network was deployed to complement the surface ones for its lower noise level and higher signal to noise ratio. This study discusses the orientation correction for borehole instruments and identifies the arrival difference

between the surface station and borehole ones to confirm the operation of borehole network.

We included two methods to analyze the orientation correction, first, the eigen-value/vector method; second, the cross-correlation method. The values estimated by the two methods were very similar. The cross-correlation method is proposed to be used for a high signal-noise ratio data with explicit reference one. Otherwise, eigen-value/vector method is suggested instead. There is around 10° of correction error with the eigen-value/vector method. To reduce the deviation, taking an average value from the estimation of several events from different azimuth is suggested.

The delays of P-arrivals for events in 2012 Feb. in most of ten stations are stable. The P-wave arrivals of borehole acceleration seismometers are 0.1 seconds late than borehole broadband seismometers. And, the delays of surface acceleration seismometers are 0.1 to 0.3 seconds late than borehole acceleration seismometers. 0.1 to 0.2 seconds in difference are estimated between surface and borehole acceleration seismometers. The P-wave delay in ILA borehole acceleration which has anomaly should be confirmed carefully.

前言

中央氣象局新代之井下地震觀測系統，提供了低雜訊的地震觀測訊號。此觀測系統除了提供學術研究高品質的震波訊號外，在地震監測上，當地表觀測站之訊號因為雜訊干擾或儀器損壞而不敷使用時，亦可同時提供輔助資訊，達到有效監測地震的目的。為了完成井下地震觀測系統對於地表觀測站的輔助功能，本研究將針對，一、井下地震儀之方位角校正；二、井下監測網與地表站之走時差估計做分析。

井下地震儀方位角之校正

井下地震儀方位角之修正，最常用的方法有二。方法之一，找出壓縮波(P-wave)的主要能量來源，藉由計算該測站與震源位置的後方位角，找到地震儀的方位角修正方向及角度。此方法並不受限於地表或井下測站間彼此波形的相關性，各自可以做獨立的分析及修正。而另一方法是利用已有正確方位角的地表站，分別對兩個井下地震儀的震波訊號做交叉相關比對(Cross correlation)，找出最佳的方位角修正角度。此方法的限制在於，地表站的訊號往往包含過多的雜訊，因此，如何對波形資料做適度的濾波，在移除雜訊時，又能避免抹除主要訊號，使之能與井下地震儀做交叉相關比對，將是一大挑戰。本研究將分別評估此兩種方法在氣象局井下地震儀方位角修正的應用。

研究方法一：後方位角-特徵值修正法

假設一地震儀，其正確的方位角未知，在未修正前的垂直、南北和東西方向上的波形向量為 $A=[Z, H1, H2]$ (圖一)。而壓縮波(P-wave)主要的能量來源為 R 方向，若能找到 H1 和 R 的夾角 D，則利用震央到測站間的後方位角 P(back-azimuth)，我們可以得知該地震儀方位角的修正向量-(P-D)。

角度 D 的估計方式有兩種，第一，尋找未修正前南北和東西向震幅比值

$$R=H1/H2$$

，R 為最大值的旋轉角度即為 D；第二，則為尋找各質點運動的特徵值 (eigenvalue) 及特徵向量(eigenvector)，

對於三分量的波形資料

$$A=[Z, H1, H2]$$

求解

$$M=\langle A^T * A \rangle$$

的特徵值及特徵向量，而有較大特徵值的特徵向量即為角度 D。由於利用特徵向量所計算出的方位角 D，並無法辨別 180 度角相差的能量來源，因此，在水平分量的資料旋轉 D 的角度後，我們必須要加入最後一個判斷式「假若，未修正前南北向和垂直向的能量乘積總和(sum(Hi*Zi))小於 0」則旋轉方向要再做 180 度的翻轉。如此一來，後方位角 P 和 D 的差值-(P-D)即為地震儀的修正角度。

研究方法二：交叉相關比對法

假設地表站與井下站之訊號分別為函數 x 及 h，則利用以下之數學關係式，

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t + \tau)d\tau$$

逐一計算，在不同旋轉角度下，兩個波形之間的相關係數。其中，相關係數最大的旋轉角度則為井下地震儀方位角的旋轉修正量。在此分析法中，我們同時考慮兩個水平分量(E、N)的波形與地表站各水平分量波形的相似度來決定最適當的修正角度。

為了挑選適當的訊號比對視窗，我們以 WDLH 站為例，分別擷取 P 波前 1 秒至 S 波後 10 秒及 P 波前一秒至 P 波後 10 秒的兩個視窗，以帶通濾波 0.1-0.5Hz 處理後，分別做交叉相關比對法分析。為了確認兩種訊號視窗分析所得結果的正確性，我們也使用同時使用後方位角-特徵值修正法求得修正值。

圖二為利用後方位角-特徵值法及交叉相關比對法對 WDLH 測站所做的方位角分析結果。在交叉相關比對法中，若採用 P 波前 1 秒至 S 波後 10 秒的視窗，所得的井下加速度儀(HLX.02)及井下寬頻儀(HHX.02)修正角度分別為 185 度及 182 度，修正結果如圖二右上。而若利用 P 波前 1 秒至 P 波後 10 秒的視窗，所得的修正量在 HLX.02 及 HHX.02 的修正角度各為 356 度及 359 度。在後方位角-特徵值法分析中，我們使用 P 波 0.8 秒的脈衝視窗，所得的 HLX.02 及 HHX.02 修正量則分別為 349 度及 341 度(圖二下)。因此，採用 P 波前 1 秒至 P 波後 10 秒的視窗做交叉相關比對所得的修正值明顯比較合理。

探討造成交叉相關比對法的誤差原因，可能為地表站的 S 波受到淺層場址效應的影響，使得波形的振幅或週期產生變化，進而影響交叉相關比對波形的結果。因此，我們在後續的方位角分析中，將僅擷取 P 波前 1 秒至 P 波後 10 秒的視窗做波形的交叉相關比對。

處理範例

我們以 WJS、CHY、HWA 三個測站在 2012 年 2 月 4 日所接收到位於台灣東部外海芮氏規模(M_L)4.39 的地震事件為例，分別說明兩種方法對於方位角修正之處理。

測站 WJS

圖三，標示出該地震事件之震源位置及 WJS 測站所接收到的地表加速度(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)、井下寬頻(HHX.02)地震儀在 E、N、Z 三分量的速度型 P 波及局部 S 波記錄。

首先，我們觀察 Z 分量的 P 波初動，擷取 E、N 分量上 P 波初動後約一個脈衝波(Pulse)的能量視窗，視窗長度約 0.8 秒，標示如藍色長框。而後利用特徵值及特徵向量之概念，求取該視窗內兩個水平向質點運動方向與儀器水平座標軸的夾角(D)。在此例中，HLX.02 為 59 度；HHX.02 為 74 度(圖三，左下)。其中，在 D 的計算中，HLX.02 和 HHX.02 需要 180 度角的相差翻轉。而該地震事件從震央位置至測站的後方位角為 246 度。因此，最後計算所得的方位角修正角度在 HLX.02 和 HHX.02 分別為 353 度、8 度。

利用交叉相關比對方式，我們使用帶通濾波 0.1-0.5Hz 的波形訊號，避免淺層沉積層的反射波相的影響。之後，擷取 P 波前 1 秒至 P 波後 10 秒的時間視窗訊號，以 1 度的增量旋轉波形，求得最大相關係數的修正值。所得的 HLX.02 和 HHX.02 分別為 0 度和 359 度(圖四)。

比較兩個方法所得的修正結果，此例採用 P 波質點運動分析所得的數值可能約有正負 10 度的誤差量。而以交叉相關比對的方式較為精準。

測站 CHY

圖五為 CHY 測站，利用後方位角-特徵值法所得的儀器方位角修正量。同樣地，我們擷取 0.8 秒 P 波視窗，求得 HLX.02 及 HHX.02 的角度 D 分別為 80 度及 72 度。而該測站對震源的後方位角為 242 度。因此，所得的修正角度分別為 18 度及 10 度。圖五右下為兩個水平分量經估計角度修正後的結果。

利用交叉相關比對法，同樣地，我們擷取 0.1-0.5Hz、P 波前 1 秒至 P 波後 10 秒的波形訊號做比對。HLX.02 及 HHX.02 所得的修正量分別為 14 及 19 度(圖六)。其修正量與後方位角-特徵值法所得的修正值相近。若比較兩方法所得的修正結果，我們發現修正角度正負 10 度的誤差，在波形上所造成的差異並無法由肉眼上所辨識。此現象似乎暗示著正負 10 度的修正角度似乎為誤差容許值。

測站 HWA

圖七、圖八為 HWA 測站分別利用後方位角-特徵值法及交叉相關比對法所得的修正結果。後方位角-特徵值法所得的 HLX.02、HHX.02 修正值分別為 207 度及 358 度。而交叉相關比對法所得的修正值為 213 度及 2 度。兩者所得的結果相當相近。且該測站儀器的方位角經修正後，兩個水平分量的井下波形資料明顯地比較符合地表的觀測波形。

經由以上的分析結果顯示，後方位角-特徵值法及交叉相關比對法所得的分析結果相近，因此本研究將利用交叉相關比對法對後續的 16 個測站做修正。其修正結果詳列如表一。分析結果顯示，大部份的儀器都不需要做方位角修正。而

除了前面所述的 HWA 測站外，TTN、SLG 和 WLCH 有較大的修正量。以下則將這三個測站做進一步討論：

測站 TTN

在 TTN 測站，在 2012 年 2 月 4 日，規模 5.6 之地震事件，我們使用 P 波前 1 秒至後 10 秒的訊號視窗，採用帶通濾波 0.1-0.5 Hz，以交叉相關比對法做分析，所得的修正角度為 82 度(HLX.02)及 294 度(HHX.02)。觀察修正後的結果，發現此兩數值明顯不合理。因此，我們改用帶通濾波 0.1-2 Hz，增加該視窗內可供比對之訊號，所得的修正值為 317 及 314 度。若利用後方位角-特徵值法所得的角度則分別為 346、334 度。我們另外使用 2012 年 6 月 6 日的地震做進一步的確認，使用交叉相關比對法所得的修正角度為 325 度(HLX.02)及 322 度(HHX.02)，而利用後方位角-特徵值法所得的角度則分別為 0 度及 355 度。因此，適當地選擇可供比對的訊號是影響交叉相關比對法效果的關鍵因素。當無法擷取適當的訊號供比對時，建議使用後方位角-特徵值法較為妥當。

測站 SLG

在 SLG 測站，兩個井下地震儀的水平訊號在修正前，明顯地不符合。利用交叉相關比對法分析後，得到井下寬頻站的修正角度為 1 度，而井下加速度儀的修正角度為 165 度。暗示井下寬頻站的儀器方位角是正確的，與地表站一致。我們因此將井下加速度波形做 165 度的方位角修正。修正後的井下加速度波形幾乎與井下寬頻資料的波形完全一致。

測站 WLCH

在 WLCH 站，採用交叉相關比對法修正 2012 年 2 月 17 日 17 點 33 分 42 秒，規模 4.3 之地震事件，所得的修正值在 HLX.02 及 HHX.02 分別為 281 度及 276 度。

而若採用後方位角-特徵值法則在 HLX.02 及 HHX.02 的修正角度為 359 度及 10 度。若比較兩種方式修正後的波形，採用交叉相關比對法在 P 波到時後 1 秒之前的訊號比採用後方位角-特徵值法在與地表波形比對時有更好的符合度。然而，P 波到時 1 秒後，兩種方式對地表波形的符合度則一樣雜亂。為了確認何者的修正角度是正確的，我們另外使用 2012 年 6 月 6 日，規模 5.9 之地震事件做修正。此波形在未修正前即可以肉眼看出三個儀器的波形非常相似，幾乎不需做儀器之方位角校正，而利用後方位角-特徵值法所求得的修正角度分別為 0 度及 355 度，幾乎符合觀測所得到的結論。因此，此測站的修正經驗告訴我們，採用交叉相關比對法所得的修正角度完全取決於地表波形的波相，然而，如果地表參考波形受到其他因素影響(如場址效應等)，此時所得的修正角度其正確性就有待評估。在無法確定地表波形為一個正確的參考波相的情況下，建議參考後方位角-特徵值法所得的估計值。

走時差的分析

本研究主要針對 NTS、NWL、ILA、NMLH、NNSH、OWD、EGFH、SLG、WLCH 及 LAY 共 10 個測站做分析。其餘測站，例如，ENAH 測站因只有井上加速度儀的紀錄，所以無法比較 P 波走時差。而 SSP 測站，其井下寬頻儀有太陽日 48 至 60 日之間的紀錄，而井下加速度儀只有太陽日 48 至 50 日的紀錄，井上加速度儀則有太陽日 40 至 50 日的紀錄，且 48 日的紀錄壞掉，因此同樣無法比較 P 波走時差。同樣 NNSH 及 EGFH 測站，40 日的紀錄也有問題，無法使用。其餘的測站則因地表站的波形紀錄雜訊較大，濾波後仍無法明顯判斷 P 波到時，因而無法分析。

由於大部分的測站只有 2/9~2/19 之間的資料較齊全，同時含括井上加速度儀、井下加速度儀與井下寬頻三者資料，因此能選取作為分析的地震事件有限。

此外，有 5 個測站(NNSH、ILA、NTS、EGFH 及 WLCH)因紀錄較差、雜訊較大，故只選取了 2 至 3 個地震事件進行走時差比較。

我們將經振幅修正後的各測站波形紀錄，以適當的濾波頻段，例如，高通濾波 1Hz 至 5Hz，或是帶通濾波 0.1Hz 至 5Hz 處理後，以人工的方式，對 Z 分量進行 P 波的 picking。走時讀取至小數點以下兩位。本次選取的地震事件共有 15 個 (表二)，分析結果如下：

井下加速度儀與井下寬頻儀兩者走時差的結果(圖九)顯示，兩地震儀的時間差大部分在 ± 0.1 秒的區間，而井上加速度儀與井下寬頻儀兩者差則大部分在 0.1 秒至 0.3 秒的區間(圖十)，井上加速度儀與井下加速度儀之間的走時差則大部分為 0.1 秒至 0.2 秒的區間(圖十一)。

NNSH 測站，只有事件 3 與 13 可判斷，且事件 3 無法判斷井上加速度紀錄，事件 13 則是井下加速度紀錄無法判斷，故 NNSH 站無法評斷走時差是否穩定。ILA 站走時差在井上加速度與寬頻儀數值穩定於 0.1 秒。但在事件 5 的井下加速度與寬頻儀或是井上加速度與井下加速度儀則有異常值，暗示著 ILA 站的井下加速度儀的走時在事件 5 可能出現異常。NTS 站，井下加速度與寬頻站之間走時差穩定，差異不大；井上加速度與井下寬頻、加速度站則差 0.25 秒左右。EGFH 站，井下加速度與寬頻站之間走時差亦穩定，差異不大；井上加速度與井下寬頻、加速度站則差約 0.2 秒。WLCH 站，井下加速度與寬頻站兩者走時幾乎相同，井上加速度與井下寬頻或是井上加速度與井下加速度之間則差 0.1 秒至 0.3 秒左右。而在 2012 年 6 月的走時資料分析中(表三)，該測站的走時差在井下加速度與寬頻站之間約為 0.04-0.065 秒，走時幾乎沒有差異。而在井上加速度與井下寬頻約為 0.13 至 0.14 秒，井上加速度與井下加速度為 0.09 至 0.076 秒，兩者皆維持在約 0.1 秒左右。SLG 站，4 筆資料中，有 3 筆資料在各測站的走時差皆相當穩定，井下加速度與寬頻站之間的走時差約 0.1 秒以內，而井上加速度與井下寬頻站之間走時差約在 0.1 秒至 0.2 秒的區間，井上與井下加速度走時差約在 0.1

秒以內，但在井下加速度與寬頻站中，另外 1 筆紀錄(編號 12，無法判斷井上加速度紀錄到時)則差約 0.25 秒，因只有此筆數值資料，無法判斷是井下加速度或寬頻儀所記錄的異常走時。LAY 站，井下加速度與寬頻站之間走時差都在 0.1 秒以內，井上加速度與井下寬頻、加速度站則穩定在 0.1 秒左右。NWL 的井下寬頻紀錄因大部分都有問題，無法紀錄清楚的地震波，故無法判斷 P 波到時；而井上與井下加速度走時都相當接近，差值趨近 0。OWD 站，井下加速度與寬頻站的走時相當接近，差異趨近 0，井上加速度與井下寬頻、加速度站的走時差也在 0.05 秒至 0.1 秒的區間。NMLH 站，除編號 8 的地震走時差較大，其餘井下加速度與寬頻站走時差接近 0，井上加速度與井下寬頻、加速度站之時間差都在 0.2 秒左右；造成編號 8 的地震走時差較大，主要是因為加速度站的紀錄雜訊較大，所以 P 波走時無法判斷精確時間。在 TTN 測站上，我們使用 2010 年 6 月的資料作走時分析，所得之井下加速度與寬頻站之間 P 波走時差為 0.187 秒，井上加速度與井下寬頻走時差為 0.407 秒，井上加速度與井下加速度之走時差為 0.22 秒。

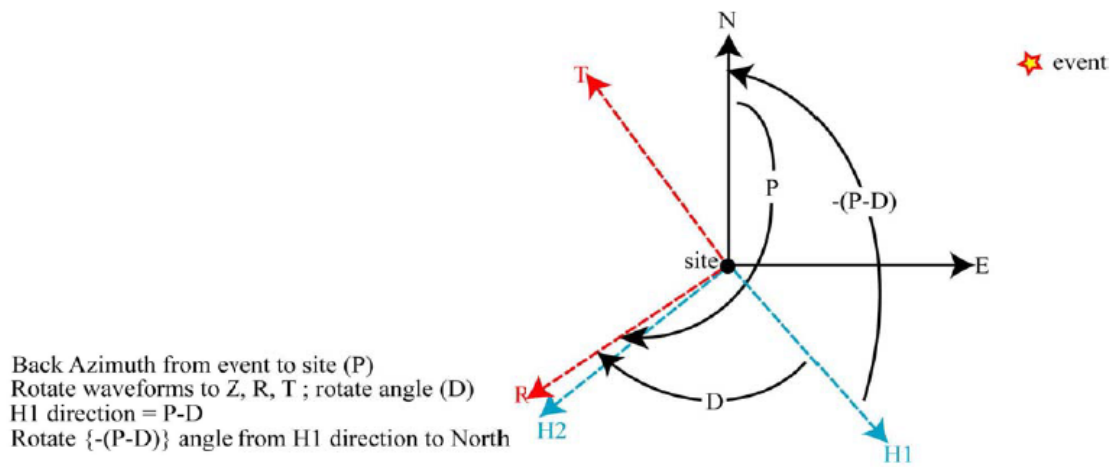
結論及建議

利用後方位角-特徵值校準法，可分別獨立評估各測站方位角的正確性及校準值，但校準角度可能約有正負 10 度的誤差量。因此，建議在使用此方法時，多採用不同方位的地震事件所估計的方位角修正角度，然後加以取平均值，如此可降低採用單一地震事件所獲得的修正量之誤差。而採用波形交叉相關比對法所得的結果和後方位角-特徵值校準法的結果相似。在採用波形交叉相關比對法時，建議採用清楚可辨視之波相使用。例如，較大地震事件(>ML5)的訊號，因地表站的訊號訊噪比高，此時可用波形交叉相關比對法完成井下儀器的方位角修正。另外，若地表的淺層場址效應對地表站的波形產生影響，此時可能會造成交叉相關比對法的修正誤差。因此，若地表站訊號的訊噪比低或明顯受到場址效應影響，或是無地表參考站資料可用的情況下，建議使用後方位角-特徵值校準法完成方位角修正。

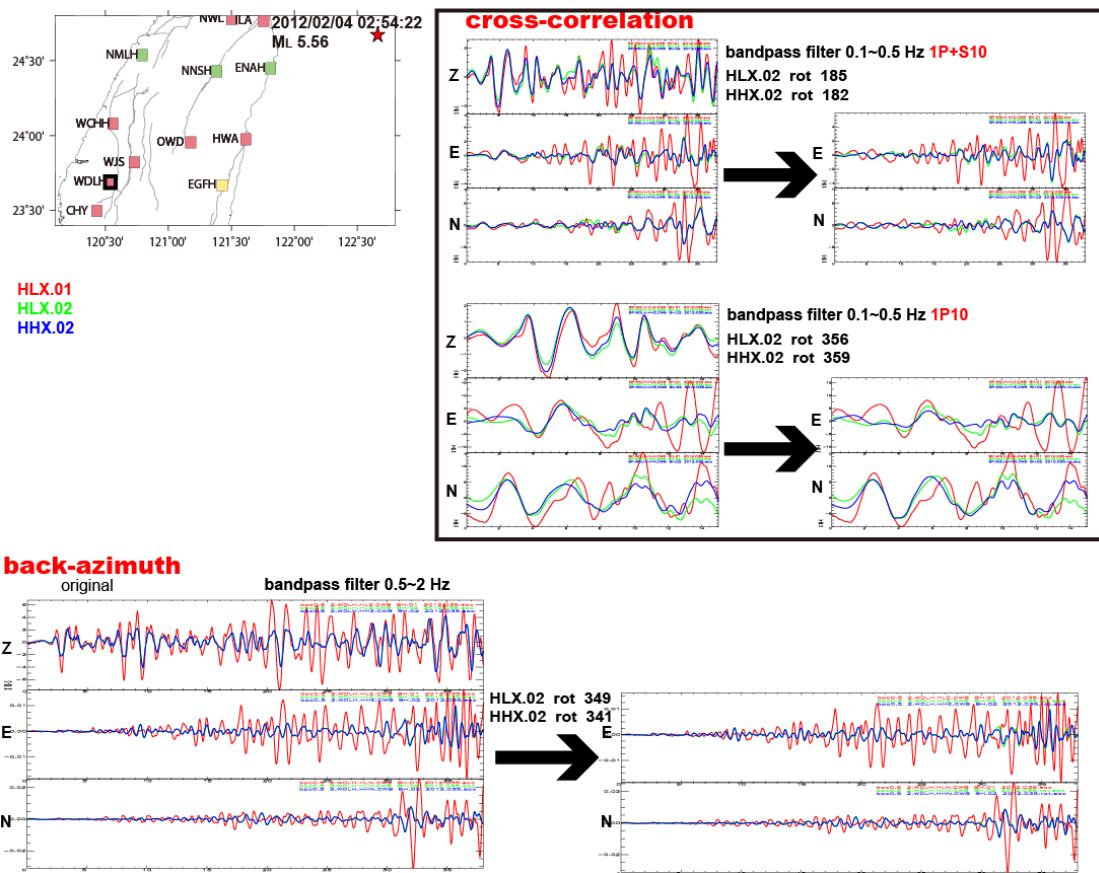
而走時差分析結果顯示，大部分的觀測站走時差都相當穩定，井下加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 秒，而井上加速度儀比井下寬頻慢約 0.1 至 0.3 秒的區間，此外，井上加速度儀比井下加速度儀慢約 0.1 至 0.2 秒的時間。但 ILA 的井下加速度儀可能要再加以確認走時紀錄。

參考資料

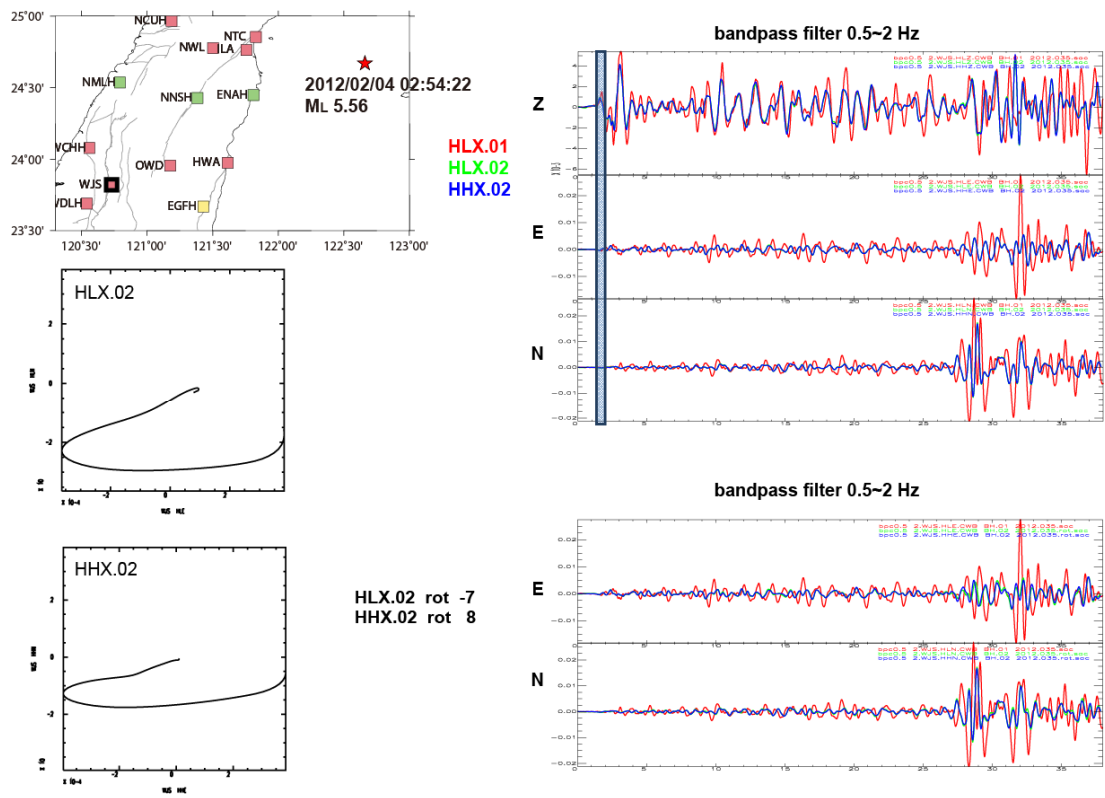
林彥宇，馬國鳳，TCDP 井下地震儀之觀測與微地震尺度分析，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，2009。



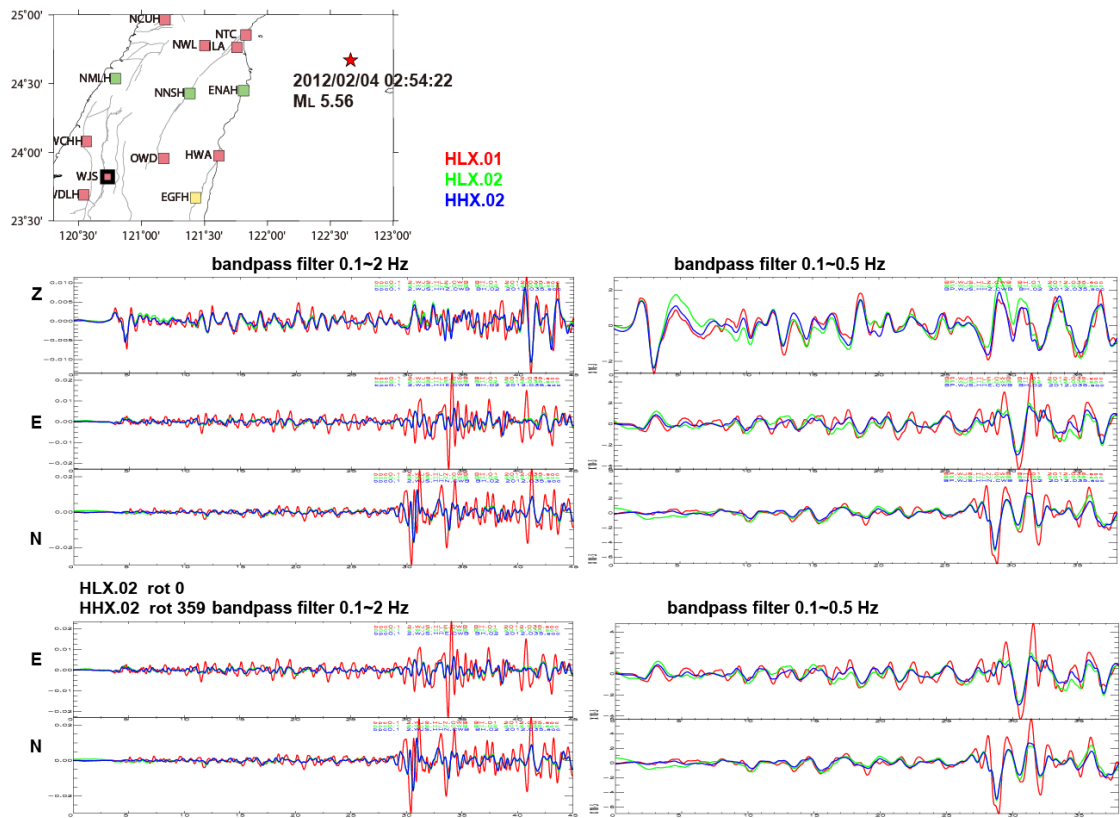
圖一 方位角修正示意圖(林，2008)



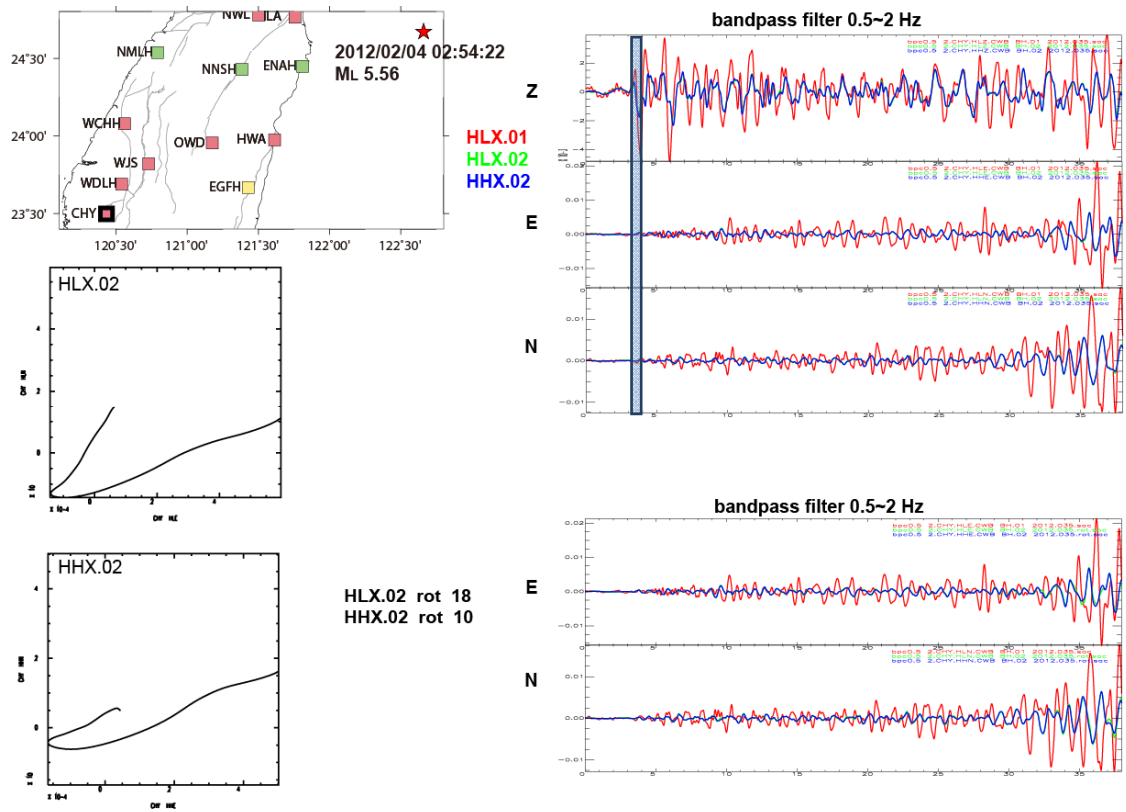
圖二 WDLH 之方位角修正範例，(左上) 2012/2/4 ML5.56 之事件震央位置與 WDLH 測站位置分佈圖；以交叉相關比對法(右上)及後方位角-特徵值法(下)所得的井下加速度(HLX.02，綠色)、井下寬頻(HHX.02，藍色)與地表站(HLX.01，紅色)的速度型 P 波波形比較圖。



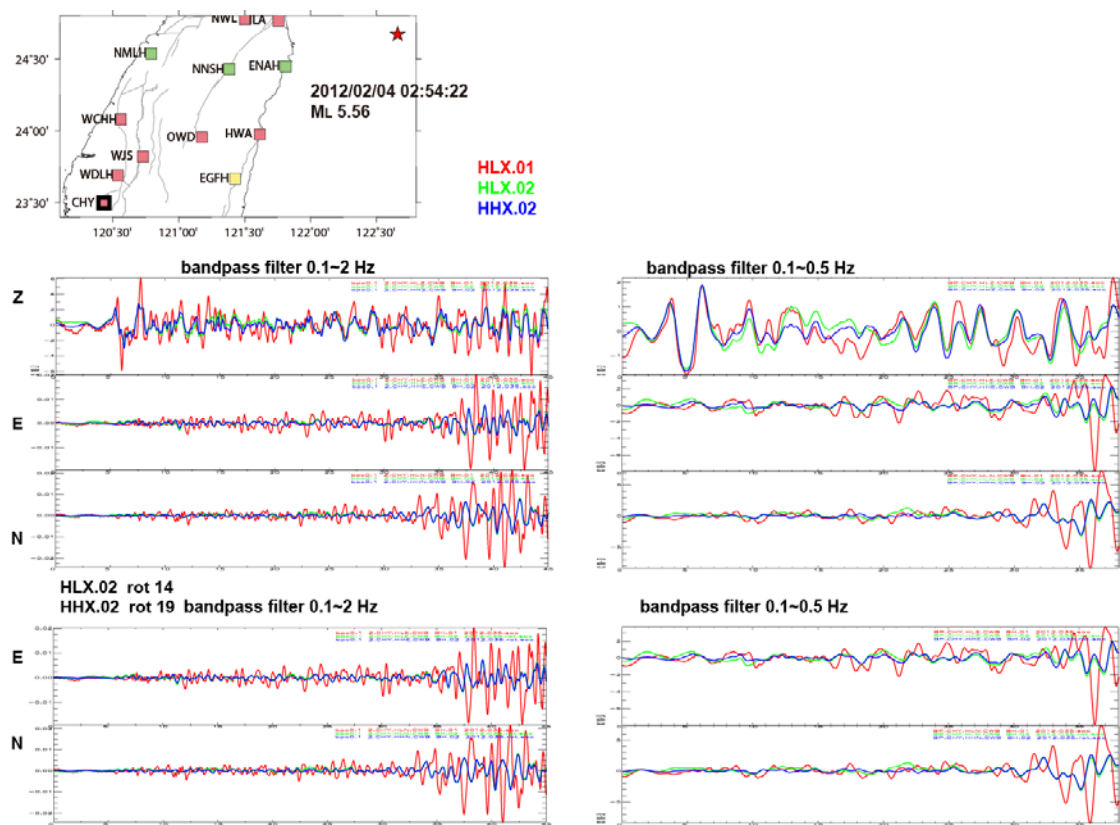
圖三 WJS 之方位角修正範例，2012 年 2/4 ML5.56 在 WJS 站所收到的波形資料。(左上)震央位置；(左下)井下加速度(HLX.02)、井下寬頻(HHX.02)地震儀的 P 波質點運動；(右上)地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的原始速度型波形在三個分量(E、N、Z)的比較，紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形；(右下)經 P 波質點運動分析後，修正方角所得之波形比較。



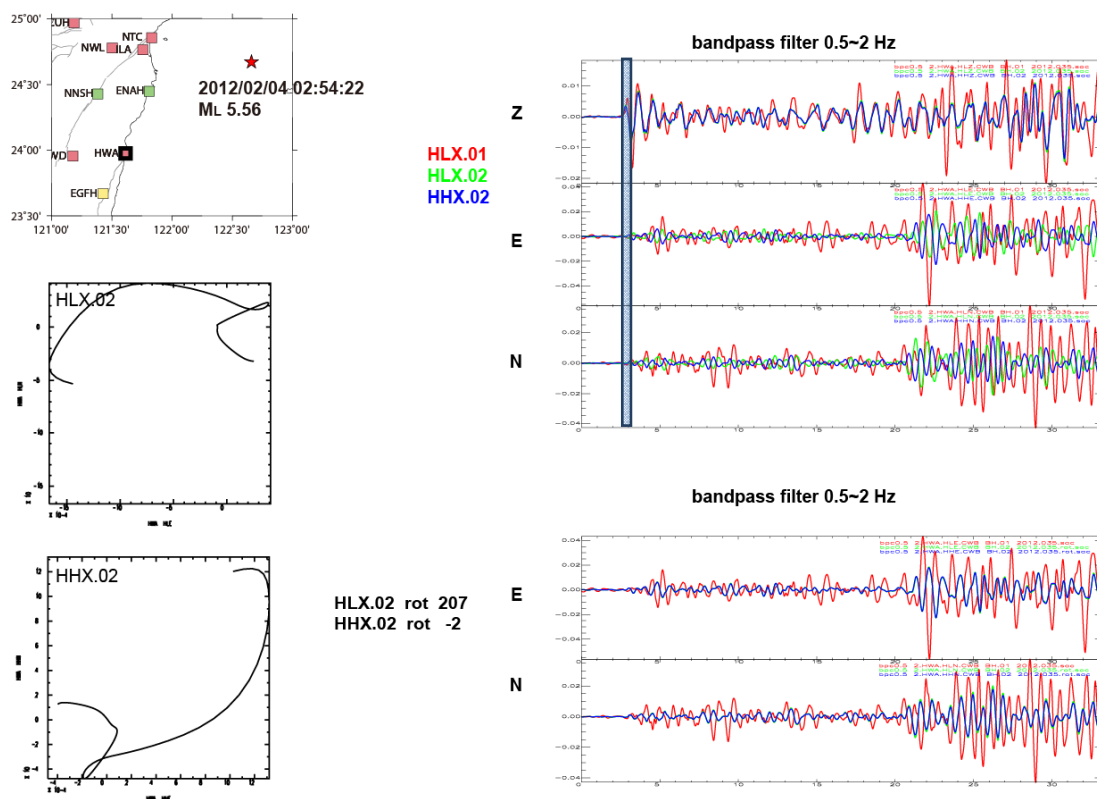
圖四 地震事件(2012/2/4 ML5.56)在 WJS 站所紀錄之波形在兩個頻段，修正前(上)及修正後(下)之波形比較圖。紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形。



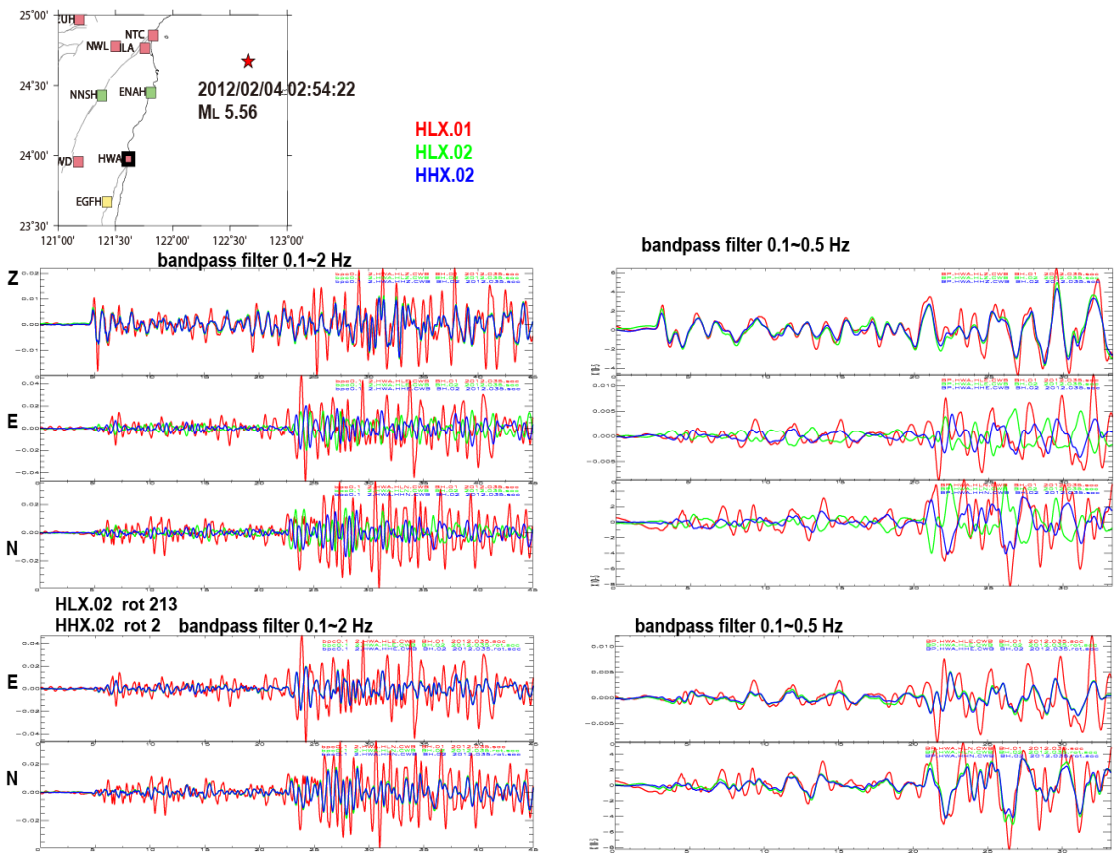
圖五 CHY 之方位角修正範例，2012 年 2/4 ML5.56 在 CHY 站所收到的波形資料。(左上)震央位置；(左下)井下加速度(HLX.02)、井下寬頻(HHX.02)地震儀的 P 波質點運動；(右上)地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的原始速度型波形在三個分量(E、N、Z)的比較，紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形；(右下)經 P 波質點運動分析後，修正方角所得之波形比較。



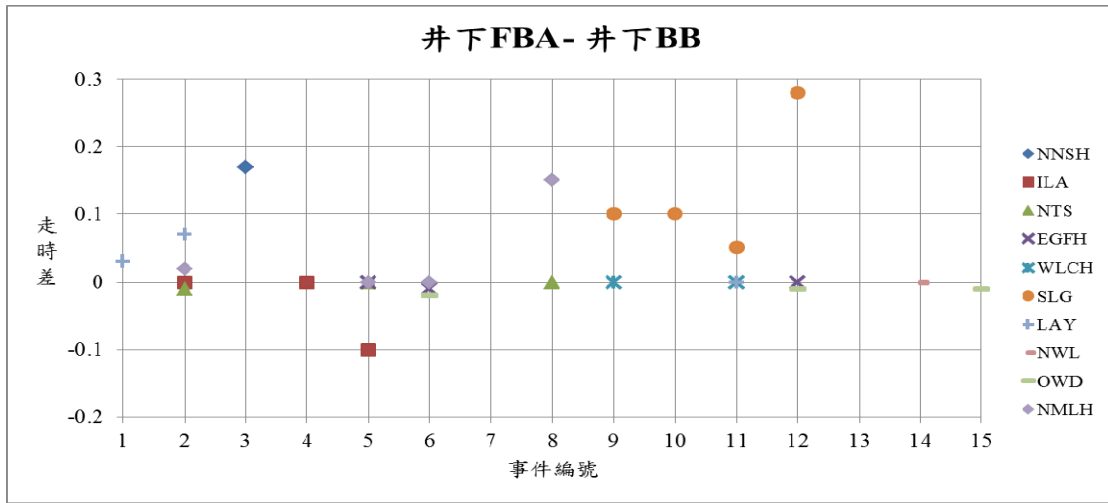
圖六 地震事件(2012/2/4 ML5.56)在 CHY 站所紀錄之波形在兩個頻段,修正前(上)及修正後(下)之波形比較圖。紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形。



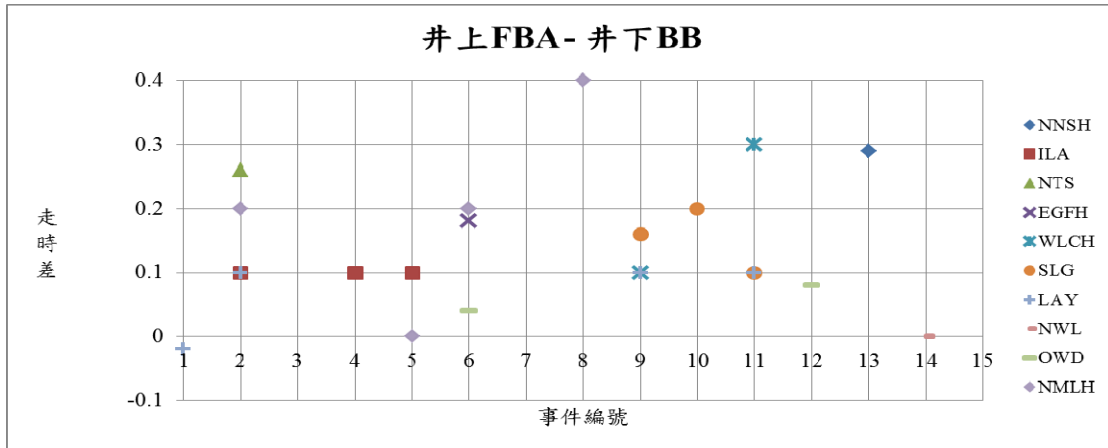
圖七 HWA 之方位角修正範例，2012 年 2/4 ML5.56 在 HWA 站所收到的波形資料。(左上)震央位置；(左下)井下加速度(HLX.02)、井下寬頻(HHX.02)地震儀的 P 波質點運動；(右上)地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的原始速度型波形在三個分量(E、N、Z)的比較，紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形；(右下)經 P 波質點運動分析後，修正方角所得之波形比較。



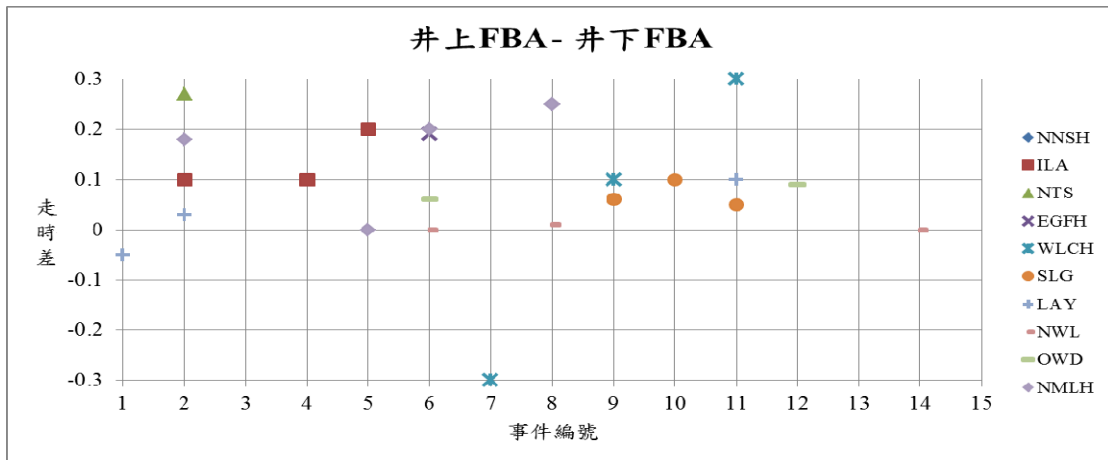
圖八 地震事件(2012/2/4 ML5.56)在HWA站所紀錄之波形在兩個頻段,修正前(上)及修正後(下)之波形比較圖。紅色、綠色、藍色分別代表地表站(HLX.01)、井下加速度(HLX.02)及寬頻站(HHX.02)的速度型波形。



圖九 井下加速度儀與井下寬頻儀兩者走時差的分析結果



圖十 井上加速度儀與井下寬頻儀兩者走時差的分析結果



圖十一 井上加速度儀與井下加速度儀之間的走時差分析結果

表一 利用交叉相關比對法所得各測站方位角的修正量

| 測站 | 修正角度(°) | | 修正方式\備註 CC: Cross-Correlation BA: Back-Azimuth | 裝設 時間 |
|------|--------------|----------------|--|------------------|
| | HLX.02 | HHX.02 | | |
| HWA | 213 | 2 | CC | 2008/10- |
| WJS | 0 | 359 | CC | 2009/10- |
| CHY | 14 | 19 | CC | 2009/12- |
| WDLH | 356 | 359 | CC | 2011/01- |
| ILA | 11 | 6 | CC | 2008/10- |
| NTC | 2 | 359 | CC | 2008/10- |
| LAY | 344 | 345 | CC | 2009/12- |
| TTN | 317/346 0 | 314/334 355 | CC/BA (2012/02/04 ML 5.6) BA (2012/06/06 ML 5.9) | 2011/01- |
| NCUH | 352 | 352 | CC | 2011/01- |
| NTS | 28 | 15 | CC | 2008/10-2011/10- |
| NMLH | 357 | 358 | CC | 2011/10- |
| NWL | 352 | 351 | CC | 2011/12- |
| OWD | 353 | 354 | CC | 2011/12-2012/05- |
| SLG | 165 | 1 | CC | 2011/12- |
| WCHH | -- | -- | HHN broken | 2011/01-2012/05- |
| ENAH | -- | -- | HLX.01 data only | 2011/01- |
| NNSH | -- | 356 | HLX.02 no signal | 2011/01- |
| SSP | 15 | 356 | HLX.01 noisy signal | 2011/12- |
| WLCH | 281/359 0 | 276/10 350 | CC/BA (2012/02/17 ML 4.1) BA(2012/06/06 ML 5.9) | 2011/12- |
| EGFH | 359 | 0 | CC | 2011/12- |

表二 走時差分析所選取的 15 個地震事件

| 地震 編號 | 地震發生時間(UT) | 經度(°E) | 緯度(°N) | 深度(km) | 規模 (ML) |
|----------|------------------------|--------|--------|--------|------------|
| 1 | 2012/02/02, 17:34:0.2 | 120.98 | 21.96 | 18.1 | 3.7 |
| 2 | 2012/02/04, 02:54:22.6 | 122.66 | 24.67 | 116.2 | 5.6 |
| 3 | 2012/02/06, 10:06:53.9 | 121.49 | 24.37 | 4.9 | 3.1 |
| 4 | 2012/02/09, 09:16:49.7 | 121.92 | 23.9 | 35.9 | 4.3 |
| 5 | 2012/02/11, 01:13:4.3 | 121.94 | 24.83 | 3.2 | 3.8 |
| 6 | 2012/02/12, 21:49:5.4 | 121.46 | 23.95 | 25.3 | 3.4 |
| 7 | 2012/02/14 05:08:33.5 | 120.23 | 23.05 | 15.6 | 3.1 |
| 8 | 2012/02/14, 17:05:30.1 | 121.95 | 24.83 | 8.4 | 3.3 |
| 9 | 2012/02/15, 02:33:25.1 | 121.02 | 22.41 | 13 | 3.6 |
| 10 | 2012/02/17, 02:54:17.2 | 120.72 | 23.31 | 6.4 | 2.8 |
| 11 | 2012/02/17, 09:19:24.2 | 121.08 | 22.06 | 27.4 | 3.8 |
| 12 | 2012/02/17, 17:33:43 | 121.59 | 23.68 | 21.4 | 4.3 |
| 13 | 2012/02/18, 23:47:9.6 | 121.5 | 24.36 | 6.1 | 3.0 |
| 14 | 2012/02/19, 18:59:44.2 | 121.96 | 24.83 | 8.4 | 3.7 |
| 15 | 2012/02/20, 18:29:44.1 | 120.99 | 23.99 | 25 | 3.5 |

表三 TTN 及 WLCH 站在 2012 年 6 月之走時差分析

| 2012/10/25 10:31:17 ML5.4 | P-arr. | 2012/6/6 09:08:34 ML5.9 | P-arr. |
|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
| 無井下資料 | | TTN.HHZ.CWB_BH.02_2012.158.sac | 4123.723 |
| | | TTN.HLZ.CWB_BH.01_2012.158.sac | 4124.130 |
| | | TTN.HLZ.CWB_BH.02_2012.158.sac | 4123.910 |
| | | TTN.HL02-HH02 | 0.187 |
| | | TTN.HL01-HH02 | 0.407 |
| | | TTN.HL01-HL02 | 0.220 |
| WLCH.HHZ.CWB_BH.02_2012.299.sac | 37884.80 | WLCH.HHZ.CWB_BH.02_2012.158.sac | 4135.171 |
| WLCH.HLZ.CWB_BH.01_2012.299.sac | 37884.93 | WLCH.HLZ.CWB_BH.01_2012.158.sac | 4135.312 |
| WLCH.HLZ.CWB_BH.02_2012.299.sac | 37884.84 | WLCH.HLZ.CWB_BH.02_2012.158.sac | 4135.236 |
| WLCH.HL02-HH02 | 0.04 | WLCH.HL02-HH02 | 0.065 |
| WLCH.HL01-HH02 | 0.13 | WLCH.HL01-HH02 | 0.141 |
| WLCH.HL01-HL02 | 0.09 | WLCH.HL01-HL02 | 0.076 |