

# 利用同調(Coherence)雷達從事海洋波流觀測

董東璟<sup>1</sup>、吳立中<sup>2</sup>、Dennis Trizna<sup>3</sup>

## 摘要

目前常用的 X 波段航海雷達海況觀測系統大都屬非同調(non-coherence)系統，它們所獲得的影像是因海表面粗糙度所散射返回的回波強度；而同調(coherence)雷達海洋觀測系統因掌握發射與接收電磁波之間的相位關係，由於都卜勒效應，直接測得海表面水粒子的速度變化，是近年來正開始研發的新型雷達海況監測系統。本文介紹德國的 RDCP 與美國的 COHRad 兩套同調雷達系統原理與作業方式，並報告在基隆海洋大學的測試，結果顯示同調雷達系統的解析格網精細(3m~7.5m)，對於海面細微特徵均能有效測得，如海洋大學海堤下涵管排水所造成之離岸流現象。

關鍵字：同調雷達、海洋觀測系統

## 一、前言

海浪場與海面流場是海洋動力環境重要的參數，對於海洋災害預警、海洋經濟建設、航海安全、海洋科學研究甚至是海戰場環境和維護國家海洋權益具有重要的意義。目前我國大部分的海洋監測站都已經具備有即時作業化監測的能力，譬如中央氣象局與水利署所共同建置的近海水文觀測站網，所採用的監測方式以現場實測為主，遙測的設備也有所發展，但監測密度略有不足。不論實測或遙測，兩者是相輔相成的，實測獲取絕對真實的資料，而遙測則可以同時觀測廣大海域，也具有實務上的價值。

海域的遙測從最原始的人類眼睛開始，科技的發展使能採用相機來從事海洋觀測，再發展到飛機與衛星觀測海洋，初期這些遙測方法大都採用可見光的方式，譬如攝影術或 SPOT 衛星，這些屬於被動式感測器，無法在夜間進行觀測，此外，也不易在天候不佳條件下獲得海洋動力參數。歐洲太空總署的 ERS 衛星發射升空後，帶動利用合成孔徑雷達(SAR)觀測海洋的風潮，很多海洋現象，如內波等都在衛星影像上被成功地觀測到，衛星也提供海洋波譜資訊，但對於有些研究而言，其解析度稍嫌不足。同一時間，從陸地上出發，以高頻雷達(HF Radar)從事海洋(主要是海流)觀測的技術也迅速發展，直到今日，高頻雷達系統如美國的 CODAR 系統或德國的 WERA 系統等都

已經相當成熟。

前述這些岸基高頻雷達系統能夠觀測非常大範圍的海面流場或海浪場的資訊，但畢竟造價比較昂貴些，天線占地面積也比較大，更重要的是存在相對比較大的觀測盲區(blind area)，難以獲得近岸幾公里內的海浪與海流場資訊。近期發生的觀光巴士落海事件、前不久發生的多件貨輪擱淺漏油事件、或者是漁船失事人員落海等事件，都需要近岸的流場來作為搜救的參考；沿岸漂沙、海水浴場、港口操船以及河口污染物傳送等也都需要比較高解析度的流場與波場來分析或判斷。同樣利用雷達所建立的近岸觀測系統因此被用來彌補遠距高頻雷達的盲區，近岸雷達系統大都採用導航用的航海雷達(marine radar)，主要以 X-波段為主，它具有盲區小、造價低、機動便捷、經濟實用和時空解析度高等特點，而且可以方便地架設在岸邊或船舶上從事海洋觀測，它是未來近岸和機動海區海浪場和海面流場遙測的趨勢。

## 二、同調雷達原理

大多數的近岸航海雷達都是非同調(non-coherence)雷達，這種雷達發射電磁波射向海面，由同一座雷達天線接收回波訊號，雷達呈現的影像是由於海面粗糙度所造成，而海面粗糙度與海洋物理參數如風、波、流有關，因此可以用來分析波浪或流況，透過雷達回波與波高之間的調變轉換關係(Modulation transfer function, MTF)，並以波浪的分散關係式(dispersion relation)作為濾波器分離海洋波浪或非波浪訊號，海洋波浪參數與海流可以被分析獲得

1 國立台灣海洋大學海洋環境資訊系助理教授

2 國立成功大學近海水文中心博士級助理研究員

3 Imaging Science Research, Inc., VA, USA

(吳立中等人, 2005, 2006)。

在光學理論上, 假設兩點光源發出同頻率的單色光波, 如果二者沒有隨時間變化的相位差, 則稱這兩束光波是同調(coherence)的。雷達借用這一個名詞說明其發射信號、接收信號與基準信號之間的相位關係, 如果雷達發射的脈沖訊號間的相對相位關係是已知的(但脈沖的絕對初始相位是隨機的), 則稱此為同調雷達。相位從字面上的意思就是相對位置, 因此談及訊號的相位總是指相對參考訊號而言, 舉例來說, 一個正弦訊號的相位就是相對某個同頻率參考訊號的相位, 另一種說明是, 移動波形使之重合需要幾分之幾的波長, 相位就是對應那個角度的量值, 因此, 同調訊號指的就是訊號間的相對相位是一定的。來自同一輻射源的訊號, 即使它本身是隨機的, 如果兩個通道(channels), 一個目標通道、一個直接通道, 他們之間的相位也是同調的, 或者是同步的, 這樣就可獲得由於目標都卜勒頻移引起的相位變化。同調訊號並不要求兩個訊號的振幅相等, 主要是頻率成分相同而且具有確定的相對相位關係, 同調訊號所包含的資訊量比非同調訊號回波的資訊量要大的多, 同調訊號的相位資訊可以用來測量目標的速度、對目標進行成像和萃取目標特徵等, 而非同調雷達則難以做到這一點。同調訊號與非同調訊號的處理也不一樣, 對於同調訊號, 各個脈沖的相對相位關係是已知的, 故可以利用匹配濾波器進行同調累積計算, 處理增益很高, 而非同調訊號進行處理時, 獲得的處理增益沒有同調訊號來得高。

同調雷達測波系統與非同調雷達測波系統類似, 不一樣的是非同調航海雷達測波系統所獲得的影像是海表面的回波強度, 而同調雷達系統獲得的影像則包含了來自於波浪軌跡速度的回波。非同調的分析方法也可以應用於同調雷達的波浪分析, 但因為同調雷達為直接量測速度, 因此不需要 MTF 調變轉換關係式。

利用三維傅立葉轉換可將雷達回波影像時序列  $I(x, y, t)$  轉換為影像波數譜  $S(\Omega-K)$ , 從這個雷達影像譜可以得知角頻率與波數之間的關係。而海洋的波浪運動被認為必須符合分散關係式(dispersion relation), 如下式,

$$\omega = \sqrt{g|\vec{k}| \tanh(|\vec{k}|d)} + \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (1)$$

上式中  $d$  為水深,  $\vec{k}$  為波數向量,  $\omega$  為角頻率,  $g$  為重力加速度,  $\vec{U} = (U_x, U_y)$  是海面流速向量。根據分散關係式我們可以得知各種波數和角頻率成分波的能量分佈呈現一個理想的喇叭形狀, 如圖 1 所示, 這是在海面上沒有流速的情形下始成立, 也就是(1)式中的  $U=0$ 。當海面存在有流速時, 產生了都卜勒效應, 使圖 1 的喇叭能量分佈出現扭曲, 因此可以藉由疊代方法, 套疊分散關係式描述的能譜圖與傅立葉轉換後的雷達波數譜, 求得表面流速。

透過雷達海況觀測系統與現場實測儀器同步量測的結果, 可以建立調變轉換關係式(MTF), 藉由該關係是則可以將雷達影像譜  $S(\Omega-K)$  轉換成波浪波數譜(ocean wavenumber spectra), 這個調變轉換關係可能跟入射掠角(grazing angle)有關, 也就是跟雷達系統架設高度有關, 跟海面風速可能也有關係。

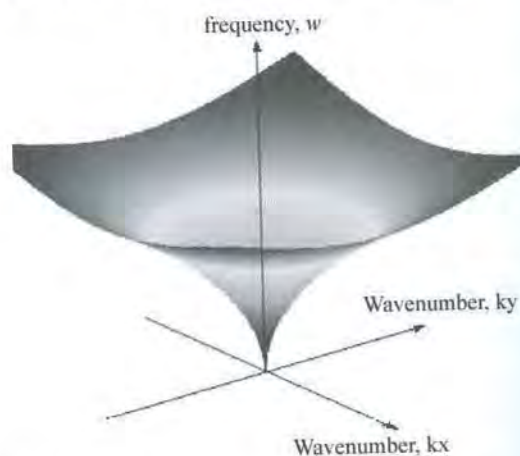


圖 1 分散關係式所描述的各角頻率與波數成分波的能量分佈(無表面流速時)

### 三、同調雷達系統

國際間已開始有些研究單位或公司開始進行同調雷達的開發研究。德國 GKSS 研究中心從事以雷達進行海洋觀測研究超過二十年, 目前商業販售的 WaMoS 系統乃源自於該中心, 該中心目前正發展一套新型的同調雷達系統, 稱為雷達都卜勒流速剖面系統(Radar Doppler Current Profiler, RDCP) (Cysewski and Ziemer, 2008)。ADCP 透過聲波的都卜勒效應量測流速, RDCP 則透過雷達電磁波的都卜勒效應量測流速, 兩者原理相近。RDCP 系統由兩架 X-波段航海雷達組成, 如圖 2, 雷達的同調化訊號擷取與影像處理軟體均已開發完成, 該系統運作時, 每架電腦每

秒發射 1000 個脈沖波，接收時則劃分為 254 個等距元素(cell)，每個元素長約 7.5m，觀測系統共有三種模式：連續旋轉觀測模式、特定角度間斷觀測模式以及固定角度觀測模式，選用前述第三種作業模式時，通常兩架雷達會設定為正交，以便取得流速向量。當此系統安裝在船舶上時，為了修正雷達訊號，船體的運動姿態、GPS 位置與船上的氣象儀器資料也一併被儲存至系統中，船上搭載的 1200 kHz ADCP 資料也同時被收錄以作為後續比較驗證之用。

應用快速傅立葉轉換到前述 254 個元素時序列上，獲得都卜勒頻譜，根據都卜勒的頻移，每個雷達的徑向流速可知，兩個雷達的觀測結果可以獲得流速向量圖。該系統對於海面的輻合(convergence)與輻散(divergence)海流區域、以及河口水舌、海洋渦旋(eddy)、海洋峰(front)等海洋現象都可以測得，如圖 3 為該系統應用於德國易北河口附近的流速量測，量測結果確認諸多海洋現象，與現場 ADCP 量測結果比較也相當一致。



圖 2 德國 GKSS 研發的 RDOP 同調雷達海流觀測系統

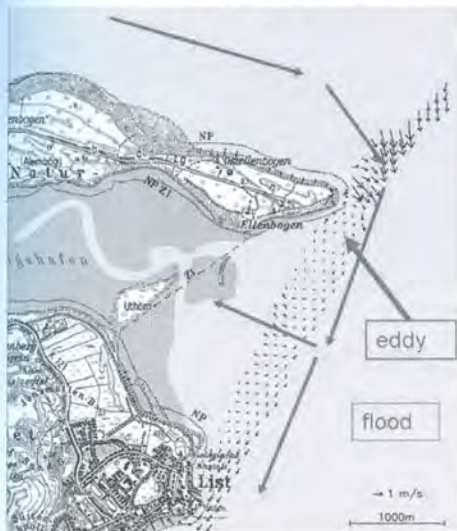


圖 3 RDOP 量測結果之一例(Cysewski et al., 2010)

另外，美國影像科學研究公司(Imaging Science Research, ISR)也正開發同調雷達海洋觀測系統，包含了同調接收(Coherence-on-receive)系統與全同調(fully coherence)系統兩種(Trizna, 2009)。它是由一架同調雷達，搭配訊號收發卡的控制電腦以及分析軟體所組成。ISR 的系統主要架設在美國工程師兵團位於北卡羅來納州 Duck 的現場研究中心(Field research facility, FRF)進行測試，如圖 4 所示。它採用 48 轉的 SiTex 航海雷達，影像重現時距僅 1.25 秒，天線長度為 9 呎，原來的 25 KW 磁控管被一個 5 W 的固態功率放大器(Solid-state power amplifier)取代。一般脈沖雷達若須提高解析度就必須減短脈沖(pluse)的寬度，如此一來便會降低發射能量也連帶的降低了觀測的距離，因此若須提高觀測距離便必須加大發射功率，通常這一點並不容易做到，美國 ISR 公司的同調雷達系統採用所謂的調頻脈波(FM Chirp pulse)壓縮技術來提昇同調的效率。它是指雷達在發射的脈波中利用頻率調變(或稱脈波壓縮)的方式而得到較脈沖雷達更高的解析度，且無需變動發射脈波寬度(Mahafza, 1998)。此系統的電磁波波形與發射則是由一塊 ISR 公司自行設計的訊號收發卡所控制，脈衝重複頻率(Pulse repetition frequency, PRF)為  $5 \times 10^4 \text{ Hz}$ ，訊號增益約 22~25 dB，係透過累加 50 個或 25 個連續脈沖訊號所得來，這樣的處理方法等同於 1~2K Hz 的脈衝重複頻率。該系統擷取發射脈沖的中間頻率，取樣頻率為 100 MHz，等同於空間解析度 1.5m，再由於脈沖壓縮的關係，產生同相位且正交的複數訊號，其特徵空間解析度為 3m，從這複數訊號可以計算出訊號回波處的相位，兩個鄰近回波脈沖間的相位差除以脈沖間的時間差可以計算出都卜勒頻率  $f_D = d\Phi/dt$ ，此頻率與回波訊號的徑向速度有關。

此系統之波浪解析是透過連續 64 張的觀測，取用  $64 \times 64$  pixels 子視窗進行三維傅立葉轉換計算波浪波數譜，頻譜則是積分波數譜獲得。至於該系統對於海流量測的空間解析度則是  $3\text{m} \times 3\text{m}$ ，對於海岸應用相當有利，一架雷達僅能觀測雷達徑向的流速分量，要獲得流速空間分佈向量圖則需兩台雷達進行交會觀測。

#### 四、基隆測試結果

民國 99 年 10 月 15 日，一架接收同調(COR)雷達被安裝在基隆海洋大學濱海的電資學院大樓頂樓

進行測試觀測，如圖 4 所示，主要觀測範圍為海洋大學海堤前方灣澳，觀測區域的水深與地形如圖 5，觀測海域遠方為基隆嶼(距離雷達約 3 海浬)，前方約 0.8 海浬處有一防波堤。在觀測範圍內水深約 18 米處佈設有一架底碇式 ADCP 量測波浪與海流，該資料可為雷達觀測結果驗證之用。完成系統的校調並解決所出現的系統相容等問題後，同調雷達自 10 月 21 日開始每小時的自動觀測，每小時量測 512 張影像進行分析，測試期間為期約一個月。



圖 4 同調雷達安裝於海洋大學之照片



圖 5 觀測範圍水深與地形

該系統透過圖形化使用者介面(Graphical User Interface, GUI)進行相關的設定，圖 6 為其中設定之主畫面，共包含了取樣頻率設定(DDS)、個別通道(channel)增益的減衰設定(Attenuation setting)以及資料取樣設定(Acquisition Control setting)等，確定這些設定參數後傳送給控制卡開始進行觀測取樣。

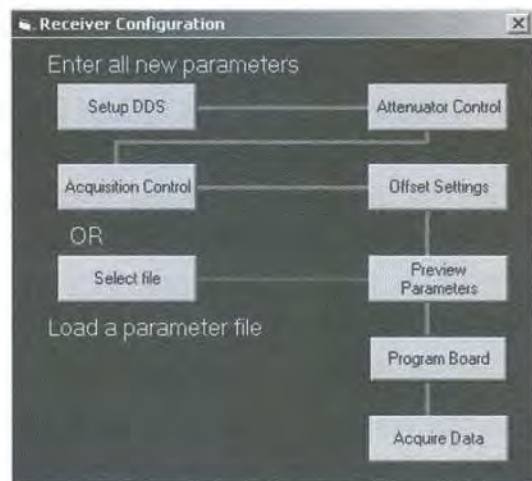


圖 6 雷達系統 GUI 設定畫面

圖 7 是波浪分析結果的顯示介面，共包含三個部分，左上方是取自於 32 個解析频段其中的 12 個頻率，顯示的是波數譜，圖中的同心圓是不同的水深條件下理論的波數與頻率關係；自波數譜轉換為頻譜的時序列展示於左下方的圖裡，橫軸為時間，基本上每小時進行一次觀測後，該圖會更新乙次，縱軸為頻率，圖中色階為頻譜能量分佈；結果右方則顯示了雷達回波，分別顯示 512 個觀測(影像)結果的平均以及第一個觀測結果。波高、週期等結果可以由波浪能譜積分獲得。

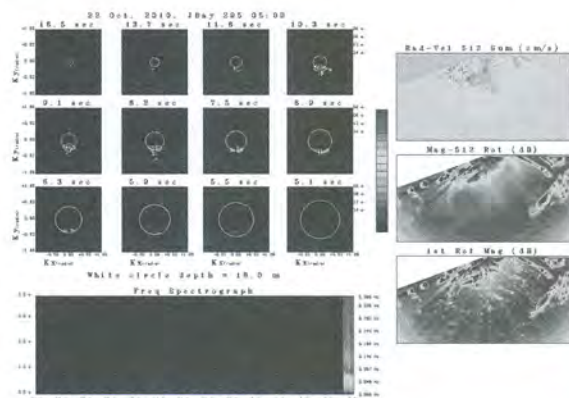


圖 7 波浪能譜分析結果

圖 8 和圖 9 是 10 月 22 日下午 15:00 和 16:00 的徑向流速分量分析結果，圖中左方為海洋大學前防波堤，請參見圖 4，圖中約在 20 度，距離 900m 處是和平島防波堤(如圖 2 照片中所見之防波堤)。根據前面對系統的描述得知海流量測的每個雷達回波面積約為 3m×3m，因此有精細的海面流況解析結果。圖 8 和圖 9 中主要的特徵是在海洋大學海堤前方出現正的流速分量，也就是有股離岸流出的水流出現，且此

結果在那幾天都持續出現，該處有一地下涵管，將海洋大學下水道的水排入海中，根據當時的天氣記錄，前後幾天都有大雨發生，合理推測排水涵管的出水造成該處離岸流速的出現。再觀察圖 8 與圖 9 左上方角落，防波堤口附近則有相反地流速出現，隨著降雨增加愈見顯著。圖 10 則是 10 月 22 日開始到 11 月 18 日的流速變化，橫軸為時間，縱軸為方位角，該圖顯示的是徑向距離在 660-700m 之間的平均流況，換句話說，是與雷達距離 660-700m 之間的這扇形區域的流速變化，圖中可以約略看出這一個月以來潮流反應在徑向速度上的變化，同樣地分析程式可以做觀測範圍內任意處的流速解析，如圖 11 所示，圖中顯示排水涵洞處的流速分量約 0.33m/s，灣澳內其它地方的流速分量約 0.18m/s。

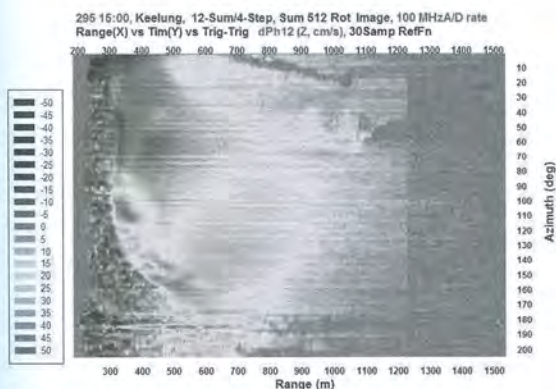


圖 8 海洋大學前灣澳的徑向流速分量(2010/10/22 15:00)

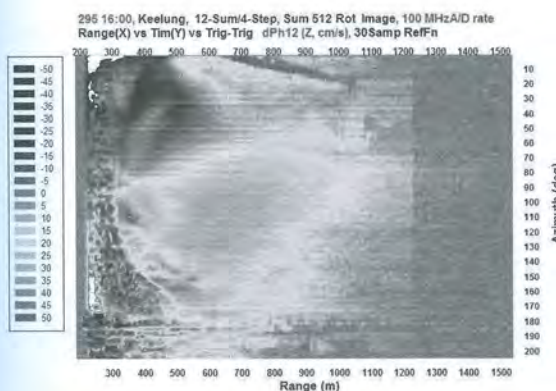


圖 9 海洋大學前灣澳的徑向流速分量(2010/10/22 16:00)

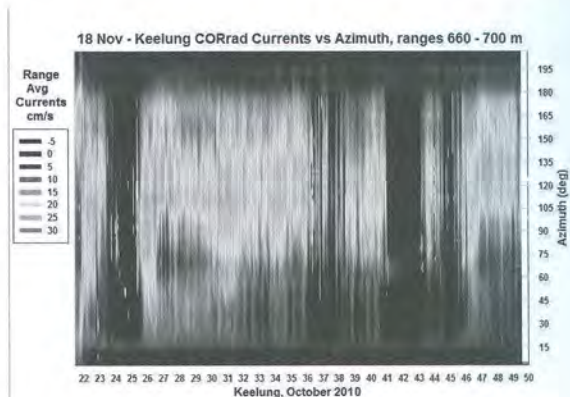


圖 10 距離同調雷達 660-700m 處流速變化時序列

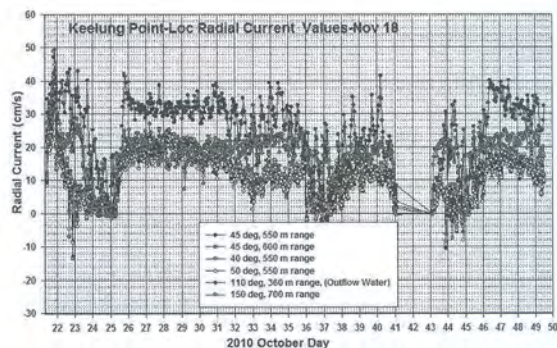


圖 11 六個設定點的流速變化時序列

## 五、結 論

利用雷達從事海洋觀測正日益興盛，不論研究或實務領域都有很大的應用空間。航海雷達的觀測範圍約為雷達前方數公里內，它的觀測解析度高，非常適合應用於近岸海域觀測，結合高頻雷達對外海的觀測，剛好建構完整地海岸與海洋遙測網。近期新發展的同調雷達與以往的非同調式觀測的差異在於它能記錄發射雷達波的相位，透過都魯勒理論，可以直接分析觀測範圍內水粒子的運動速度，進而求得波浪與流場，也由於不同的量測原理之故，同調雷達的解析度可以達到 3m 左右，對於近岸觀測已足夠。本文說明同調雷達的原理並報告去年(民國 99 年)在基隆海洋大學一個月的初步測試結果，顯示波浪與海流的量測都獲得合理的結果。

## 致 謝

海洋大學現場試驗感謝電資學院張忠誠院長的協助以及電資學院老師們的支持，莊貴忠先生與杜恆毅先生協助安裝雷達系統，特此一併致謝。德國雷達系統的參訪係承蒙國科會台歐盟國合計畫—歐盟科研架構計畫 FP7【THESEUS】—因應氣候變遷之創新

海岸防災科技(NSC 98-2923-I-006-001-MY4)之補助，特此申謝。

### 參考文獻

1. 吳立中、李汴軍、高家俊、董東璟、郭純伶，航海雷達在觀測海洋波浪與流之開發，海洋及水下科技季刊，第 15 卷第 2 期，第 8~15 頁，民國 94 年。
2. 吳立中、董東璟、林家豐、高家俊，從雷達影像萃取近岸海域表面流場之研究，海洋工程學刊，第 6 卷第 2 期，第 81-94 頁，民國 95 年。
3. Mahafza, B.R., Introduction to radar analysis, CRC Press, Boca Raton, 1998.
4. Trizna, D., A coherent marine radar for decameter-scale current mapping and direct measurements of directional ocean wave spectra, OCEANS, Biloxi MI, pp.1-6, Sept. 2009.
5. Trizna, D., Coherent Microwave Marine Radars for Deterministic Wave Profile Mapping, Decameter-Scale Coastal Current Mapping and Ocean Wave Spectra Measurements, OCEANS, Biloxi MI, Sept. 2009.
6. Cysewski, M. and Ziemer, F., First experiences and applications for Radar Doppler Current Profiler. Proceedings of Hydro 8 International Conference, pp. 4-6, UK, 2008

## 台灣中油股份有限公司 地下水污染整治工程隊工程服務

服務項目：

1. 儲槽基礎監測系統工程。
2. 場址地下水污染調查及範圍界定。
3. 地下水監測井、抽氣井及注氣井設置。
4. 監測井洗井、水樣、土樣及氣樣採樣分析。
5. 土壤油氣抽除及地下水污染整治評估。
6. 地質鑽探採樣及地質描述
7. 各種電子圖及舊圖檔格式轉換與建置。
8. 地理資訊系統及管線建置、更新；維護。



油槽基礎調查工作(鑽探採樣)



監測井設置(鑽井作業)



土壤採樣工作



土壤油氣抽除工作(整治工作)



探採事業部：苗栗市中正路 140 號

電話：037-262100

[http://www.cpc.com.tw/big5\\_BD/tped/home/index.asp](http://www.cpc.com.tw/big5_BD/tped/home/index.asp)