

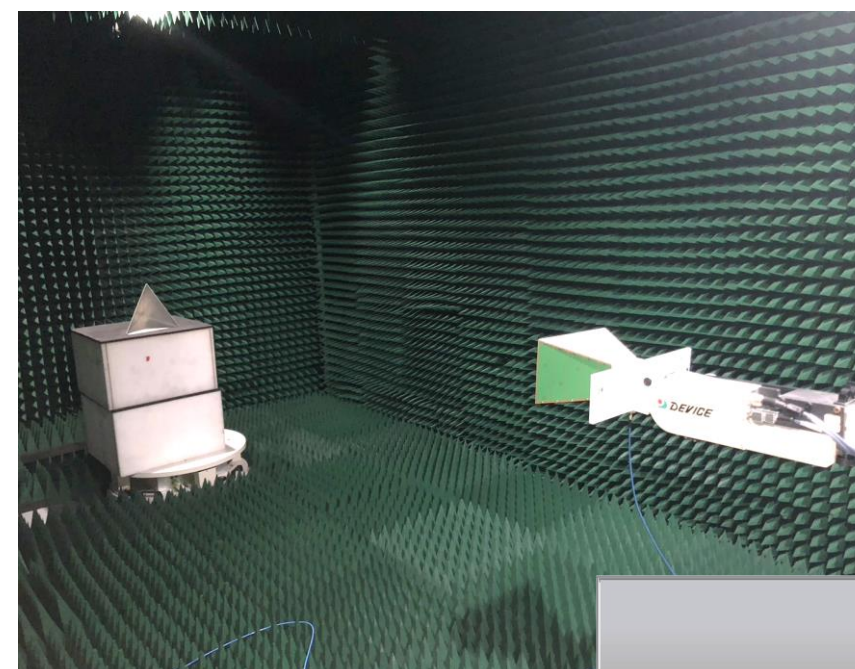


113年GB-SAR系統的重建與改置中期 (車廂改裝) 成果報告書

農業部農村發展及水土保持署
與您一起打拼

GB-SAR系統的重建與改置(車廂改裝)

成果報告書



113
年度



農業部農村發展及水土保持署
54044南投市中興新村光華路6號
<https://www.ardswc.gov.tw>

農業部農村發展及水土保持署 編印
中華民國113年12月

農業部農村發展及水土保持署

計畫編號：ARDSWC-113-095

GB-SAR 系統的重建與改置中期(車廂改裝)
Refabrication of GB-SAR system
(Carrier Modification)

(成果報告書)

執行單位：國立中央大學

執行期間：113 年 02 月 07 日至 113 年 12 月 31 日

計畫主持人：于 玘 兼任副研究員

農業部農村發展及水土保持署 編印

中華民國 113 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考)

GB-SAR 系統的重建與改置中期（車廂改裝）

摘要

地基合成孔徑雷達(GB-SAR)配合干涉技術的發展，是地表形變監測的有效工具。國立中央大學利用現有的高價儀器（網路分析儀、訊號產生器...及移動成像軌道），組成新形式的 GB-SAR 系統並結合改裝後「移動式雷達車」，以其穩定運作平台且更長時效的電源供應能效。嘗試重建 Ku、C、S 或 L 波段的 GB-InSAR 硬軟體，以獲得適用於台灣地區邊坡偵測的最佳波段組合，解決現有 GB-SAR 受植生區域影響甚大，無法穿透密林區的困境。

嘗試解決 GB-SAR 觀測邊坡，因波長限制受限之實務問題；及持續長時間監測時，對穩定電源的需求問題。目前已完成 GB-SAR 實驗設計及車廂重建與改置作業，後續可執行戶外實驗測試。

關鍵詞：地基合成孔徑雷達、網路分析儀、差分干涉、形變監測

Refabrication of GB-SAR system (Carrier Modification)

Abstract

Ground-Based synthetic aperture radar (GB-SAR) is an effective tool for monitoring surface deformation as interferometry develops. NCU's existing valuable instruments (vector network analyzers, signal generators... and mobile imaging tracks) form a new form of the GB-SAR system combined with a modified " GB-SAR system", with its stable operating platform and longer time effective Power supply energy efficiency. Try to rebuild the GB-SAR hardware and software of Ku, C, S, or L bands to obtain the best band combination suitable for Slope observation of deformation in Taiwan, and solve the problem that the existing GB-SAR is greatly affected by vegetation areas.

The dilemma of being incapable of penetrating densely forested areas. Try to resolve the convenient problem of GB-SAR limited by wavelength and slope observation. And continuous long-term monitoring, the demand for stable power supply.

The practical issues of GB-SAR observation slopes displacement due to wavelength limitations and the necessity for a stable power supply during long-term monitoring will be resolved. The GB-SAR experimental design and carriage refabrication and modification have been completed, and the planned outdoor experimental tests will be proceeded with.

Keywords: Ground based SAR (GB-SAR), Vector Network Analyzer (VNA), Differential Interferometry, Deformation Monitoring

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 緒論	1-1
第一節 GB-SAR 影像特性及用途.....	1-1
第二節 GB-SAR 目標形變監測原理.....	1-4
第二章 研究構想及方法	2-1
第一節 GB-SAR 使用限制.....	2-1
第二節 以 VNA 基礎的 GB-SAR 系統構想規劃.....	2-3
第三章 GB-SAR 系統重建與改置	3-1
第一節 掃描成像平台重建規劃	3-1
第二節 GB-SAR 測試作業.....	3-6
第三節 微波暗房角反射器選定	3-12
第四節 微波暗房整體測試	3-26
第五節 改置「移動式雷達車」前期整備（車廂改裝）	3-42
第四章 結論及建議	4-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期初、期中及期末審查紀錄暨回覆辦理情形	1

表次

表 2-1 測試平台規格需求	2-5
表 3-1 二維(XY)軸向掃描儀規格參數	3-3
表 3-2 天線連接基座規格參數	3-4
表 3-3 作動控制器規格參數.....	3-5
表 3-4 測試天線主要規格表(1).....	3-8
表 3-5 測試天線主要規格表(2).....	3-8
表 3-6 各型測試角反射器 <i>RCS</i> 值(1).....	3-24
表 3-7 各型測試角反射器 <i>RCS</i> 對比值	3-24
表 3-8 各型測試角反射器 <i>RCS</i> 值(2)	3-25
表 3-9 GB-SAR 系統參數及預期效能.....	3-30
表 3-10 GB-SAR 系統實驗參數	3-31

圖次

圖 1-1 GB-SAR 系統組成概念	1-5
圖 1-2 具 X、Y 軸的滑軌系統	1-7
圖 2-1 國立中央大學現有 GB-SAR 相關設備	2-3
圖 2-2 網路分析儀(AGILENT N5245A PNA-X)	2-4
圖 2-3 訊號產生器	2-4
圖 2-4 頻譜分析儀	2-5
圖 2-5 電波無反射室測試實景	2-6
圖 3-1 二維掃描成像基礎構建配置圖	3-1
圖 3-2 二維(XY)掃描成像儀	3-2
圖 3-3 AGILENT N5245A PNA-X VNA 儀器介面	3-7
圖 3-4 ROHDE & SCHWARZ SMW200A 儀器介面	3-7
圖 3-5 ROHDE & SCHWARZ FSV3000 儀器介面	3-8
圖 3-6 測試天線尺寸對照表	3-9
圖 3-7 GB-SAR 滑軌系統架構組織	3-10
圖 3-8 GB-SAR 滑軌系統硬體控制功能	3-10
圖 3-9 GB-SAR 滑軌系統 X、Y、Z 軸軟體控制	3-10
圖 3-10 GB-SAR 滑軌系統 POLARIZATION、ELEVATION 及 AZIMUTH TABLE 軟體控制	3-11
圖 3-11 GB-SAR 滑軌系統 CIRCULAR 控制器軟體	3-11
圖 3-12 角反射器的反射原理示意	3-12
圖 3-13 三種人工角反射器的幾何形狀	3-13
圖 3-14 雙面型角反射器	3-15
圖 3-15 邊長 30 CM 三面(角錐)型角反射器	3-19
圖 3-16 邊長 80 CM 三面(角錐)型角反射器	3-19

圖 3-17 邊長 80 CM 三面(角錐)型角反射器戶外測試(1).....	3-20
圖 3-18 邊長 80 CM 三面(角錐)型角反射器戶外測試(2).....	3-20
圖 3-19 邊長 170 CM 三面(角錐)型角反射器	3-21
圖 3-20 邊長 170 CM 三面(角錐)型角反射器戶外測試	3-21
圖 3-21 邊長 20 CM 標準 雙面型角反射器(1).....	3-22
圖 3-22 邊長 20 CM 標準 雙面型角反射器(2).....	3-22
圖 3-23 由 PC 端自動化(軟體)控制的 GB-SAR 滑軌系統.....	3-26
圖 3-24 由軟體控制的 GB-SAR 滑軌系統運作	3-26
圖 3-25 GB-SAR 訊號發射測試實景	3-27
圖 3-26 GB-SAR 訊號發射測試的儀器規劃.....	3-28
圖 3-27 ROHDE & SCHWARZ FSV3000 頻譜分析儀訊號產生設定	3-28
圖 3-28 無角反射器的 C-BAND 反射(弱)訊號	3-29
圖 3-29 角反射器的 C-BAND 反射(強)訊號.....	3-29
圖 3-30 微波暗房 GB-SAR 測試場景及位置(1).....	3-33
圖 3-31 微波暗房 GB-SAR 測試場景及位置(2).....	3-33
圖 3-32 網路分析儀(VNA)突發性故障	3-34
圖 3-33 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(1)	3-35
圖 3-34 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(2)	3-35
圖 3-35 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(3)	3-36
圖 3-36 網路分析儀(VNA) 維修後狀況(1).....	3-37
圖 3-37 網路分析儀(VNA) 維修後狀況(2).....	3-37
圖 3-38 網路分析儀(VNA) 維修後測試場景(1).....	3-39
圖 3-39 網路分析儀(VNA) 維修後測試場景(2).....	3-39
圖 3-40 經 RANGE COMPRESSION 處理回波訊號(無角反射器).....	3-40

圖 3-41 經 RANGE COMPRESSION 處理回波訊號(角反射器).....	3-40
圖 3-42 經 AZIMUTH COMPRESSION 處理回波訊號(無角反射器)...	3-41
圖 3-43 經 AZIMUTH COMPRESSION 處理回波訊號(角反射器).....	3-41
圖 3-44 GB-SAR 車廂發電機(1)-電流檢測	3-43
圖 3-45 GB-SAR 車廂發電機(2)-電壓檢測	3-43
圖 3-46 GB-SAR 車廂發電機(3)-輸出電流調校	3-44
圖 3-47 GB-SAR 車廂發電機(4)-輸出電流、電壓調校.....	3-44
圖 3-48 液壓系統漏油處理-漏油現象(1).....	3-46
圖 3-49 液壓系統漏油處理-漏油現象(2).....	3-46
圖 3-50 液壓系統漏油處理-支腿更換(1).....	3-47
圖 3-51 液壓系統漏油處理-支腿更換(2).....	3-47
圖 3-52 液壓系統油壓缸更換(1).....	3-48
圖 3-53 液壓系統油壓缸更換(2).....	3-48
圖 3-54 液壓系統電子控制閥漏油維修(1)	3-49
圖 3-55 液壓系統電子控制閥漏油維修(2).....	3-49
圖 3-56 車廂整理(1)-液壓系統整理翻修	3-50
圖 3-57 車廂整理(2)-液壓系統整理翻修	3-50
圖 3-58 車廂整理(3)-液壓系統整理翻修	3-51
圖 3-59 車廂整備(4)-結構整理翻修	3-51
圖 3-60 電源線整理與補強(1).....	3-53
圖 3-61 電源線整理與補強(2).....	3-53
圖 3-62 移動式雷達車廂及載具構想.....	3-54
圖 3-63 車廂整備(5)-結構補強.....	3-55
圖 3-64 車廂整備(6)-結構補強	3-55

圖 3- 65 車廂修改規劃(1)-上掀式車門	3-56
圖 3- 66 車廂修改規劃(2)-左右側開式車門	3-57
圖 3- 67 二維(XY)軸向掃描儀 Y 軸(高度)滑軌縮短優化	3-57
圖 3- 68 二維(XY)軸向掃描儀 Y 軸(高度)滑軌比較	3-58
圖 3- 69 「北極星測繪科技有限公司」 G2000M GB-SAR(1)	3-59
圖 3- 70 「北極星測繪科技有限公司」 G2000M GB-SAR(2).....	3-59

第一章 緒論

第一節 GB-SAR 影像特性及用途

合成孔徑雷達干涉測量技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是在合成孔徑雷達(SAR)基礎上發展起來的測量手段。InSAR 利用相位差，以科學方式解決 SAR 成像(解析度)難題。能夠有效獲取高精度的地表資訊，以提前預測地基形變，防止地質災害的加劇演變。與傳統監測技術相較，InSAR 在地質災害監測上展現出巨大的優勢，已逐漸成為地基形變監測的新利器。

一、特性

地基合成孔徑雷達(Ground-Based SAR, GB-SAR)是近年來新興的形變監測技術^[1]，該技術將傳統衛(星)載、空(機)載 SAR 技術移轉到地面，利用 InSAR 成像技術，在斜距和方位方向實現高解析度成像；並具有解析度高、穿透性適度、運用性廣等特點。能夠對邊坡、水壩、橋樑、大型建物的微動形變和結構變化，進行全天候的大面積監測。相較於 GPS 和傳統固定式感測器，GB-SAR 具有工作連續性、覆蓋面大、精度高等優點。

GB-SAR 系統通常由雷達感測器、高精度(電子控制)位移軌道平台、即時監測軟體、電腦系統及遙測數據傳輸系統等組成。在邊坡形變量的即時監測上，採用地基重軌 InSAR 技術來實現。在監測過程中，首先將雷達系統安裝在坡面一側，通過雷達波束覆蓋邊坡表面，採用雷達感測器在軌道平台移動的方法獲取資料。其後將蒐集的雷達回波資料傳輸或記錄，最後再對不同時刻的雷達影像資料進行差分干涉，以提取相關形變資訊。

GB-SAR 的雷達感測器沿著固定導軌滑動，可省略衛載 InSAR 影像資料處理時基線估算難題。GB-SAR 系統測量是相對形變，無須去除地平效應，故重複觀測時間短、通常數分鐘可觀測數公里距離，對局部區域的目標達成高精確度、高解析度的成像。

由於系統體積小，可根據目的地區域特點，選擇相應的觀測平台來滿足形變監測的需求，並具有靈活應用的優勢。同時 GB-SAR 對微量(小)形變的高度敏感性，相較其他形變測量技術，有其獨特的發展價值，相輔相成達成監測需求。

二、用途

邊坡滑落過程通常緩慢，漫長的形變過程中，地表形變量甚小。InSAR 技術對地表微小形變，具有 mm 級(甚至更小)的探測能力；對滑坡監測深具意義。

干涉技術所實現 mm 等級微形變監測，不僅可以對地質滑坡等自然災害，進行有效的靜態形變監測，還可以對水壩、橋樑、大型人造建築、水壩及邊坡(道路、河床)等目標即時形變監測。具有速度快、精度高、功耗低的即時監測，且覆蓋範圍廣、攜行方便，容易操作；且具全天候、性價比諸多優點。

三、機載、衛載及地基SAR比較

差分干涉 SAR 測量系統按載具分為機載、衛載和地基 (Ground Based) 等三種型態，GB-SAR 與前兩者相比，具有以下優勢：

(一)針對邊坡滑落等地表形變潛在區域，提供了一種機動性高、操作方便的新監測方式^[2]。

- (二)應用 GB-SAR 差分干涉測量，精度可以達到公釐(mm)以下等級，具體取決於回波信號的強度以及目標距離的遠近。
- (三)在測量方式上，GB-SAR 採用零基線重複軌道干涉測量，即在同一個位置對目標進行重複成像。故重複觀測週期短，可以在短時間(幾分鐘甚至幾秒鐘)就完成完整個區域監測^[3~5]。
- (四)GB-SAR 克服機(衛)載 SAR 差分干涉測量時，時空容易失去相干性和時空解析度方面不足的潛在困擾。同時 GB-SAR 技術沿襲了 InSAR 技術的全天時、全天候、局域性、高精度、定點連續監測、靈活且可操作等優勢，在變形監測與災害預警等方面的應用越來越受到關注。
- (五)車載方式的 GB-SAR，提供了交通及運作的方便性，並輔以更長時間的穩定供電效能。

第二節 GB-SAR 目標形變監測原理

GB-SAR 採用電磁波主動探測成像^[6]，利用差分干涉技術，對目標體發射和接收微波訊號；並計算雙時段之間的相位差來監測目標體的形變和微動。GB-SAR 先後雙次發射並接收電磁波訊號，在此期間目標視線方向(LOS) 形變量記作 d_{los} ，雙次接收訊號的相位 φ_1 、 φ_2 ，則雷達視線方向(LOS) 的形變量可表示為

$$d_{los} = (\lambda/\pi) / (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

一、以VNA為基礎的GB-SAR系統

向量網路分析儀 (Vector Network Analyzer 或稱 VNA) 此測試儀器，已協助並開發了無數的無線電新技術；現代 VNA 更廣泛用於射頻和高頻應用。

在電子裝置的設計開發中，工程人員會透過模擬，降低實體原型反覆組裝，以運算加速上市時間。VNA 可驗證這些設計及模擬，快速準確地驗證射頻組件和裝置的效能。

(一)歷史緣起

2003 年 Ellegi-LiSALab 公司獲得「歐盟聯合研究中心(JCR) 的開發技術許可。首先開發商業應用的線性 SAR (LiSA) 系統。以傳輸訊號線性掃頻的 VNA 解決方案，使用簡單的電子硬體在雷達射頻上開發具高度靈活性的 GB-SAR 系統；後續的十幾年內^[7]，諸多公司和大學也對 GB-SAR 展開相關研究^[8~11]。

(二)GB-SAR 使用 VNA 益處

以商用現貨 (COTS) 設備，獲得高品質 SAR 影像。現代量測設備的不斷發展 (跨越幾十年)，其功能大幅增強。製造商通

常沒有意識到可以用於多方的應用上，使用廉價 FMCW 設備，設計地面微波遙測系統，並在窄頻寬的要求下運作^[12~13]。

近十年來 GB-SAR 類型微波遙測系統的發展重點是寬頻系統籌建，主因於向量網路分析儀（VNA）普及且價格調降到可接受程度。因此寬頻雷達量測系統開始發展，在操作方便、儀器安設、測量時間和移動性上，提供更好的配置與效能；這些系統大多以 VNA 為主要量測儀器。

二、GB-SAR系統組成

GB-SAR 系統由「無線電(雷達)射頻」和「軌道運動」雙大部分組成（如圖 1-1 所示）。雷達射頻部分由向量網路分析儀、微波訊號產生器(或頻譜分析儀)、及雙具角錐天線組成。

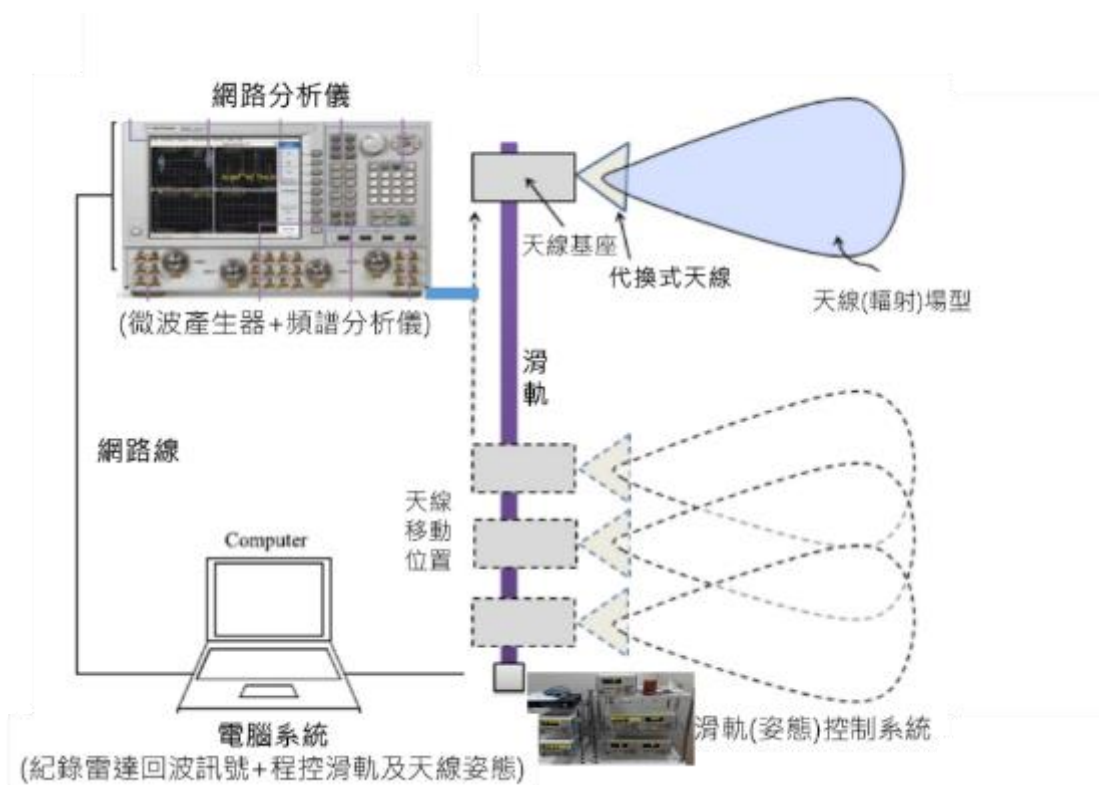


圖 1-1 GB-SAR 系統組成概念

- (一)實驗裝置由向量網路分析儀(VNA)、搭配脈波發射模組(Pulsed RF measurements)，除提供模擬訊號外，並與訊號產生、頻譜分析儀整合成發射機功率與掃頻測試平台，及接收機校驗測試平台，以進行全方位的系統測試；其分析儀通過 RF 電纜連接到發射和接收角錐天線。
- (二)VNA 與工作站 PC 連接，可透過通用匯流排 GPIB(General Purpose Interface Bus)或乙太網路相連接。
- (三)雷達訊號由 VNA 在步進頻率掃描模式下產生，並將訊號放大至合適的 dBm，然後饋入開關進行極化選擇。然後訊號通過天線的選定埠位傳輸。
- (四)雷達波的背向散射訊號通過開關動作，再次選擇的埠位饋送到另一個天線進行極化，並由連接的電腦記錄(或直接由 VNA 收錄)；分別用於發射和接收的雙個天線，通同彼此相同。
- (五)角錐天線安裝在滑軌系統的天線基座上，並透過滑軌(姿態)控制系統，在導軌的線性定位系統上控制移動位置。
- (六)滑軌的運動部分由 X、Y 軸導軌、運動控制器及水平和垂直運動的各別步進馬達組成(如圖 1-2 所示)。水平運動主要用於 SAR 成像，同時垂直運動功能也可加入系統運作，以獲得另一個方向軌道干涉配置的基線。

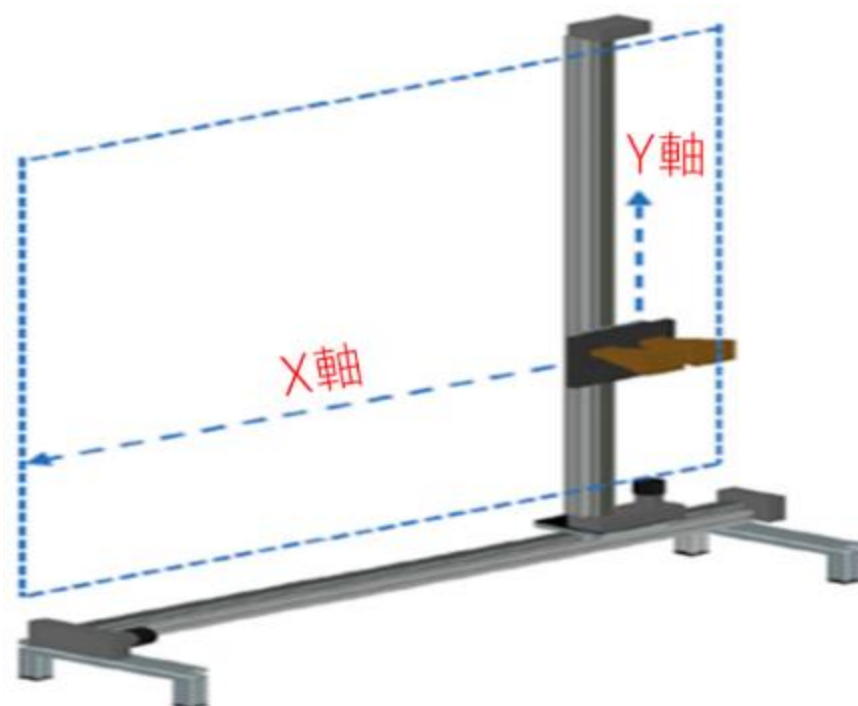


圖 1-2 具 X、Y 軸的滑軌系統

(七)天線線性定位系統將發射(接收)角錐天線，沿方位方向移動，使雷達擷取斜距(Range)剖面資訊。在斜距剖面的 SAR 相位資料獲取完成後；天線移動到下一個位置，並獲取另一個斜距剖面資訊。

(八)此過程沿著導軌以規則的間隔重複，直到天線到達導軌末端。每個方位方向位置上的斜距分佈圖，會產生一個二維數位矩陣。也就是在方位方向上，以等距方式進行均勻取樣。

本計畫所使用 GB-SAR 系統，其「無線電(雷達)射頻」和「軌道運動」雙大部分，除新進獲得 Rohde & Schwarz SMW200A 訊號產生器及 Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀(2023 年籌獲)。其餘器材均為舊設備的再次開發及運用(2013 年之前)。故相關的電子、機械及實驗器具，於實驗前之設備整備階段，均需執

行相關調整、校驗作業，盡力維持其標準效能。並依後續經費獲得情形，全盤檢討是否商請原廠(或技術單位)調校。

第二章 研究構想及方法

第一節 GB-SAR 使用限制

一、波長(穿透性)限制

GB-SAR 技術測地距離可達數公里範圍，且相對於 3D 光達 (LiDAR) 或全測站經緯儀 (Total Station) 等感測器，易受風、雨及水氣等氣象環境限制(影響)而言，GB-SAR 深具優勢。但目前商業模式發展下的 GB-SAR 系統，多數仍欠缺適用於植被區域的穿透能力；例如以 C 波段的運作 Lisa 系統^[14]，Ku 波段的 IBIS-L 系統^[15]和 X 波段的 Risk SAR 系統^[16]...。另依據農委會水土保持局的使用現況及經驗^[17~19]，發現 GB-SAR 波長及受植坡影響限制甚大。

(一)GB-SAR 使用波長影響位移精度，且穿透率受植生區域甚大。

使用波長影響位移精度，且穿透率受植生區域甚大。

(二)Ku band(波長 1.7cm)精度達 mm 等級，但在台灣山區植生廣泛限制其應用；如何克服植被影響？

(三)植生覆蓋對 GB-SAR 量測結果干擾極大，如何調整訊號處理、去除或改善干擾？

(四)若有植被覆蓋將使得雷達波散射，導致回強度不足。

(五)GB-SAR 監測地表，受限於目前 Ku 波段無法穿透密林區，是否有可改變使用波段，為 C 波段或 L 段？是否有波長較長，不受植被限制的 GB-SAR？

另根據電磁波傳播原理，低頻波段的雷達系統波長較長，通常比高頻波段具較佳的穿透效能^[20~22]。為了進行形變測量，實現對植被區域的滑坡預警，需要具植被穿透能力的 GB-SAR。因此

該系統應在低頻段工作。但頻率較低，天線尺寸較大；實務上仍須考量天線尺寸限制因素，致無法選(使)用過低頻率。

二、電力(使用時間)限制

國內常用的 GB-SAR，電池容量 273Ah，可持續工作 3 小時。故長時間持續監測時，需架設於可提供穩定電源之場所(或載具)。

第二節 以 VNA 基礎的 GB-SAR 系統構想規劃

針對林木茂密的台灣地區邊坡觀測需求，需要一種具有植被穿透能力的新型 GB-SAR。利用此系統雷達在軌道上移動，以獲得合成孔徑影像，達到高穿透力的干涉影像。

依此提出了以不同波段的 GB-SAR 射頻，嘗試新的穿透效能的應用構想。研究利用國立中央大學現有及新購的高價儀器及設備（向量分析儀、訊號產生器...及移動成像軌道），組成新形式的 GB-SAR 系統(詳如附圖 2-1)，取代目前商業模式下廠家所產製定頻 GB-SAR；並輔以微波暗房的測試檢驗，期透過實驗驗證此新型 GB-SAR 系統的成像及植被穿透效能。



圖 2-1 國立中央大學現有 GB-SAR 相關設備

向量網路分析儀(Vector Network Analyzer, VNA)是無線電頻率領域的重要測試儀器，更被廣泛地用在高頻波段的應用上的；在 GB-SAR 的開發過程中，VNA 可以快速準確地驗證這些射頻組件和裝置的實際效能^[23~25]。

一、VNA硬體構成

以 VNA 發射與接收 SAR 訊號，做為邊坡形變監測的干涉雷達波源。依據研究計畫需求，使用網路分析儀(美商安捷倫 Agilent N5245A PNA-X) 搭配脈波發射模組 (Pulsed RF measurements，如圖 2-2)，除提供模擬訊號外，並與訊號產生器 (Agilent E8257 PSG 或 Rohde & Schwarz SMW200A，如圖 2-3)以及頻譜分析儀(Agilent N9020 MXA 或 Rohde & Schwarz FSV3000，如圖 2-4)整合成發射機功率與掃頻測試平台，及接收機校驗測試平台，以進行全方位的系統測試。GB-SAR 測試平台規格需求，如表 2-1 所示。

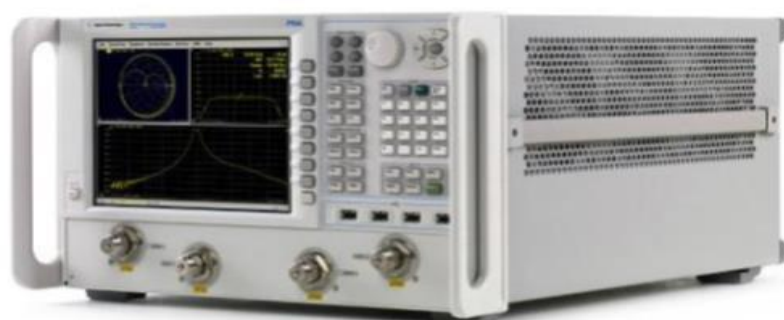


圖 2- 2 網路分析儀(Agilent N5245A PNA-X)



圖 2- 3 訊號產生器



圖 2-4 頻譜分析儀

表 2-1 測試平台規格需求

項目	規格
發射頻率	10MHz 到 50GHz
發射功率	>23dBm(max)
訊號模式	脈衝掃頻、調幅、調相
動態接收訊號範圍	132 dB
雜訊基底值 Noise floor	-166dBm(max, 在 1Hz 的 IF 頻寬下)

利用向量網路分析儀(VNA)測量參數的埠(端子)與測試波段的天線相連，並置於滑軌上合成方位方向的天線輻射場型，組成基於實驗室現有通用設備的地基型合成孔徑雷達(GB-SAR)系統，並測試其發射、接收及二維成像功能。

期待使用該系統對目標干涉成像，然後得出雙幅影像的相位差，結合相位與形變量之間的幾何模型，達成對目標的形變監測。

二、GB-SAR滑軌

此研究利用現有的 XY 軸向掃描儀、天線連接基座及運動控制器。以 XY 軸向掃描儀可控制雷達(天線)位置與隨時間的變化量，在位置精度上可準確到 0.01mm 準確度。

三、GB-SAR軟體

GB-SAR 成像系統的概念驗證，將使用向量網路分析儀(VNA)和滑軌上的天線線性定位系統的有效結合來達成。影像重建預計透過 MATLAB® 中實現距離遷移演算法 (RMA) 來完成的。GB-SAR 成像軟體系統包括 VNA、天線、電機控制和資料蒐集程式等，後續計畫透過 LabVIEW 實現操作自動化；配合實驗進度將陸續開發格式轉換模組、檔案存取模組、SAR(InSAR)處理模組、Doppler 參數估算模組、軌道預處理模組、影像後處理模組及視覺化操作介面。

四、微波暗房測試及校驗

為執行本案研究的 GB-SAR 系統的系統參數評估與儀器校驗測試評估，將利用現有的電波無反射室 (anechoic chamber，或稱微波暗房)。應場址內考量操作頻率的正向入射衰減量，全面鋪設適當類型之吸收體，並具備隔離門、配電與接線面板、空調出入口等設施，並有防火安全認證，可作為各項校驗量測及掃描成像模擬平台使用。其室內(含內牆微波吸收體)幾何大小為 5.0 m(長) × 3.0 m (寬) × 3.0 m(高)，內部空間與鋪設吸收體如圖 2-5 所示。

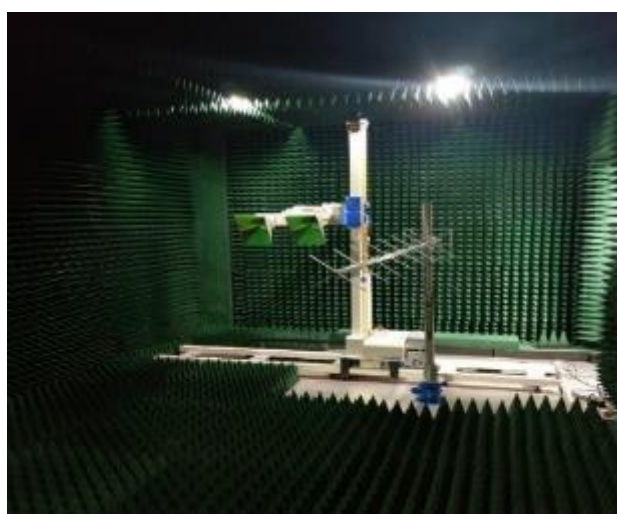


圖 2-5 電波無反射室測試實景

第三章 GB-SAR 系統重建與改置

第一節 掃描成像平台重建規劃

本研究案規劃以不同波段的 GB-SAR 射頻，嘗試新的穿透效能。利用國立中央大學現有的高價儀器（向量分析儀、訊號產生器...及移動成像軌道），組成新形式的 GB-SAR 系統；以取代商業模式所產製的 GB-SAR 產品。

相較於市面現售產品，將以更長的雷達移動軌道，且二維（可水平及垂直）掃描成像平台，取代 GB-SAR 一維水平軌道平台。二微掃描成像平台元件包含 XY 軸向掃描儀、天線連接基座及動作控制器，其配置的基礎構建如圖 3-1 所示。

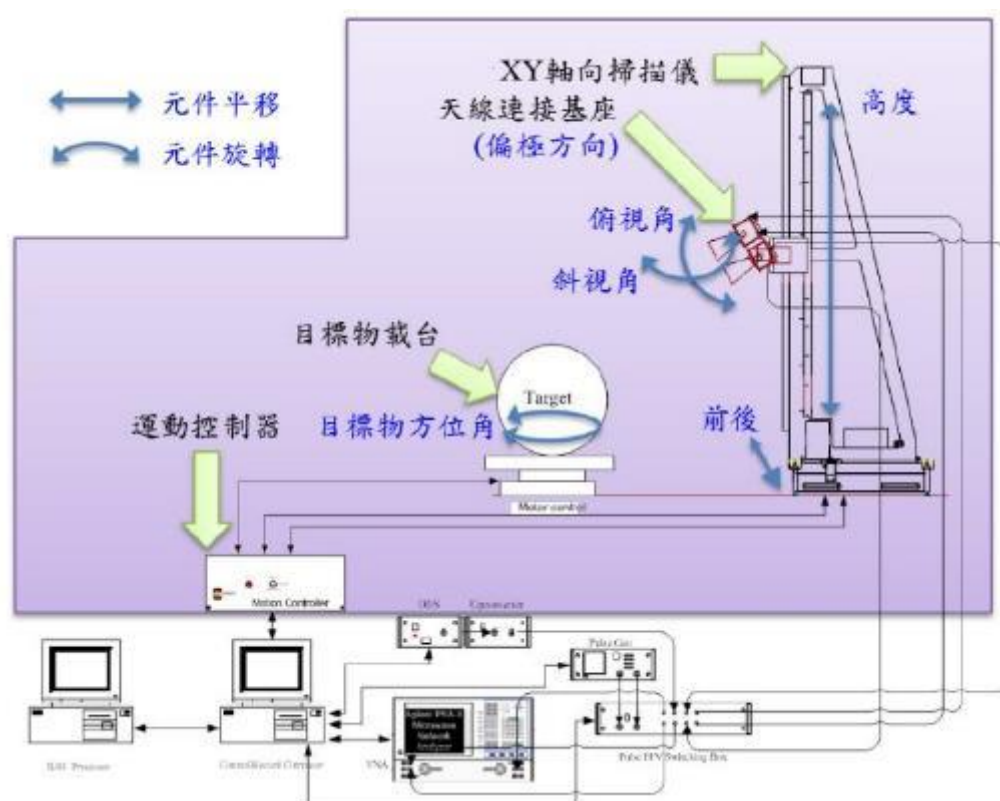


圖 3-1 二維掃描成像基礎構建配置圖

本校現有滑軌系統實際上具有三維(X、Y 及 Z 軸)運動及控制功能，但考量本計畫案研究旨在探討-利用 VNA 為基礎的 GB-SAR 系

統的重建與改置，經參酌相關論文顯示 3D 成像(即 Y 及 Z 軸軌道滑移)有若干限制，且偏離預期目標^[26~27]。故僅探討二維掃描成像平台，其中 X 軸可控制天線左右滑移，利於干涉成像；而 Y 軸僅使用於天線高度調整。

一、二維(XY)軸向掃描儀

二維(XY)軸向掃描儀可精確控制 SAR 天線之位置，及隨時間變化的位移量。在位置精度上，其軸向掃描精度達到公分級(含以下)規格¹。

本研究案所用的軸向掃描儀規格如表 3-1 所示，二維(XY)掃描成像儀及天線連接基座則如圖 3-2 所示。而且整套系統從微波暗房移至外面實驗室地板，未來從實驗室地板移至移動式雷達車車頂的可行性大大增加。

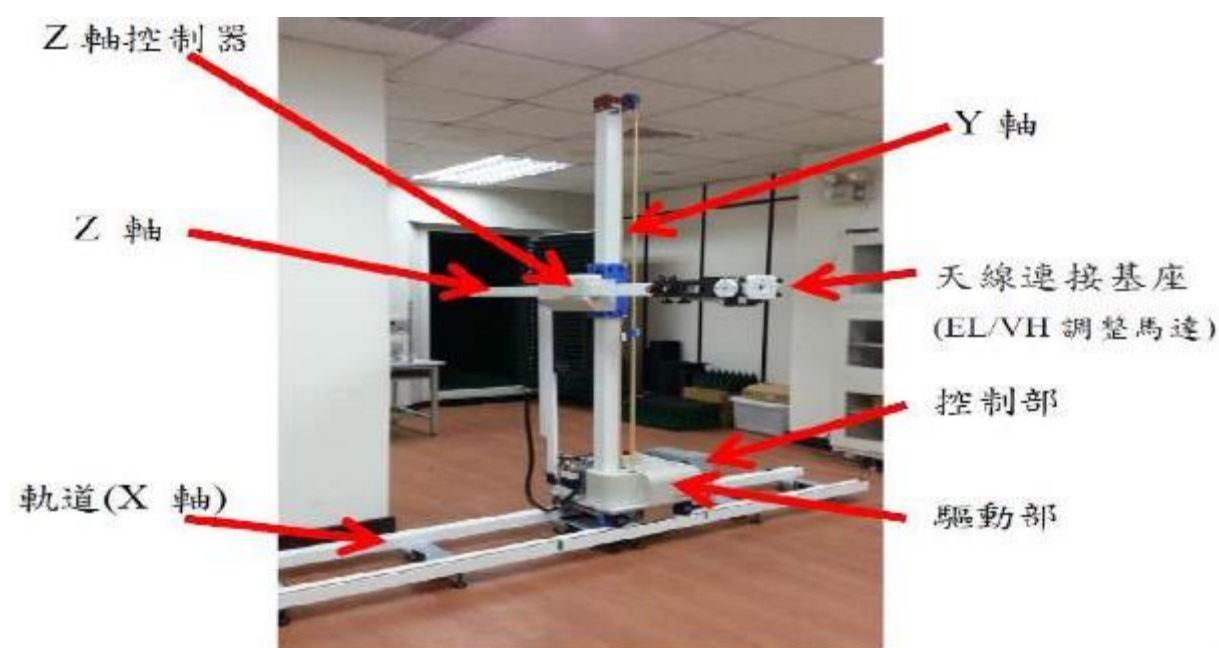


圖 3-2 二維(XY)掃描成像儀

¹ 此設備原用於 TaiSAR 機載合成孔徑雷達系統「掃描成像模擬平台」設備，因需考量到飛行器本身之位置變化量以及其 IMU(Inertial measurement unit 慣性測量單元)之位置誤差量，故其軸向掃描儀精度需達到公分級以下的規格。

表 3-1 二維(XY)軸向掃描儀規格參數

參數	規格
移動速度	3 ~ 150 mm/sec (10 ~ 100%)
解析度	1 mm
位置精度	0.05 mm + L × 0.0003 mm (L 表示移動長度)
重複位置精度	± 0.05 mm
反向位置精度	0.05 mm
最大可移動距離	2,500 mm (X 軸)
最大可移動高度	2,200 mm (Y 軸)
最大承載重量	90kg(基座最大可承載重量) 15kg (最大可承載天線和連接器重量)
驅動方式	Linear guide system
重量	70kg 到 145kg
使用電源	單向 AC 200V 20A (4KVA)
適用環境	溫度: 23 ± 5 , 濕度: 80 以下
保存環境	溫度: 0 ~ 40 °C , 濕度: 80 以下
尺寸	2,120 (寬) × 1,960 (高) × 700 (深) (mm)

二、天線連接基座(Antenna adapter)

天線連接基座可選擇連結基座之角度靈敏度，依據 SAR 取像特性或角錐天線(Horn antenna)偏極角度，調整(變換)俯視角度；並透過作動控制器進行調控，其規格參數如表 3-2 所示。

表 3-2 天線連接基座規格參數

規格 / 參數	偏極切換部分		仰角部分
旋轉速率	3~60 rpm		1~15°/sec
可旋轉範圍	0~ 359.9°(無限旋轉) ± 720°(有限旋轉)		± 90°
解析度	0.1°		
原點返回再現性	±0.1°		
位置精度	0.1°		
重複位置精度	±0.1°		
反向位置精度	0.1°		
承載重量	5kg	10kg	
最大承受力矩	14kg·cm	50kg·cm	
使用環境	室內/戶外		
重量	1.2kg 或更小	約 2.5kg	
使用電力	AC100V ± 10%, 50/60Hz 3A		

三、作動控制器(Motion controller)

作動控制器可精準控制二維(XY)軸向掃描儀的天線移動速度與位置達到 0.01 mm 精度的範圍，天線連接基座的俯仰角度也可達到 0.1°精度；其 I/O 介面為 GPIB 通用匯流排接口，並可程序(式)化控制，規格參數如表 3-3 所示。

表 3-3 作動控制器規格參數

項目	規格	
顯示規格	單位為 mm，解析度為 0.01mm	
IO 規格	GPIB 介面, LIMIT, TRIGGER	
使用電力	AC100V $\pm$ 10% (0.2A 或更小)	
尺寸	434 (寬) $\times$ 86 (高) $\times$ 307 (深) (mm)	
重量	Mounted within the 5-axis total 7kg	
標準配件	2m 電源線	
特性	●手動調整啟動，停止，方向 ●限制功能：硬體有限制、軟體可任意設定 ●首頁位置功能 ●速度控制 ●保護功能顯示 ●位置改變 ●操作錯誤檢測：控制電纜斷開、無法運作 ●反向啟動	
	X 軸：水平方向	X 軸：垂直方向

第二節 GB-SAR 測試作業

重建 GB-SAR 系統前，首要的工作就是確認其系統組件皆正常無誤。故先期恢復初步籌建時的各項組件、工作環境及狀態。將此測試實驗選擇於無回波室環境，使用合適波段的角錐天線，結合網路分析儀、軌道、控制儀器與電腦建立系統做實際的測量，以確認 GB-SAR 系統重建作業之完整性。

一、發射機構測試

實驗中使用到「網路向量分析儀」及「頻譜分析儀」搭配「向量訊號產生器」，作為 GB-SAR 的雷達發射源²。其中網路分析儀為 Agilent 公司所生產的 N5245A PNA-X，經測試檢測其工作頻率範圍在 10MHz 到 50GHz、系統動態範圍為 126dB(接收機動態範圍 129dB)、最大掃頻點數為 32,001 點、最高可輸出功率為 16dBm；圖 3-4 為 N5245A PNA-X VNA 儀器介面。另 2023 年新購入 Rohde & Schwarz SMW200A 訊號產生器及 Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀的儀器介面³，詳如圖 3-5、圖 3-6 所示。

² 「Agilent N5245A PAN-X 網路向量分析儀」可搭配「Analog E8257D PSG 模組化微波產生器」及「Agilent N9020 MXA 頻譜分析儀」

³ 「Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀」可搭配「Rohde & Schwarz SMW200A 向量訊號產生器」

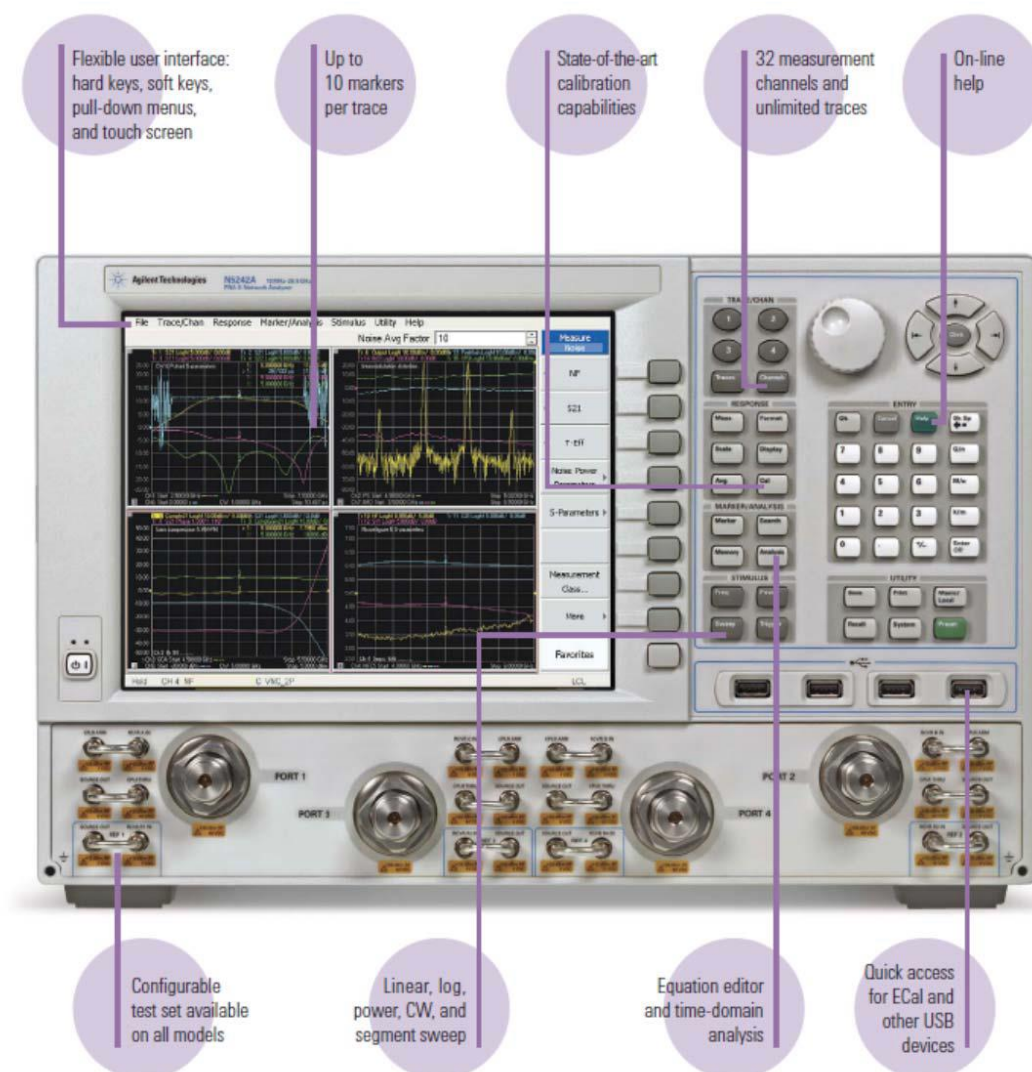


圖 3-3 Agilent N5245A PNA-X VNA 儀器介面



圖 3-4 Rohde & Schwarz SMW200A 儀器介面



圖 3-5 Rohde & Schwarz FSV3000 儀器介面

二、天線測試

測試實驗中所使用的天線為標準增益的角錐天線，其主要規格如表 3-4、3-5 所示，尺寸對照如圖 3-6 所示。

表 3-4 測試天線主要規格表(1)

Antenna	C Band			K Band		
Waveguide	SGH187			WR42		
Frequency	3.95GHz~5.85GHz			18GHz~26.5GHz		
Gain	17dBi~19.4dBi			15dBi~18dBi		
Gain at Experiment Frequency	5GHz			23.125GHz		
	18.55dBi			16.7dBi		
Dimensions	H	W	L	H	W	L
	16cm	21.6cm	33.3cm	7.5cm	9.8cm	16.6cm

表 3-5 測試天線主要規格表(2)

Antenna	Full Band			L Band		
Waveguide	DRH-118			DRH-118-C900		
Frequency	1GHz~18GHz			0.75GHz~1.7GHz		
VSWR ⁴	< 1.5:1 average					
Dimensions	H	W	L	H	W	L
	23cm	24cm	15cm	23cm	24cm	15cm

⁴ VSWR 電壓駐波比 (Voltage Standing Wave Ratio)

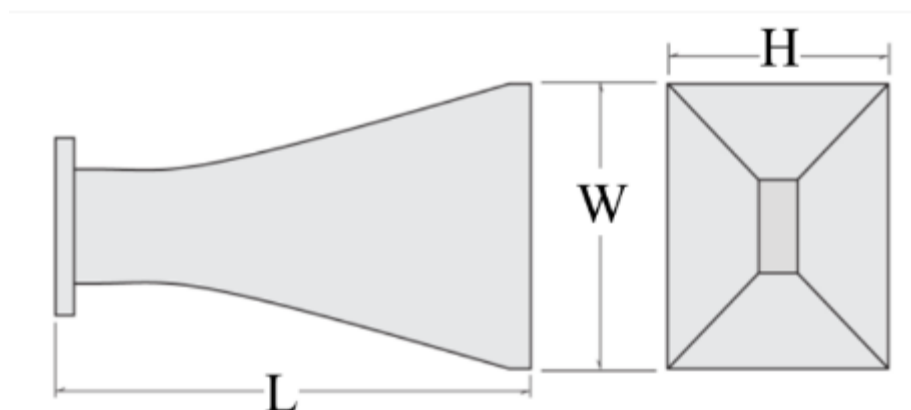


圖 3-6 測試天線尺寸對照表

三、軌道儀表操控開發

基於 GB-SAR 量測時，軌道平滑運作及精確位置確認的極致需求，於 GB-SAR 重建作業前，委請協力廠家重新檢整滑軌系統現況，並重新測試(開發)控制統，其系統架構如圖 3-7 所示；硬體控制的實際操作功能如圖 3-8 所示。

- 1.Devide 軌道平台控制器軟體開發。
- 2.X、Y、Z 軸的控制器軟體開發，係透過 IEEE 488.2 Command 運作；如圖 3-9 所示。
- 3.Polariztion、Elevation 控制器軟體開發，如圖 3-10 所示。
- 4.Azimuth table、Circular 控制器軟體開發，如圖 3-11 所示。
- 5.以 LabVIEW 實現自動化作業，包含客製化人機介面，以控制軌道運動系統。

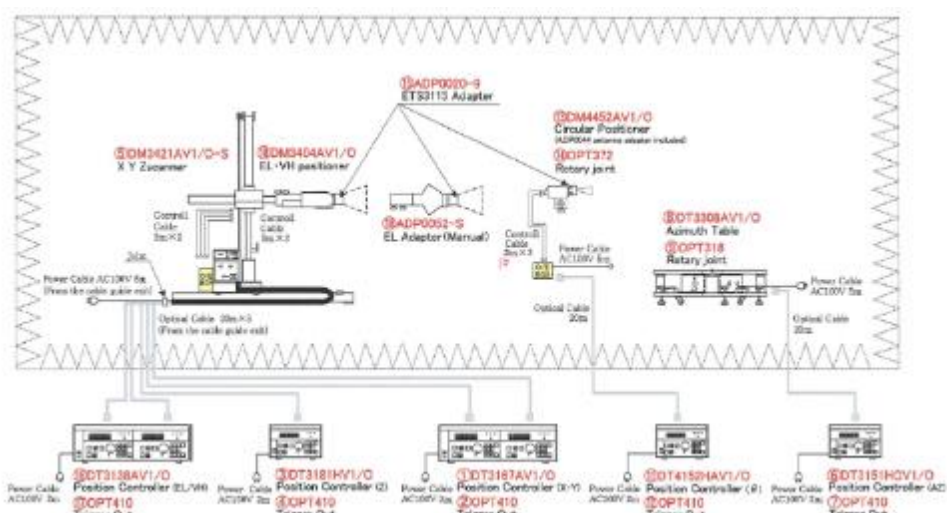


圖 3-7 GB-SAR 滑軌系統架構組織



圖 3-8 GB-SAR 滑軌系統硬體控制功能

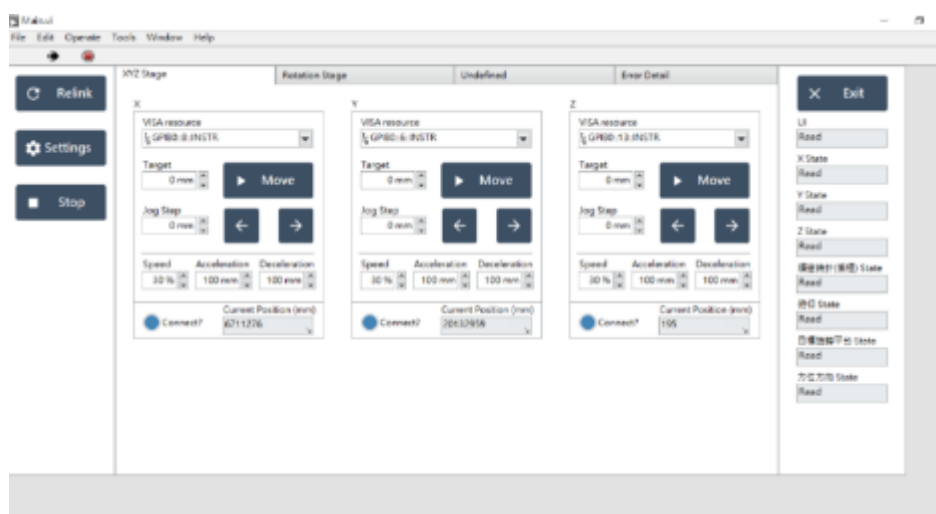


圖 3-9 GB-SAR 滑軌系統 X、Y、Z 軸軟體控制

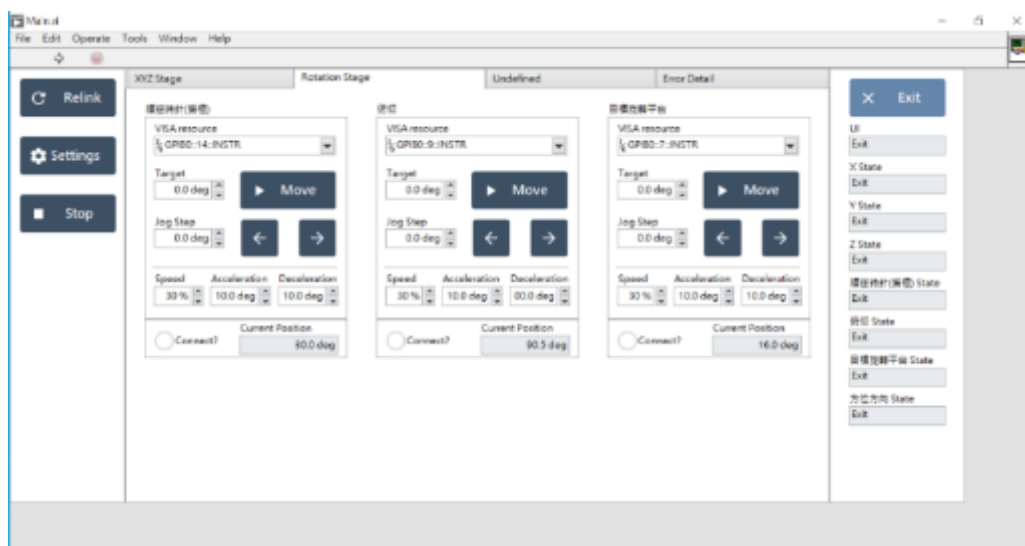


圖 3- 10 GB-SAR 滑軌系統 Polarization、Elevation 及 Azimuth table 軟體控制

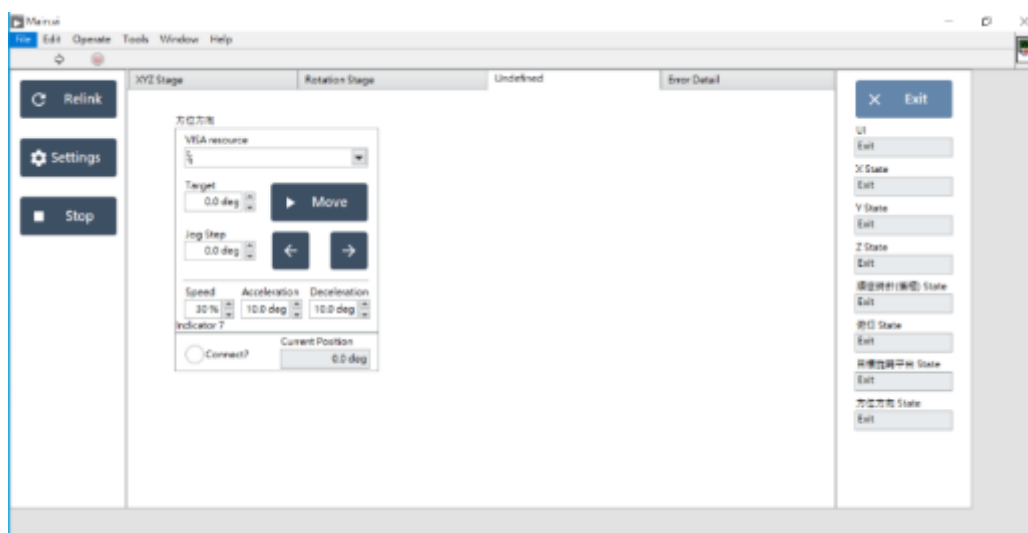


圖 3- 11 GB-SAR 滑軌系統 Circular 控制器軟體

第三節 微波暗房角反射器選定

一、角反射器

(一)反射器的原理

角反射器是利用偶鏡及鏡像原理(reflection principle)，將三個互相垂直鏡面裝在一起，其裝置類似箱子(立方體)的某個角落一般。三面鏡子組成的角反射器共有三條共用的稜邊，相當於三個偶鏡(就是雙面相鄰的鏡子)，因此光線無論從什麼角度照射到它上面，都會沿著原來的方向反射回去(如圖 3-12 所示)。

由於角反射器具有空間定向反射特性，以任意方向入射的空間光線，經過理想角反射器的三個反射面相繼反射後，仍以入射光線嚴格平行的方向返回；所以角反射器廣泛應用於科研、軍事、測量及工程等各類型的微波測試領域應用。

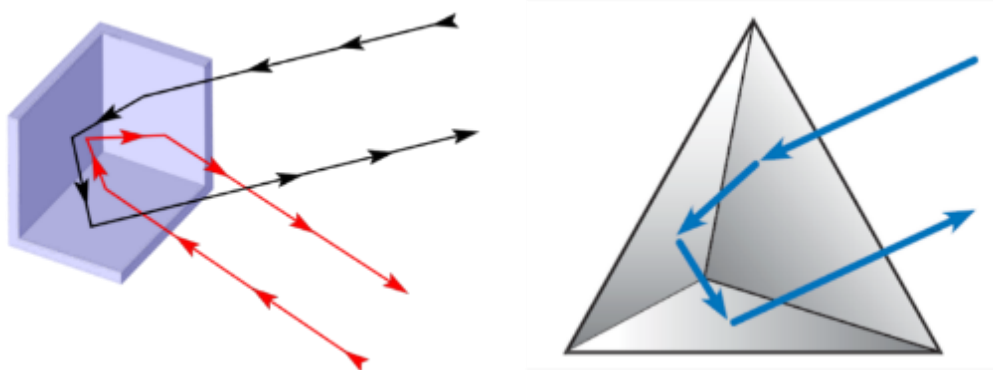


圖 3-12 角反射器的反射原理示意

(二)角反射器的技術要求

角反射器的設計製作有嚴格的技術要求，且由於 SAR 系統所發射電磁波數屬於微波波段，所以實際使用的角反射器是採用平整的金屬板材製成的。

角反射器的尺寸設計與雷達波的入射波長(頻率)有關，波長越長其棱(邊)長需求越大。角反射器的製作材料要求有表面無應力、平整度好、反射性強等特點。角反射器機械加工時工藝要求銑工、車工、裝配等不產生應力影響，製作時應考慮運輸、安裝、防風、防盜等因素影響，戶外應用時可加固硬質骨架。

目前雷達微波暗房測試所選用的人工角反射器(Corner Reflector)，主要利用其良好導電及導磁性能，將此電容率大的金屬材料做成幾何形狀規則，如雙面型、三面(角錐)型或正方形型(如圖 3-13 所示)，其表面可為實體或網格狀的人工角反射器目標。

此角反射器因為幾何形狀規則，利用角反射效應將發射到的雷達波束接收及幾次反射後，形成很強的回波(背向散射)訊號。可在處理過後的 SAR 影像中，形成很亮的星狀亮斑；可以在雷達影像上被準確地辨識出來。

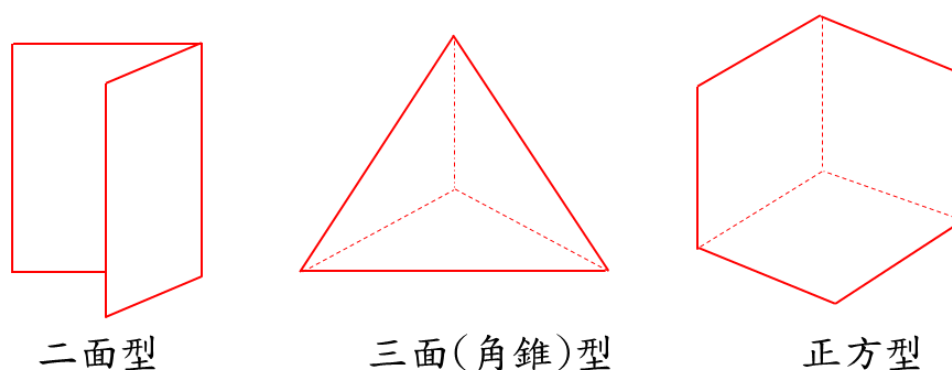


圖 3-13 三種人工角反射器的幾何形狀

雷達遙感中所用到的角反射器是指那些能夠對雷達波束產生強烈反射，並且使雷達波束能夠逆著入射方向反射回去的地物，包括自然地物和人工地物。而即狹義概念上的「人

為角反射器」因其幾何形狀規則，可以準確計算出雷達散射截面(RCS)，所以通常被用於表達強而有效的雷達回波訊號。此類反射物在 SAR 影像中往往形成很亮星狀亮斑，在雷達影像上可輕易確認出此目標。

可根據雷達最大散射截面計算公式，可推估得到雙面型、三面(角錐)型和正方體角反射器的 RCS 值^[28]。

$$\delta_{\max} \text{ 雙面型角反射器} = 8\pi\omega^2 \frac{L^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$\delta_{\max} \text{ 三角(錐)型角反射器} = 4\pi \frac{L^4}{3\lambda^2} \quad (3)$$

$$\delta_{\max} \text{ 正方體角反射器} = 12\pi \frac{L^4}{\lambda^2} \quad (4)$$

式中 λ 為波長；

L 為角反射器的邊長，單位是公分(cm)；

ω 為載波頻率，單位為 GHz；

$\delta_{\max}$ 為雷達散射截面 (RCS) 的最大值，其單位可以用 square meter (m^2) 表示，為了相互比較也常用 decibels relative to a square meter (dBsm) 方式敘述；雙方的換算方式如下：

$$\delta_{(dBsm)} = 10 \log_{10}[\delta_{(m^2)}] \quad (5)$$

(三)角反射器的製作與安置

在微波暗房的測試環境中，通常選用鋁質金屬面板的角反射器，加上適合安裝及角度調整的底座；在製作與安置過程中應當考慮：

①金屬面板的平面度(粗糙度)。

- ②確保各邊一致的角度精準度。
- ③角反射器結構穩定性。
- ④減少角反射器邊緣不平整的影響。
- ⑤方位角和仰角方向具微調性能。
- ⑥需考慮角反射器銳角的安全性，必要時必須予以包裹物保護，避免人員受傷。
- ⑦角反射器底邊與 SAR 載具移動方向平行。

根據微波暗房現況所選定角反射器佈放位置，於可見視野範圍內調整角反射器朝向和底邊方位角，使角反射器底邊與二維(XY)軸向掃描儀-軌道天線的移動方向平行。

- ⑧SAR 雷達波入射方向與角反射器的法線方向平行

角反射器佈設時，須滿足雷達波入射方向與角反射器法線方向平行的基礎條件，以確認角反射器可產生最大 RCS 值。

二、雙面型角反射器

在眾多角反射器中，雙面型 (dihedral) 角反射器適合於校準的目標物，因為雙面角反射器有較高的雷達截面積，且可以藉由旋轉提供不同特定極化的反應^[29]；如圖 3-14 所示：

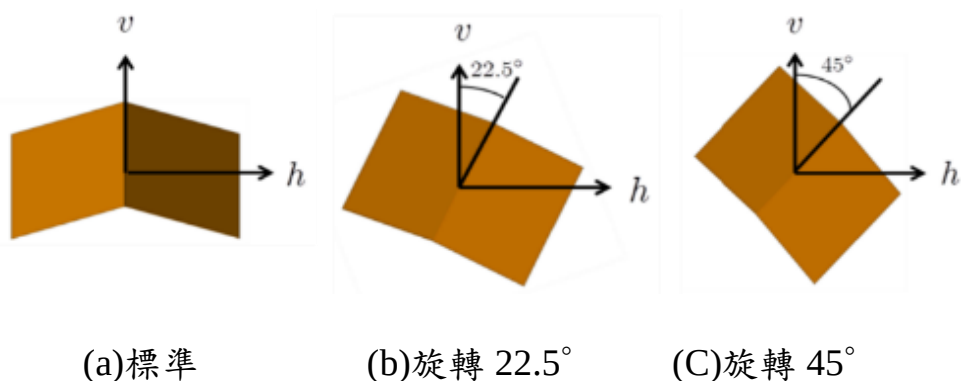


圖 3- 14 雙面型角反射器

雙面型角反射器在全偏極 SAR 影像上，比三面(角錐)型角反射器更具備優勢，因為雙面型角反射器在極化平面上旋轉可以改變其極化特性，使其用途更多元化；其旋轉後散射矩陣遵循下式：

$$S_d^\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

(一)雙面型角反射器（標準）

在圖 3-14 中(a)標準雙面角反射器可以提供僅在同偏極化的反射訊號，且在同偏極化上的 HH 和 VV 振幅相同，但相位卻差了 180° ，且雙面角反射器交互偏極化上皆為零；其散射矩陣為

$$S_d = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

常用來當作測試參考目標的角反射器，有旋轉 22.5° 和 45° 兩種；如圖 3-14(b)、(c)所示。

(二)雙面型角反射器（旋轉 22.5° ）

旋轉 22.5° 的雙面型角反射器，有別於其他參考目標，只能提供同偏極化或交互偏極化的資訊，其最大優勢可以同時提供在 HH、VV、HV 和 VH 偏極資訊，且四個極化上振幅相同；其散射矩陣如下：

$$S_d^{22.5^\circ} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(三)雙面型角反射器（旋轉 45° ）

旋轉 45° 的雙面型角反射器，其優勢就是能提供在相互偏極化上較強雷達截面積，且在相互偏極化上 HV 和 VH 的振幅和相位皆相同，在同偏極化上皆為零；其散射矩陣如下：

$$S_d^{45^\circ} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

雙面型角反射器的 RCS 隨入射角變化很快，只在很小的入射角範圍內才能保證取得較大 RCS 值。而在微波暗房的實際安裝過程中，很難將角反射器的朝向調到精確位置，使得實際 RCS 波動範圍較大；所以實務中雙面型角反射器使用得較少，而三面(角錐)型反射器在定標(校正)需求時用得最多。

三、三面(角錐)型角反射器

三面(角錐)型(Trihedral)反射器和實驗室校正用的「校正球」相同，僅產生同偏極化的反射信號。

且同偏極化上 HH 和 VV 極化振幅和相位相同，且在交互偏極化上值皆為零，但三面角反射器相較於球，有較大的雷達截面積，且相較於其他反射器，也有較大的 3dB 波束寬，所以較常用於空/衛載的定標校正上；故三面(角錐)型角反射器其散射矩陣如下：

$$S_{tri} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

四、角反射器 RCS 值計算分析

衡量角反射器的雷達回波性能高低，通常以雷達散射截面 (Radar Cross Section, 簡稱 RCS) 來評估，微波暗房測試常見的雙面角反射器 (Dihedral CR) 及三面(角錐)型角反射器 (Triangular Trihedral CR) 之 RCS 值，可透過前述列公式(2)、(3)計算得知：

$$\delta_{\max} \text{ 雙面型角反射器} = 8\pi\omega^2 \frac{L^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$\delta_{\max} \text{ 三角(錐)型角反射器} = 4\pi \frac{L^4}{3\lambda^2} \quad (3)$$

考量本案「GB-SAR 系統的重建與改置」所嘗試重建 Ku、C、S 或 L 波段的 GB-InSAR 硬軟體，配合國立中央大學「太空科學與科技研究中心 (NCU Center for Astronautical Physics and Engineering, CAPE)」現有的角反射器；我們嘗試計算不同波段 SAR 微波對不同尺寸角反射器的 RCS 值，並分析如下：

(一)三面(角錐)型角反射器

- ①邊長 30 cm 三面(角錐)型角反射器，詳如圖 3-15 所示。
- ②邊長 80 cm 三面(角錐)型角反射器，詳如圖 3-16~圖 3-18 所示。
- ③邊長 170 cm 三面(角錐)型角反射器，詳如圖 3-19~圖 3-20 所示。

(二)雙面型角反射器

邊長 20 cm 標準雙面角反射器，詳如圖 3-21~圖 3-22 所示。

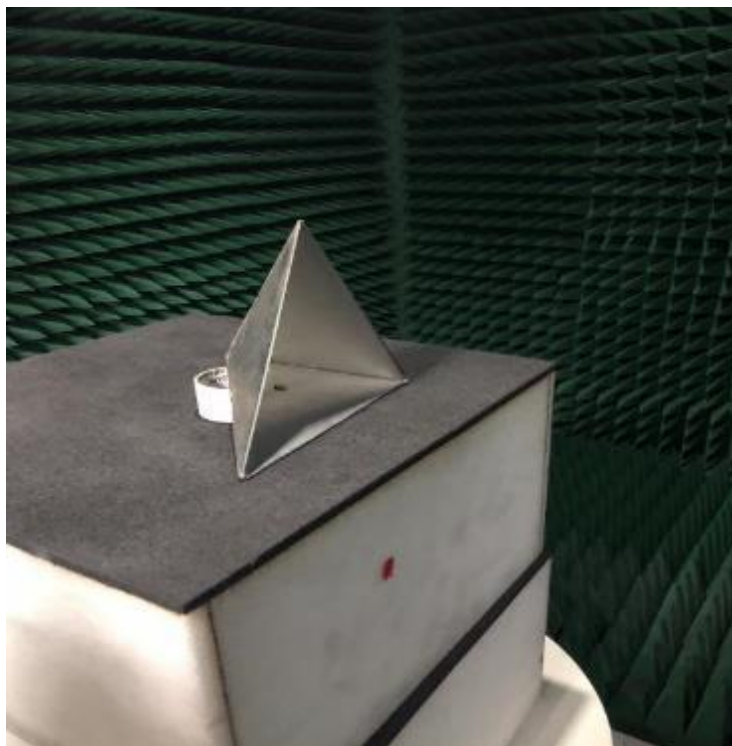


圖 3- 15 邊長 30 cm 三面(角錐)型角反射器

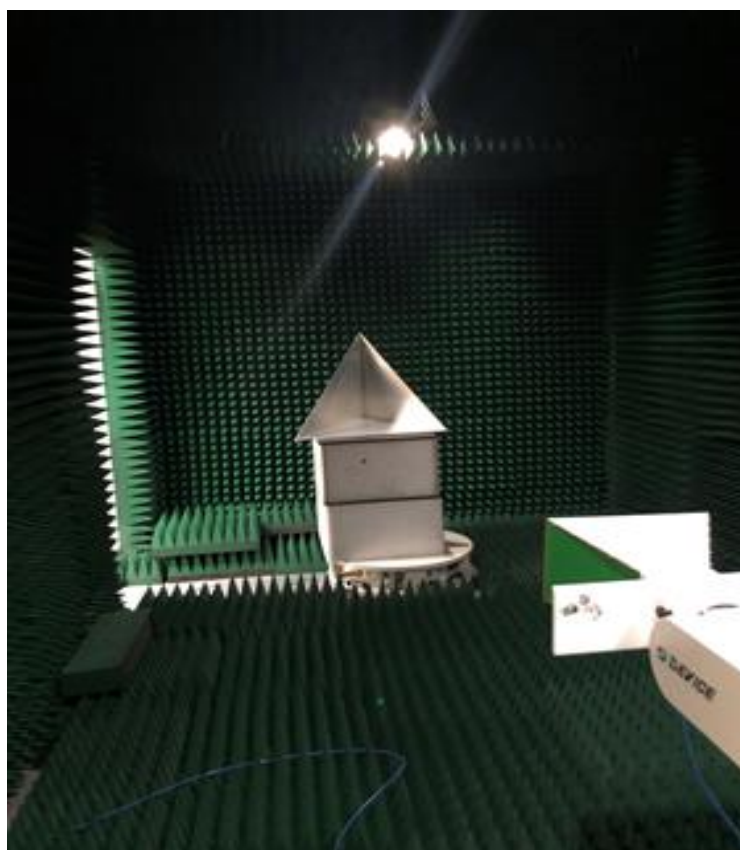


圖 3- 16 邊長 80 cm 三面(角錐)型角反射器



圖 3- 17 邊長 80 cm 三面(角錐)型角反射器戶外測試(1)



圖 3- 18 邊長 80 cm 三面(角錐)型角反射器戶外測試(2)



圖 3- 19 邊長 170 cm 三面(角錐)型角反射器

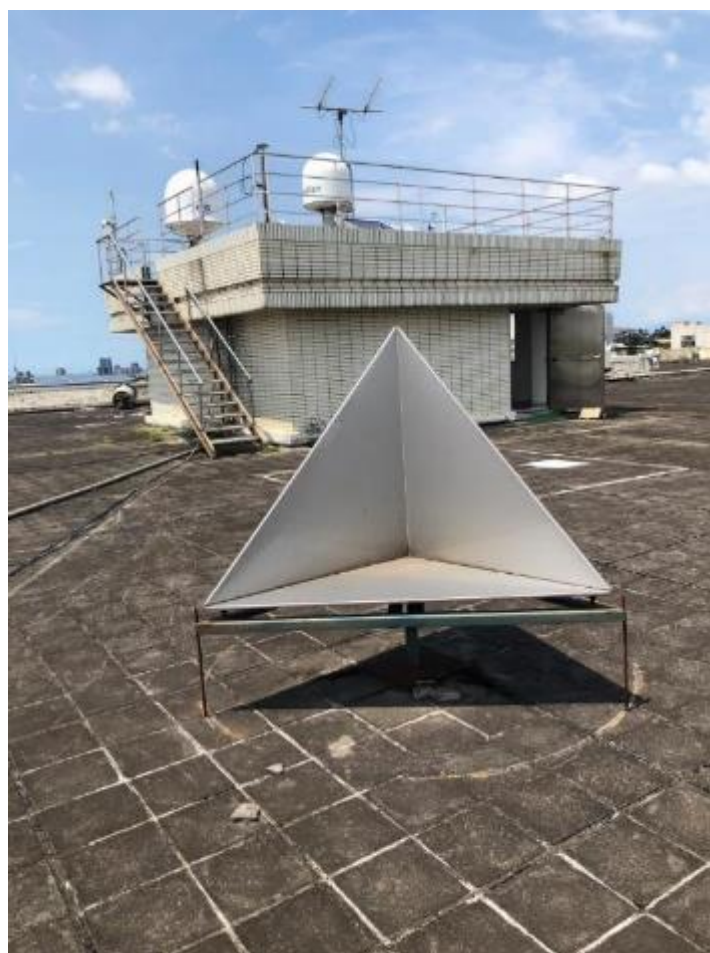


圖 3- 20 邊長 170 cm 三面(角錐)型角反射器戶外測試

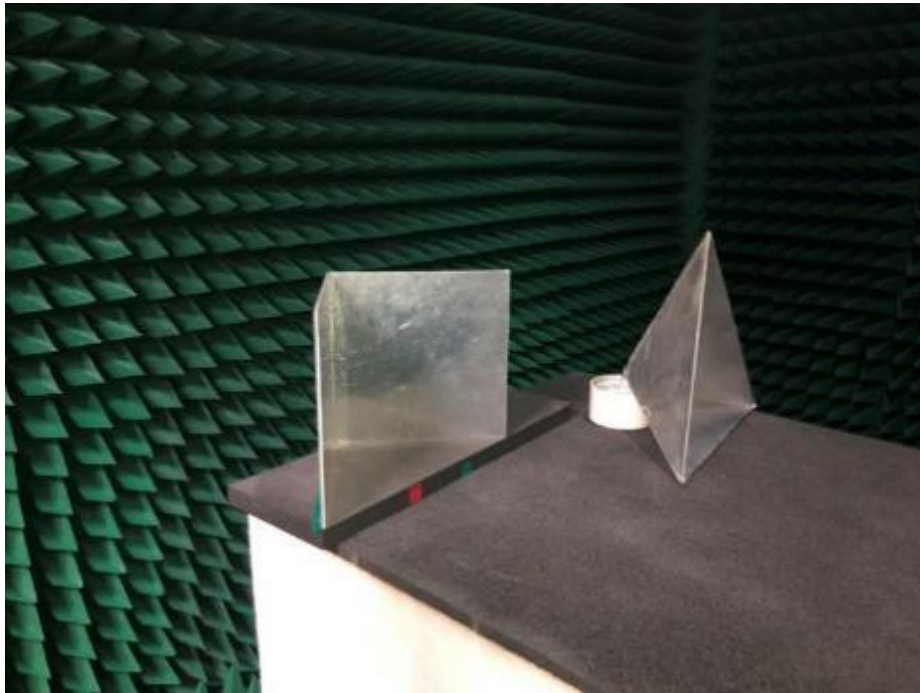


圖 3- 21 邊長 20 *cm* 標準雙面型角反射器(1)

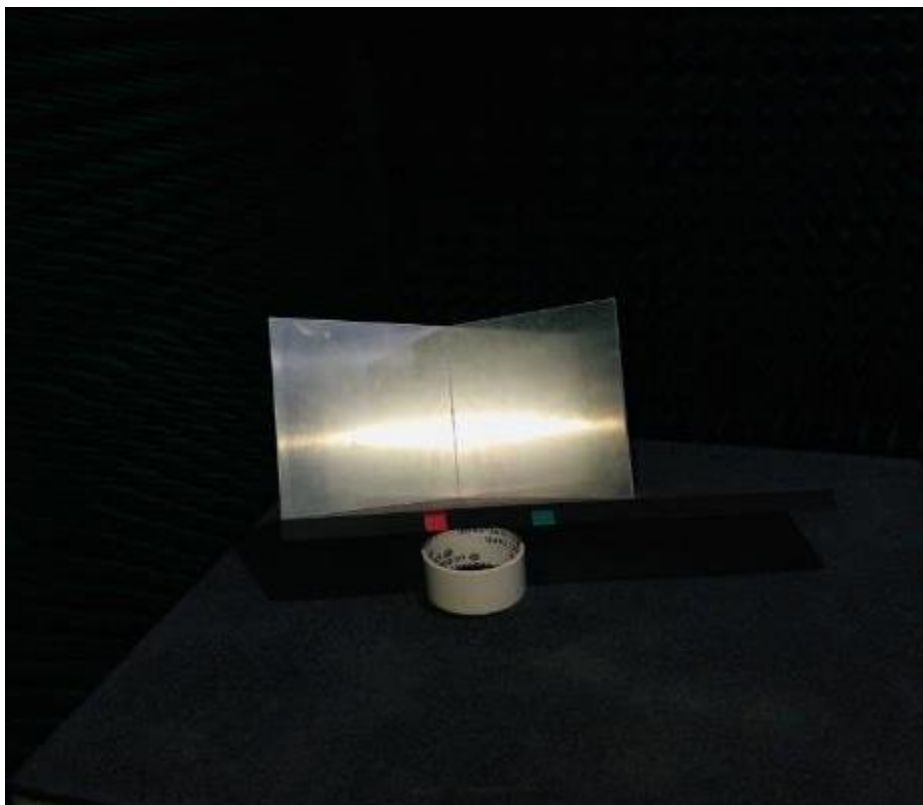


圖 3- 22 邊長 20 *cm* 標準雙面型角反射器(2)

(三) RCS 值計算分析

透過現有不同形態（標準雙面型、三面(角錐)型）、不同尺寸（20、30、80 及 170cm）的角反射器，以測試不同波段（Ku、C、S 或 L）微波暗房內的反射效果及成像效能，為驗證以 VNA 為基礎的 GB-SAR 系統參數設定，俾利後續植被穿透(增進坡地偵測的防災預警)效能測試。

各型測試角反射器 RCS 值，經理論公式計算如表 3-6 所示。波長愈短的雷達入射波，尺寸(邊長)愈大的角反射器其 RCS 值愈大。

再以 L 波段（頻率 1~2 GHz、即波長 30~15 cm）雷達波入射 30cm 三面(角錐)型的 RCS 值(0.38 m^2)為基準，相對 S（頻率 2~4 GHz、即波長 15~7.5 cm）、C（頻率 4~8 GHz、即波長 7.5~3.75 cm）及 Ku（頻率 12~18 GHz、即波長 2.5~1.67 cm）波段，可得到對比值（從 L 波段 30cm 三面(角錐)型角反射器）1 到（從 Ku 波段 170cm 三面(角錐)型角反射器）332,752 倍的 RCS 值；如表 3-7 所示。

為了分析便利，亦可將此 RCS 值數據由 $\delta_{(m^2)}$ 轉換成 $\delta_{(dBsm)}$ 格式；如表 3-8 所示。

表 3-6 各型測試角反射器 RCS 值(1)

波段		L	S	C	Ku
頻率/GHz		1	2	4	12
		2	4	8	18
波長/cm		30	15	7.5	2.5
		15	7.5	3.75	1.67
角反射器	邊長/cm	RCS m ²			
三面型 (角錐)	30	0.38	1.51	6.03	54.29
		1.51	6.03	24.13	121.66
	80	19.06	76.25	305.02	2,745.17
		76.25	305.02	1,220.07	6,151.99
	170	388.72	1,554.90	6,219.59	55,976.31
		1,554.90	6,219.59	24,878.36	125,444.42
雙面型	20	0.45	1.79	7.15	64.34
		1.79	7.15	28.60	144.19

表 3-7 各型測試角反射器 RCS 對比值

波段		L	S	C	Ku
頻率/GHz		1	2	4	12
		2	4	8	18
波長/cm		30	15	7.5	2.5
		15	7.5	3.75	1.67
角反射器	邊長/cm	RCS m ² 對比倍數			
三面型 (角錐)	30	①	4	16	144
		4	16	64	323
	80	51	202	809	7,282
		202	809	3,236	16,319
	170	1,031	4,124	16,498	148,482
		4,124	16,498	65,992	332,752
雙面型	20	1	5	19	171
		5	19	76	382

表 3- 8 各型測試角反射器 RCS 值(2)

波段		L	S	C	Ku
頻率/GHz		1	2	4	12
		2	4	8	18
波長/cm		30	15	7.5	2.5
		15	7.5	3.75	1.67
角反射器	邊長/cm	dBSm			
三面型 (角錐)	30	-4.24	1.78	7.80	17.35
		1.78	7.80	13.83	20.85
	80	12.80	18.82	24.84	34.39
		18.82	24.84	30.86	37.89
	170	25.90	31.92	37.94	47.48
		31.92	37.94	43.96	50.98
雙面型	20	-3.50	2.52	8.54	18.08
		2.52	8.54	14.56	21.59

第四節 微波暗房整體測試

GB-SAR 的整合測試平台，主要透過 VNA 作為發射與接收模擬訊號源的 SAR 訊號，以進行後期地表形變監測取像前的成像模擬，執行過程如圖 3-23、圖 3-24 所示。

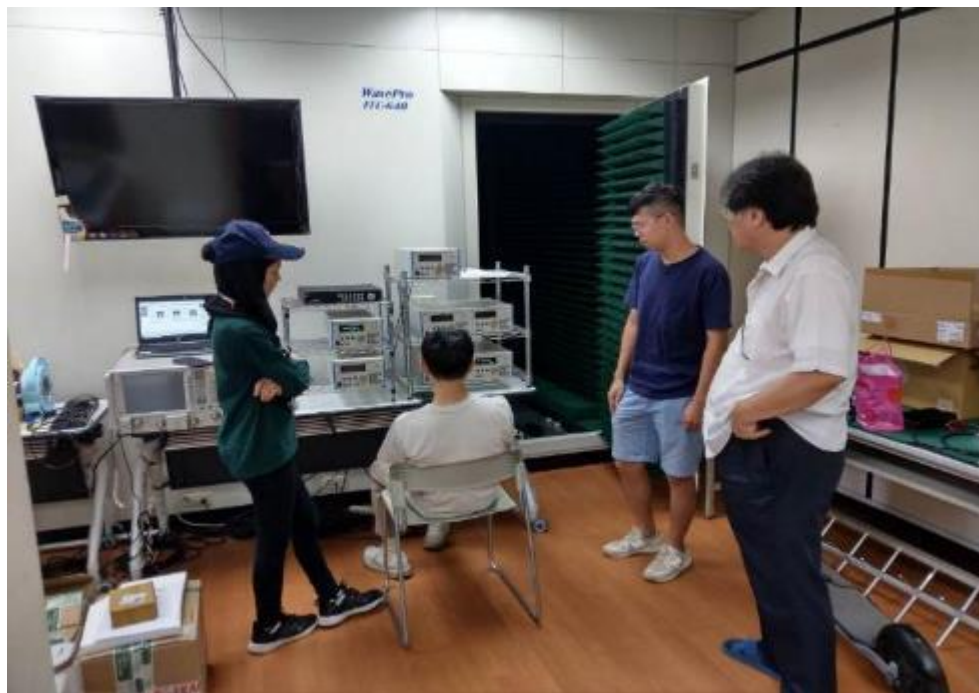


圖 3- 23 由 PC 端自動化(軟體)控制的 GB-SAR 滑軌系統

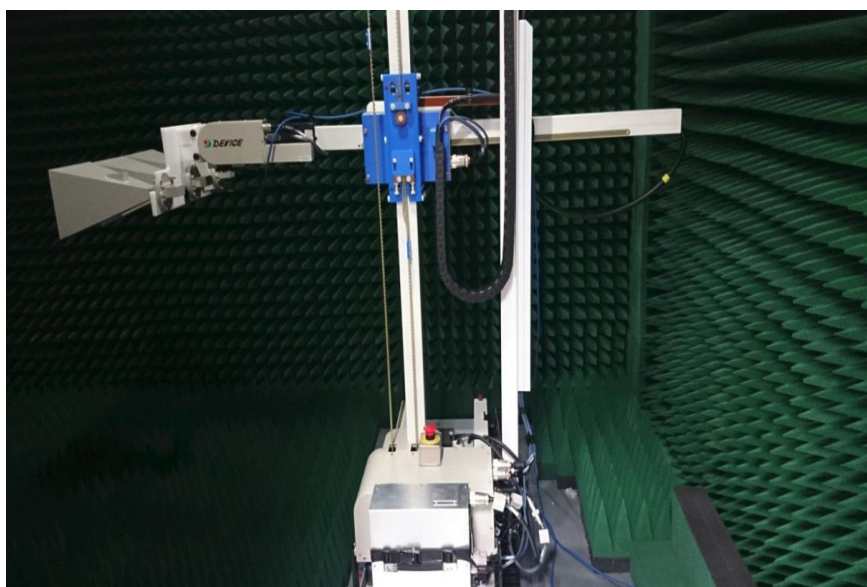


圖 3- 24 由軟體控制的 GB-SAR 滑軌系統運作



圖 3-25 GB-SAR 訊號發射測試實景

(一)先期測試

GB-SAR 的微波暗房整合測試平台，原構想利用「Agilent N5245A PAN-X 網路向量分析儀」作為 SAR 訊號射頻的發射及接收主要來源，因設備故障，短期內無法查修(排除)。故改以新購的「Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀」搭配「Rohde & Schwarz SMW200A 向量訊號產生器」完成訊號發射、接收測試，測試實景及儀器使用規劃如圖 3-25、圖 3-26 所示。

Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀的訊號產生設定情形如圖 3-27 所示(發射 C 波段頻率 5GHz、功率 20dBm Single Tone Signal)。以雷達截面積較高的二片(面)式角反射器作為反射目標⁵，利用角反射效應將接收雷達波束反射後，形成強回波信號。兩支角錐天線(Horn antenna)中心點相距 45.5 公分，天線與角反射器的距離為 318 公分，在成像後的 SAR

⁵ 二片(面)角反射器的 RCS 隨入射角變化很快，只在很小的入射角範圍內才能保證取得較大的 RCS 值^[28]；但可藉由旋轉角度的變化，提供不同極化反應。

影像中，出現明亮的星狀亮斑，在雷達影像上可準確地被識別出來。如圖 3-28、圖 3-29 相較，有角反射器顯示出較強的反射訊號。

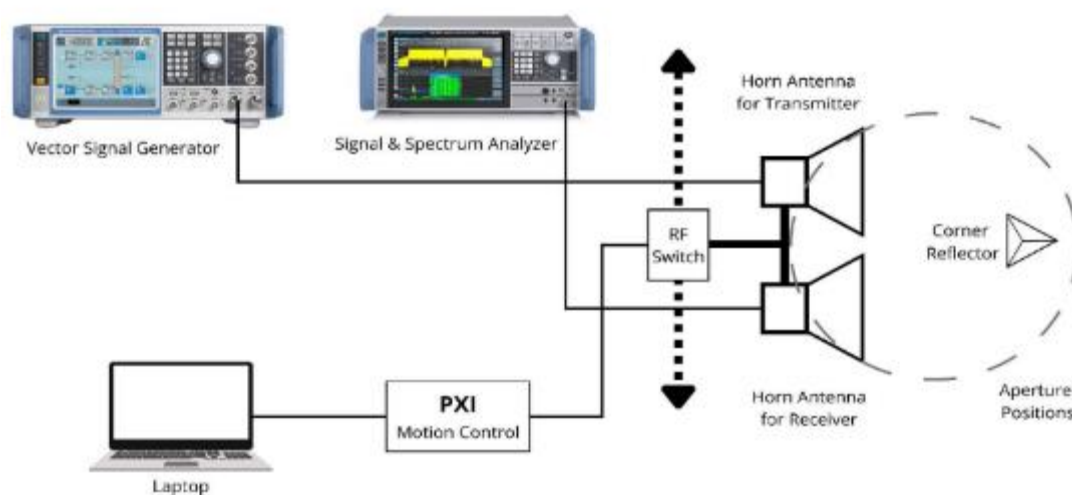


圖 3- 26 GB-SAR 訊號發射測試的儀器規劃

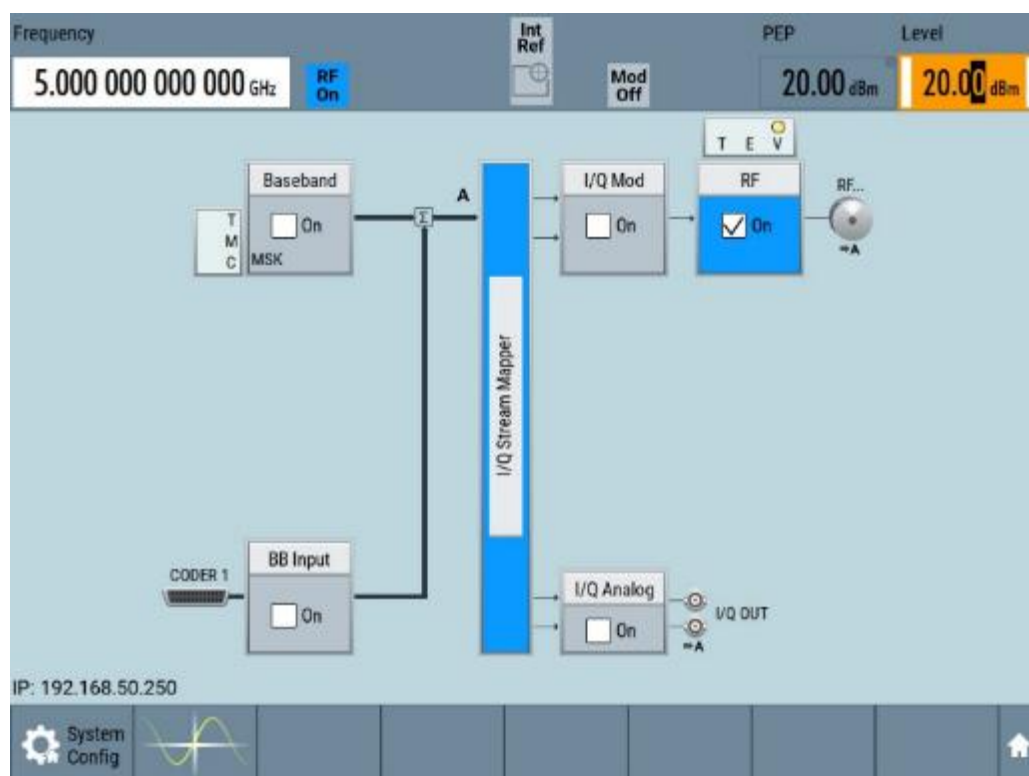


圖 3- 27 Rohde & Schwarz FSV3000 頻譜分析儀訊號產生設定

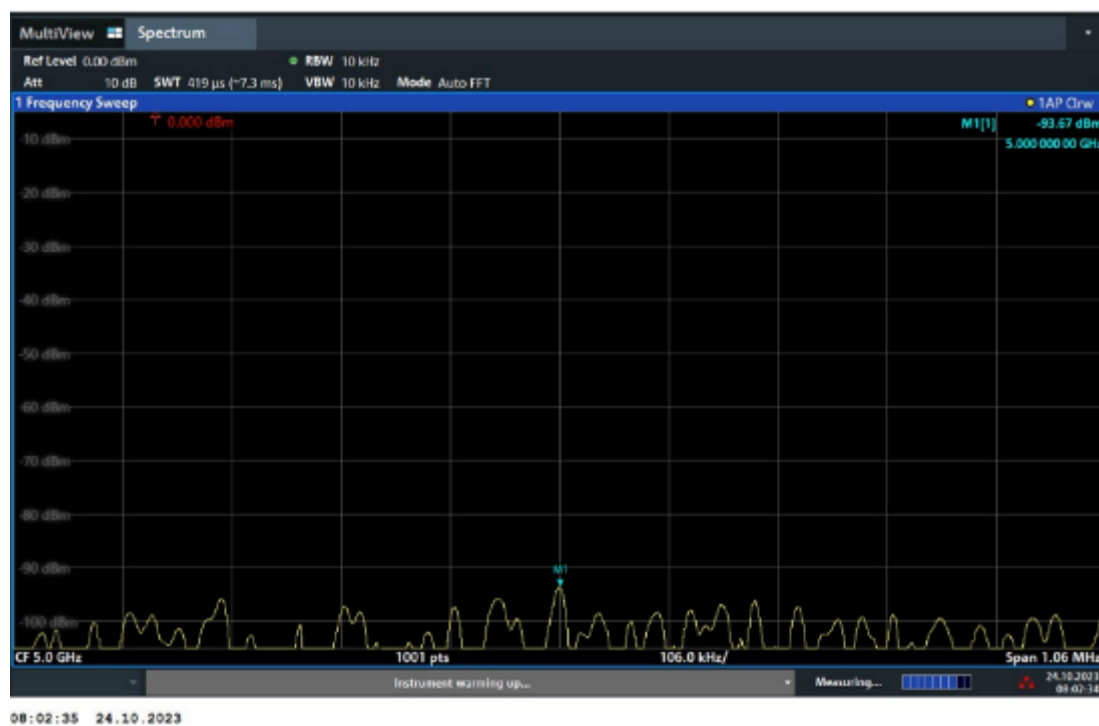


圖 3- 28 無角反射器的 C-band 反射(弱)訊號

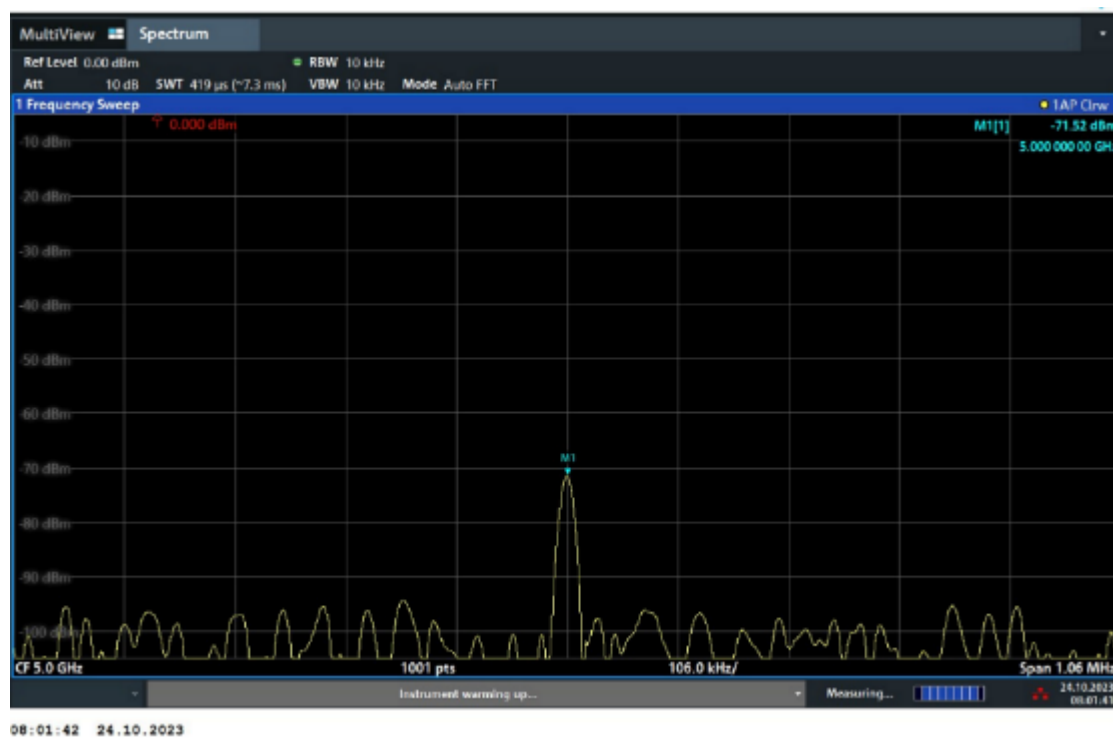


圖 3- 29 角反射器的 C-band 反射(強)訊號

經利用微波暗房內的天線執行 L 、C 及 Ku 波段天線執行測試，可得到類似成果。

GB-SAR 滑軌系統測試作業，目前已在微波暗房中完成測試，測試平台規格如表 3-9 所示。

表 3-9 GB-SAR 系統參數及預期效能

觀測頻率範圍	10M – 50 GHz Agilent N5245A PAN-X
	100K – 40 GHz Rohde & Schwarz SMW200A
GB-SAR 系統高度	0.5m - 2.2 m 可調整式
	移動式雷達車平台離地高度 2.9 m
戶外測距(觀測)範圍	待測
天線孔徑移動值 (間隔)	可調整式
	0.01 mm(最小值)
天線孔徑位置數	138,000(最大值)
合成孔徑長度 (軌道移動範圍)	2.5 m X 軸
	2.2 m Y 軸
合成角度	視搭配天線而定

(二)實驗系統組態

地面系統的工作頻率選在 1.5 ~2.5 GHz 之間。因此分頻寬為 0.5 且是 UWB⁶ 信號下限(即 0.25)的兩倍。在這一工作頻率範圍內，雙脊導波喇叭天線很容易滿足遠場(far field)條件。

⁶ Ultra-wideband(UWB) 超寬頻

天線調整為水平(HH)極化，於此種情況下，天線的 HPBW⁷ 為 48° ，天線相對於地面的高度為 1.25 m；表 3-10 概述 GB-SAR 系統的實驗參數。

表 3- 10 GB-SAR 系統實驗參數

參數	設置
頻率範圍 (波長)	1.5~2.5 GHz (λ 0.2 ~ 0.12m)
GB-SAR 系統高度	1.25 m
最小距離 Minimum range	2.86 m
孔徑步進 Aperture step	0.05 m
孔徑位置數 Number of aperture positions	51
合成孔徑長度 Synthetic aperture length	3.5 m
合成角度 (Integration angle)	72°

(三)測試場景

資料獲取的 GB-SAR 雷達場景選在微波實驗室的室內環境，其是內部佈滿電磁波吸收材料 (anechoic chamber absorber) 及滑軌系統等裝備的實驗室；不同尺寸的角反射器放在實驗室的天線座上。

雖然各型角反射器的尺寸對於所選頻率範圍來說並不是最佳的，但其反射效果仍然很明顯。據估計角反射器與天線之間的最小距離為 2.86 m，此距離符合遠場 (far field) 的要求。

⁷ Half Power Beam Width (HPBW) 主波束半功率波束寬度

(四)合成孔徑長度

孔徑步距 (Aperture step) 即兩個相鄰孔徑位置之間距離和孔徑長度(軌道長度)在很大程度上取決於系統參數,如工作頻率範圍、與天線波束寬度相關的積分角以滑軌平臺的速度。在這些特定情況下,合成孔徑雷達系統的脈衝重複頻率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 不能小於最大的都卜勒頻率的兩倍,以避免混疊(Aliasing)現象,其中最大的都卜勒頻率可通過公式估算^[30~31]。因此, PRF 的條件可寫成

$$PRF \geq \frac{4v_{pl}}{\lambda_{min}} \sin\left(\frac{\varphi_{max}}{2}\right) \quad (11)$$

其中 λ_{min} 是SAR系統最高頻率相對應的波長, φ_{max} 是最大積分角, v_{pl} 是雷達平臺的速度。如果用 v_{pl} 除以(11)式的兩邊,(11)式左邊的 PRF 與 v_{pl} 之比就是孔徑步距 ΔL 的倒數。因此,孔徑步長的條件為據的情況。

$$\Delta L \leq \frac{\lambda_{min}}{4} \left[\sin\left(\frac{\varphi_{max}}{2}\right) \right]^{-1} \quad (12)$$

在資料獲取中,最大積分角(the maximum integration angle)的選擇約為 $\varphi_{max} = 72^\circ$, 即比雙脊導波喇叭天線的 HPBW 大一倍半。根據系統的工作頻率和所選的最大積分角,孔徑步長按 $\Delta L = 0.05 \text{ m}$ 選定,計算過程如(13)式所示。

根據合成孔徑雷達場景的資訊(角反射器的位置),最大積分角對應的孔徑長度為 2.5m ;因此合成位置數為 51,其相關位置詳如圖3-30、圖3-31所示。

$$\Delta L \leq \frac{0.12}{4} \left[\sin \left(\frac{72^\circ}{2} \right) \right]^{-1} = \frac{0.12}{4} / \sin 36^\circ = 0.05 \text{ m} \quad (13)$$

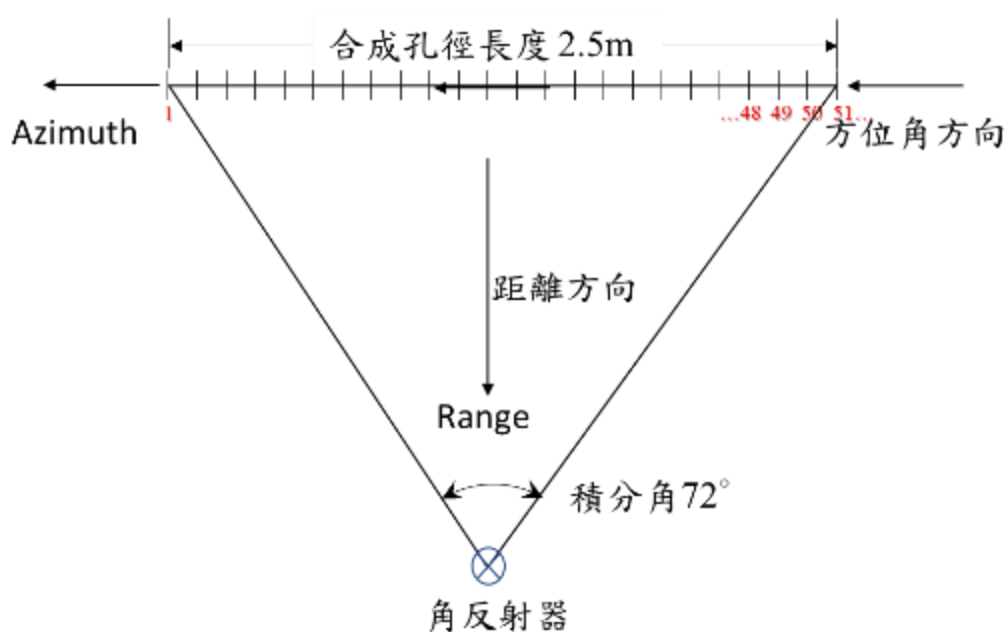


圖 3- 30 微波暗房 GB-SAR 測試場景及位置(1)

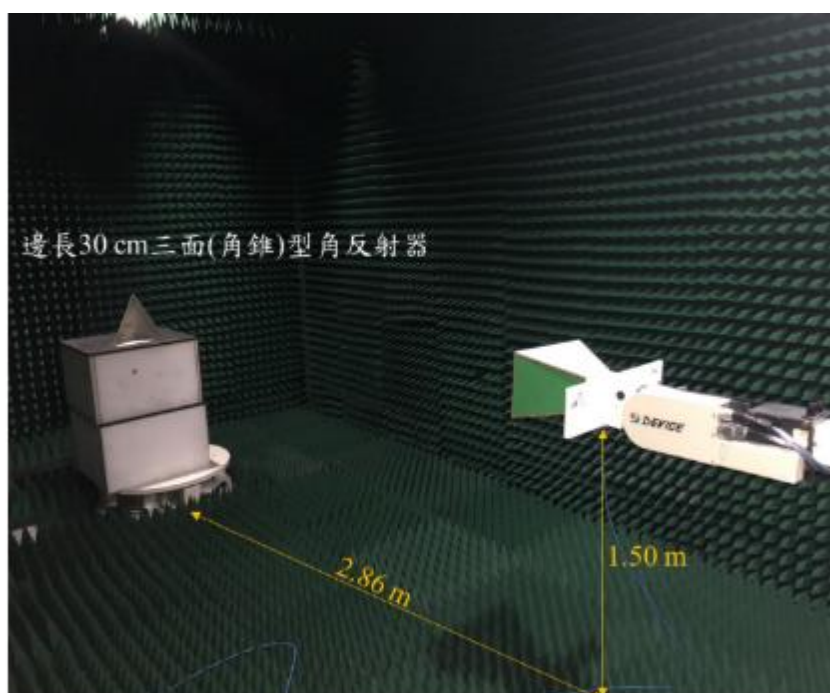


圖 3- 31 微波暗房 GB-SAR 測試場景及位置(2)

(五)SAR 對角反射器回波測試

- ①L 波段（頻率 1~2 GHz、即波長 30~15 cm）測試
- ②S 波段（頻率 2~4 GHz、即波長 15~7.5 cm）測試
- ③C 波段（頻率 4~8 GHz、即波長 7.5~3.75 cm）測試
- ④Ku 波段（頻率 12~18 GHz、即波長 2.5~1.67 cm）測試

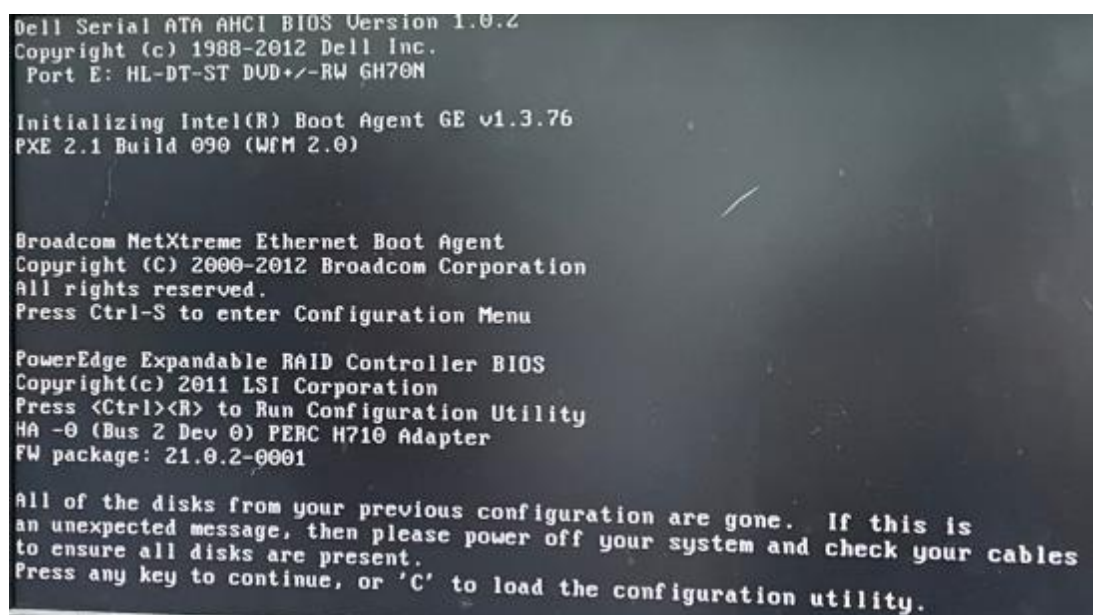
(六)網路分析儀(VNA)突發性故障與檢修

①故障狀況：

113 年 9 月實驗進行中，發現 Agilent N5245A PNA-X 網路分析儀(VNA)突發性故障。出現 VNA 原配置的硬碟所有內容消失(All of the disks from your previous configuration are gone)、軟體測試失敗(Media test failure)、無法開機(No boot device available)、非預期不一致及 Fsk 運作失效(Unexpected Inconsistency: Run Fsk Manually Failed)..等故障碼(如圖 3-32~圖 3-35 所示)。



圖 3- 32 網路分析儀(VNA)突發性故障



Dell Serial ATA AHCI BIOS Version 1.0.2
Copyright (c) 1988-2012 Dell Inc.
Port E: HL-DT-ST DVD+-RW GH70M

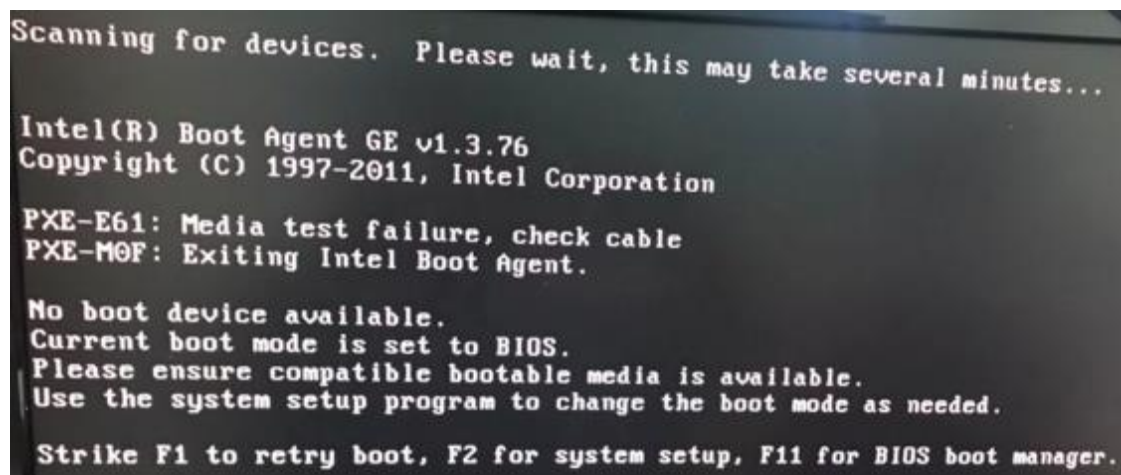
Initializing Intel(R) Boot Agent GE v1.3.76
PXE 2.1 Build 090 (WfM 2.0)

Broadcom NetXtreme Ethernet Boot Agent
Copyright (C) 2000-2012 Broadcom Corporation
All rights reserved.
Press Ctrl-S to enter Configuration Menu

PowerEdge Expandable RAID Controller BIOS
Copyright(c) 2011 LSI Corporation
Press <Ctrl><R> to Run Configuration Utility
HA -0 (Bus 2 Dev 0) PERC H710 Adapter
FW package: 21.0.2-0001

All of the disks from your previous configuration are gone. If this is an unexpected message, then please power off your system and check your cables to ensure all disks are present.
Press any key to continue, or 'C' to load the configuration utility.

圖 3- 33 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(1)



Scanning for devices. Please wait, this may take several minutes...

Intel(R) Boot Agent GE v1.3.76
Copyright (C) 1997-2011, Intel Corporation

PXE-E61: Media test failure, check cable
PXE-M0F: Exiting Intel Boot Agent.

No boot device available.
Current boot mode is set to BIOS.
Please ensure compatible bootable media is available.
Use the system setup program to change the boot mode as needed.

Strike F1 to retry boot, F2 for system setup, F11 for BIOS boot manager.

圖 3- 34 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(2)

```
/dev/mapper/VolGroup00-LogVol07: UNEXPECTED INCONSISTENCY; RUN fsck MANUALLY.
(i.e., without -a or -p options)
/dev/mapper/VolGroup00-LogVol08: Superblock last mount time (Mon Dec 13 12:27:05
2021,
now = Thu Oct 4 19:25:39 2012) is in the future.

/dev/mapper/VolGroup00-LogVol08: UNEXPECTED INCONSISTENCY; RUN fsck MANUALLY.
(i.e., without -a or -p options)
/dev/mapper/VolGroup00-LogVol09: Superblock last mount time (Mon Dec 13 12:27:05
2021,
now = Thu Oct 4 19:25:39 2012) is in the future.

/dev/mapper/VolGroup00-LogVol09: UNEXPECTED INCONSISTENCY; RUN fsck MANUALLY.
(i.e., without -a or -p options)
[FAILED]

*** An error occurred during the file system check.
*** Dropping you to a shell; the system will reboot
*** when you leave the shell.
Give root password for maintenance
(or type Control-D to continue): _
```

圖 3-35 網路分析儀(VNA)突發性故障顯示(3)

②故障分析：

網路分析儀經檢測分析後，判定該裝備故障之原因為硬碟損壞。

③故障排除：

執行修護硬碟、硬碟初始化、複製硬碟，經更換故障之硬碟元件並重新測試，故障已初步排除；重新恢復軟體和執行網路分析儀功能(如圖 3-36 所示)。

④開機測試：

網路分析儀修護後開機自測，可正常顯示 Window 完整的作業系統，含開機啟動程式及桌面已恢復正常功能(如圖 3-37 所示)，故障狀況已排除；測試結果全功能正常。

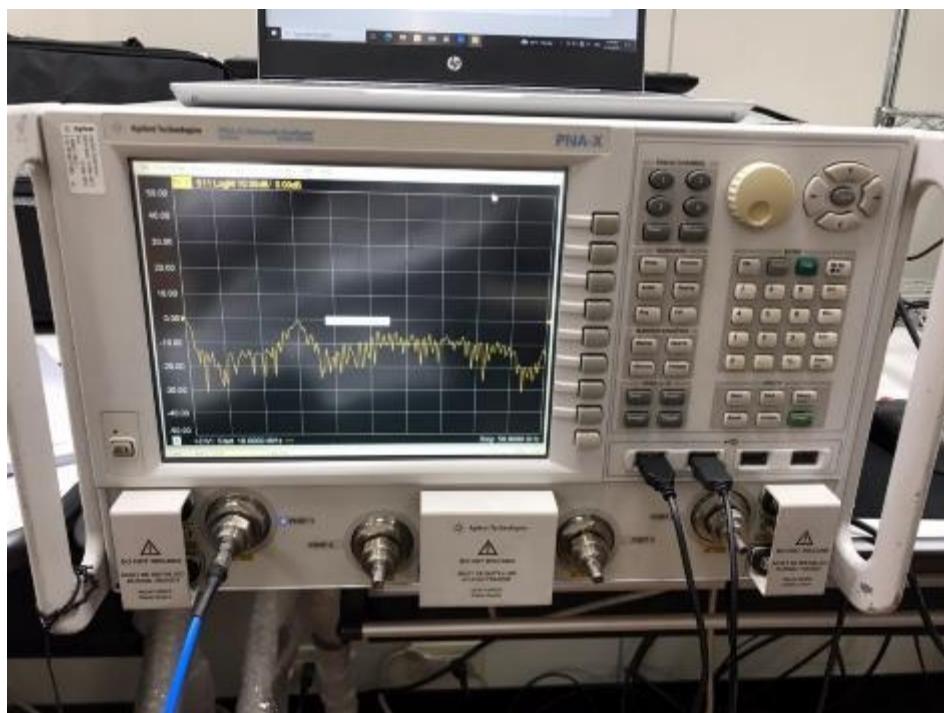


圖 3- 36 網路分析儀(VNA) 維修後狀況(1)



圖 3- 37 網路分析儀(VNA) 維修後狀況(2)

⑤發射接收測試：

網路分析儀執行硬體修護後，配合角反射器於微波暗房內，執行發射、接收的成像測試。經以 L 波段的範圍設計頻率 1~2GHz（既 1,000 MHz~2,000 MHz），其間隔 5MHz，故每個位置有 201 筆回波資料。

實驗的孔徑步距（Aperture step）暫定長度為 1,200mm，其故位置 600、500、.....100、0(中心原點)、-100、-200、-300、-400、-500、600mm 共有 13 處，形成 $201 \times 13 = 2,613$ 個的陣列 I、Q 複數資料；網路分析儀(VNA) 維修後測試場景，詳如圖 3-38、圖 3-39 所示。並以有、無角反射器的發射、接收方式，紀錄 GB-SAR 回波訊號。

經協請業界實務經驗豐富，並擁有 Ku Band GB-SAR 現品的「北極星測繪科技有限公司」協助成像，再度檢視網路分析儀(VNA)的修護品質；以確保儀器設定參數正常，全般確保 GB-SAR 整體運作情況。

經過 Range Compression 的初步處理後的影像，詳如圖 3-40~圖 3-41 所示、Azimuth Compression 的初步處理後的影像，詳如圖 3-42~圖 3-43 所示。其中有、無角反射器的差異顯著，二具角反射器回波訊號清晰可見(如圖 3-41、圖 3-43)，而「無角反射器」設置的回波訊號微弱如圖 3-40、圖 3-42)，其呈現幾乎與背景相當。

可確定網路分析儀(VNA)功能恢復正常，可進一步嘗試相關係數調校整與全般恢復作業。

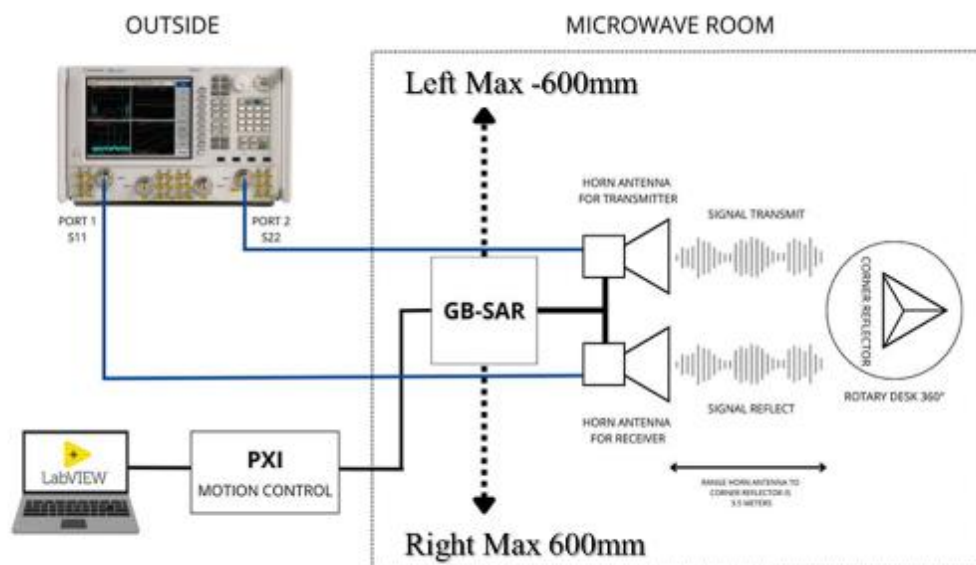


圖 3- 38 網路分析儀(VNA) 維修後測試場景(1)

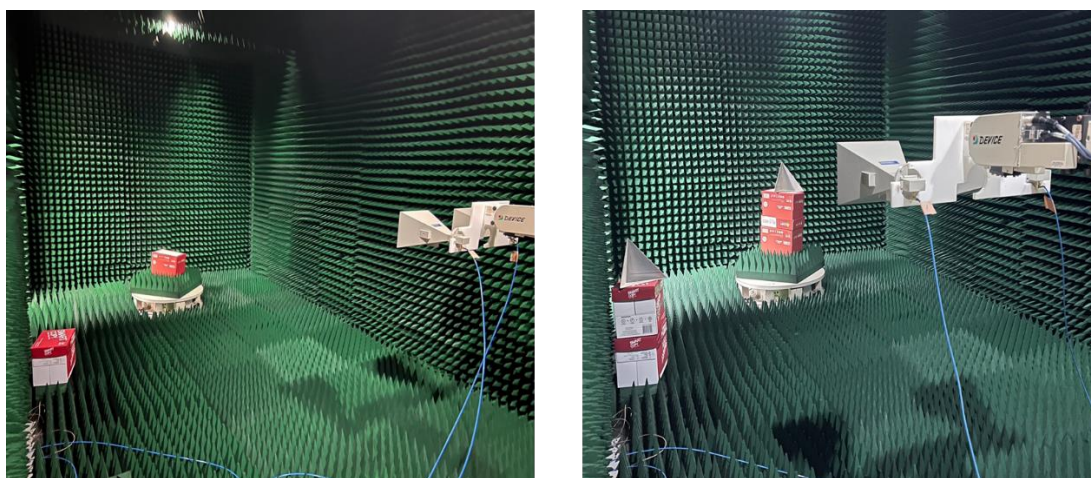


圖 3- 39 網路分析儀(VNA) 維修後測試場景(2)

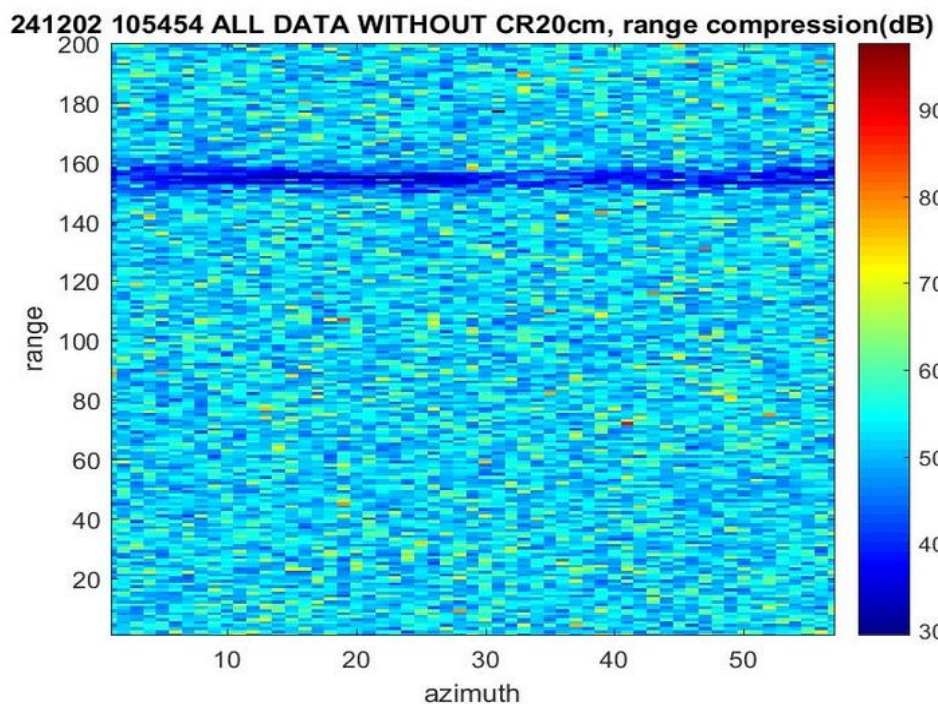


圖 3- 40 經 Range Compression 處理回波訊號(無角反射器)

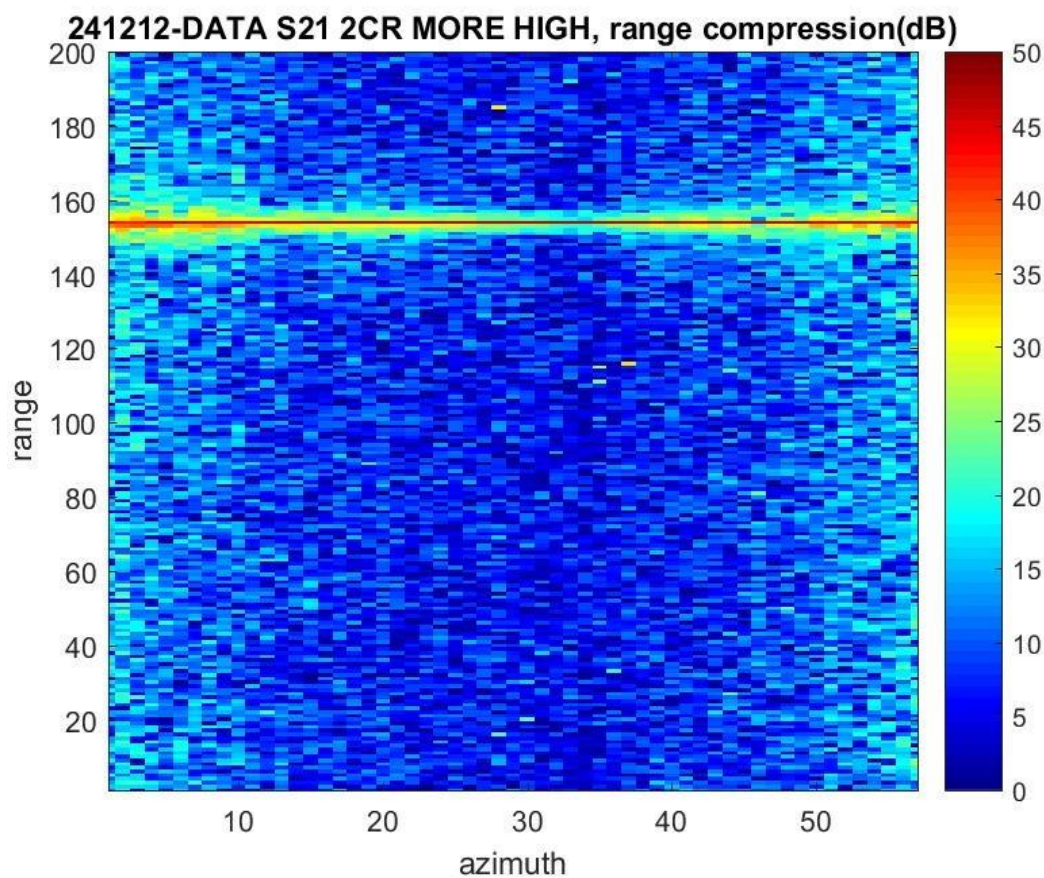


圖 3- 41 經 Range Compression 處理回波訊號(角反射器)

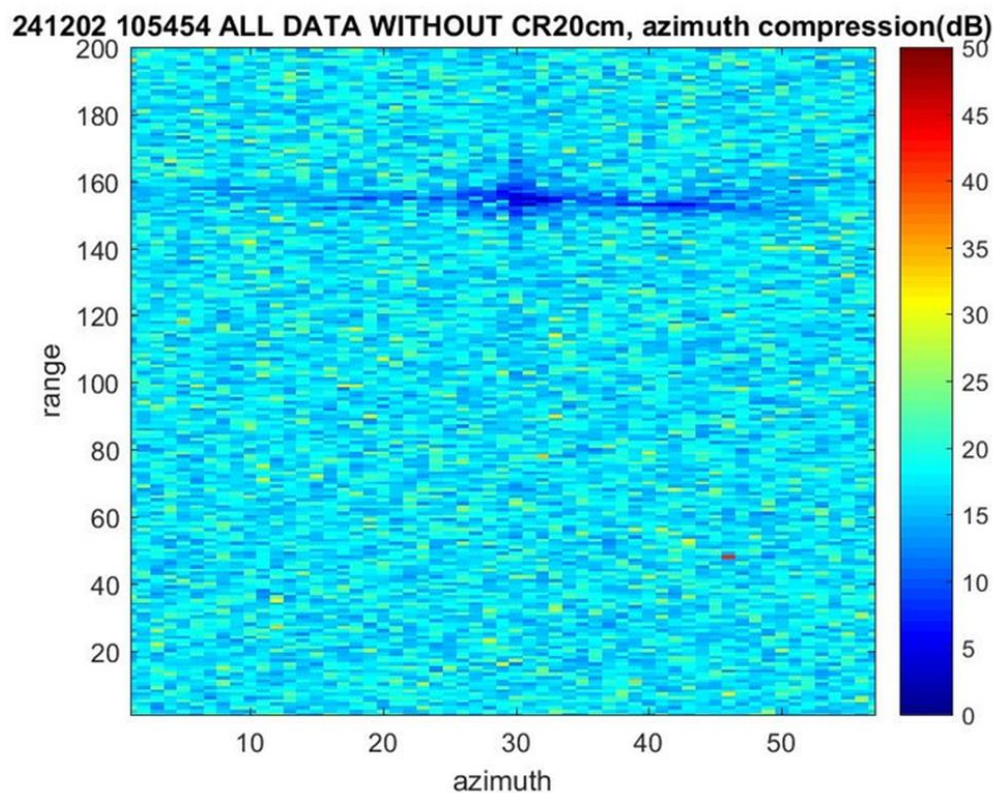


圖 3- 42 經 Azimuth Compression 處理回波訊號(無角反射器)

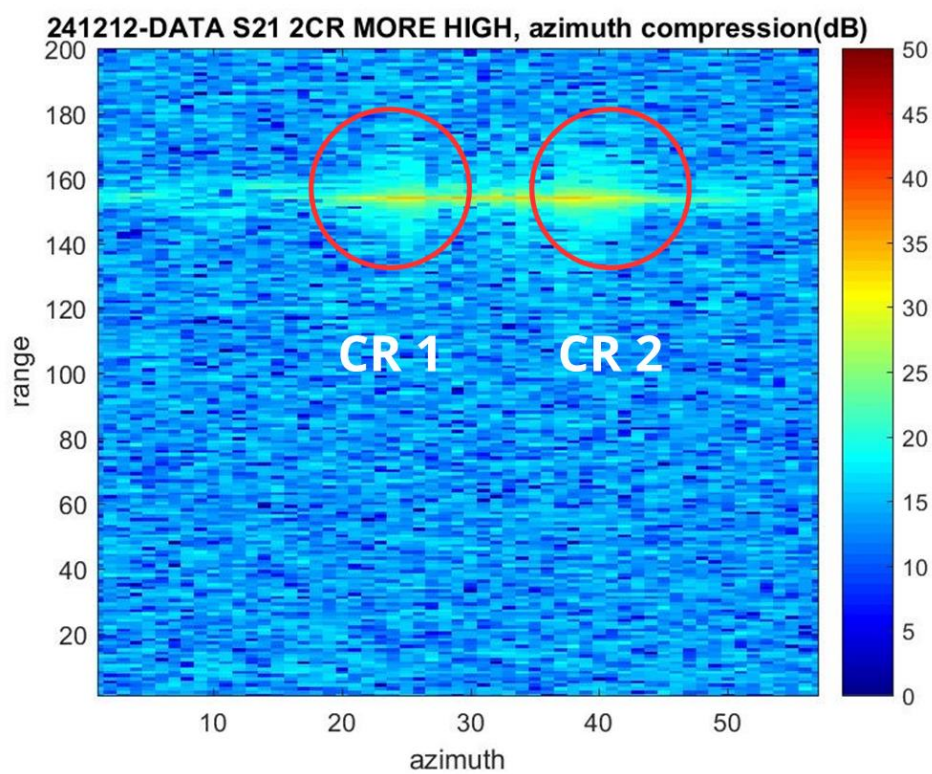


圖 3- 43 經 Azimuth Compression 處理回波訊號(角反射器)

第五節 改置「移動式雷達車」前期整備（車廂改裝）

重建後的 GB-SAR 經過軟、硬體整合測試，可安置於野外執行觀測測試。為了更加的視野、更長的運作時程。將改裝國立中央大學現有「移動式雷達車」以滿足後續長時間的邊坡觀測需求。

一、電力(發電機)系統整建

現有「移動式雷達車」配置發電機，可滿足長時間觀測需求。

(一)內置 Kosika KG7500 AC 發電機(功率 7,000W、可連續 7.5hr)

及 Kosika KG3000 AC 發電機(功率 2,800W、可連續 7.5hr)；

均可提供 AC 110V、220V 雙重電壓電力。

(二)發電機艙具主動式散熱系統，以確保電品質(電壓、頻率)穩定。

(三)經實際測試，每部發電機運作可達 7.5hr 以上，但發現有國產發電機(Kosika KG300 AC 及 Kosika KG7500 AC)偶有電壓、電流不穩定現象。

(四)經召請發電機廠家執行測試，現地(有負載下)調校電壓、電流暨供電頻率(60Hz)，已大幅改善並有效確保 GB-SAR 運作順遂；其作業情況如圖 3-44~圖 3-47 所示。



圖 3- 44 GB-SAR 車廂發電機(1)-電流檢測



圖 3- 45 GB-SAR 車廂發電機(2)-電壓檢測



圖 3- 46 GB-SAR 車廂發電機(3)-輸出電流調校

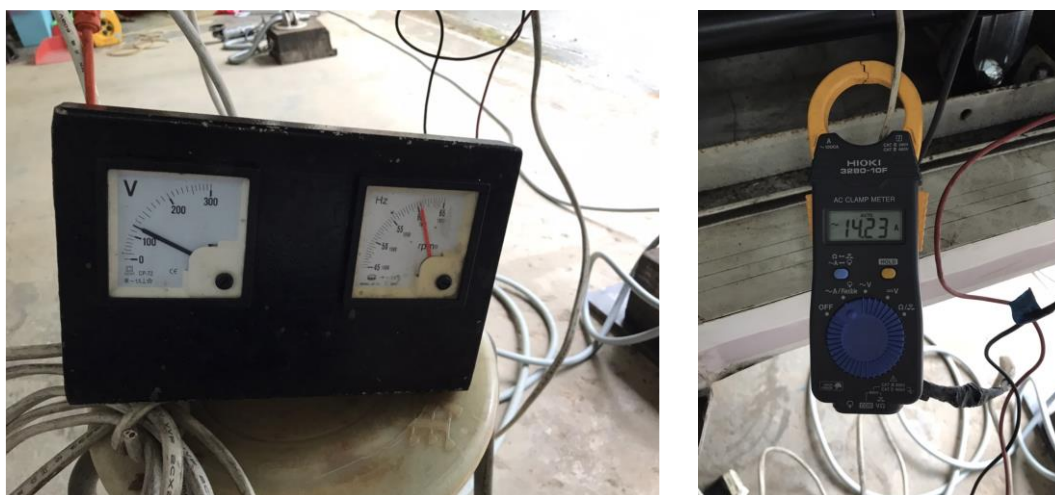


圖 3- 47 GB-SAR 車廂發電機(4)-輸出電流、電壓調校

二、雷達車廂維護整修

現有「移動式雷達車」由雷達車廂及 3.5 噸車頭(動力載具)所組成，其雷達車廂具液壓承載式(四足)平衡穩定系統，有助於 GB-SAR 系統運作之成果精度。且 GB-SAR 定點長期觀測時，可選擇與車頭(載具)分離或合併作業。

(一)液壓系統檢整

車廂置放地面時，以四隻液壓支腿承擔車廂所有重量。液壓系統的主要功能，在於將儲存於系統液體介質內的壓力能量，透過機械方式轉換為其他的能量型式(位能)，以達到作功的目的。液壓系統甚少單獨存在，大多配合其他的機械設備使用，以提供持續且穩定的機械位移(如車廂上、下攜行載具(車頭)時的液壓支腿升、降行程)。

「移動式雷達車」平日保養時發現液壓支臂有滲、漏油跡產生，但油液滲漏不嚴重，難以準確確定位置時。不宜盲目拆卸或更換，經利用可用潔淨的擦布把滲漏部位擦乾，然後，仔細觀察滲漏點。必要時，也可以在該部位鋪設白色捲筒擦手紙，以便更準確地找到滲漏點。

未避免液壓系統停機狀態下，故障不易觀察的特性，可以開機檢查，進行故障復現。但開機檢查要注意做好安全防護措施，防止因故障突現引發事故。

經過直觀檢查法，以眼觀及手摸油漬，並以白色捲筒擦手紙確認漏油後，執行相關維修(護)

①液壓系統漏油處理(詳如圖 3-48~圖 3-51)。

②液壓系統油壓缸更換(詳如圖 3-52、圖 3-53)。

③ 液壓系統電子控制閥漏油維修(詳如圖 3-54、圖 3-55)。

④ 車廂翻修整理(詳如圖 3-56~圖 3-59)。



圖 3- 48 液壓系統漏油處理-漏油現象(1)



圖 3- 49 液壓系統漏油處理-漏油現象(2)



圖 3- 50 液壓系統漏油處理-支腿更換(1)

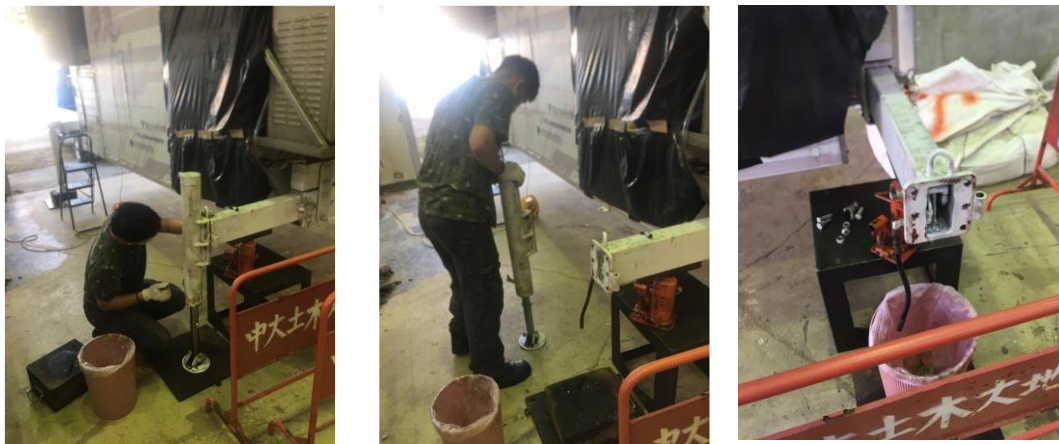


圖 3- 51 液壓系統漏油處理-支腿更換(2)



圖 3- 52 液壓系統油壓缸更換(1)

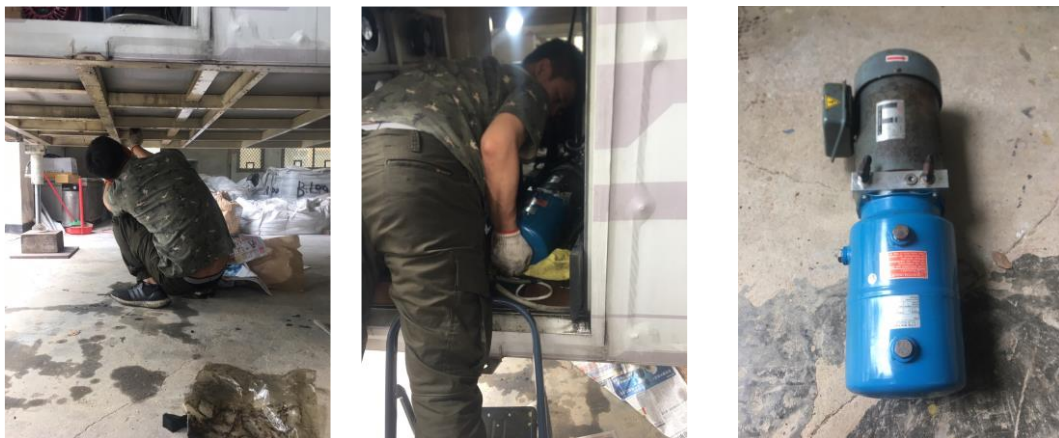


圖 3- 53 液壓系統油壓缸更換(2)



圖 3- 54 液壓系統電子控制閥漏油維修(1)

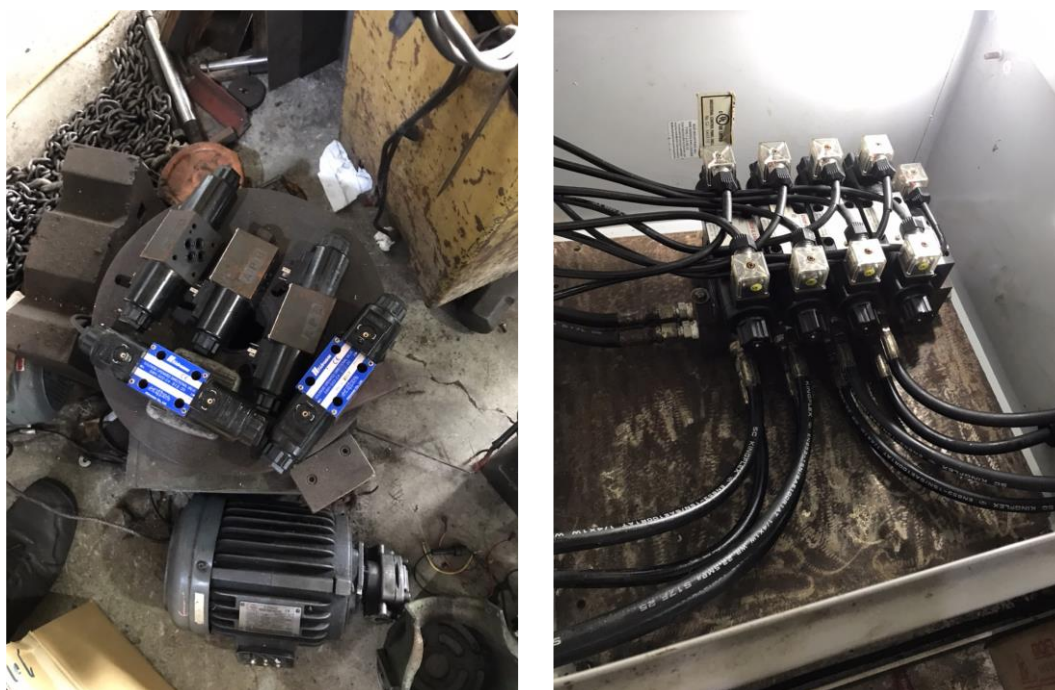


圖 3- 55 液壓系統電子控制閥漏油維修(2)



圖 3- 56 車廂整理(1)-液壓系統整理翻修



圖 3- 57 車廂整理(2)-液壓系統整理翻修



圖 3- 58 車廂整理(3)-液壓系統整理翻修

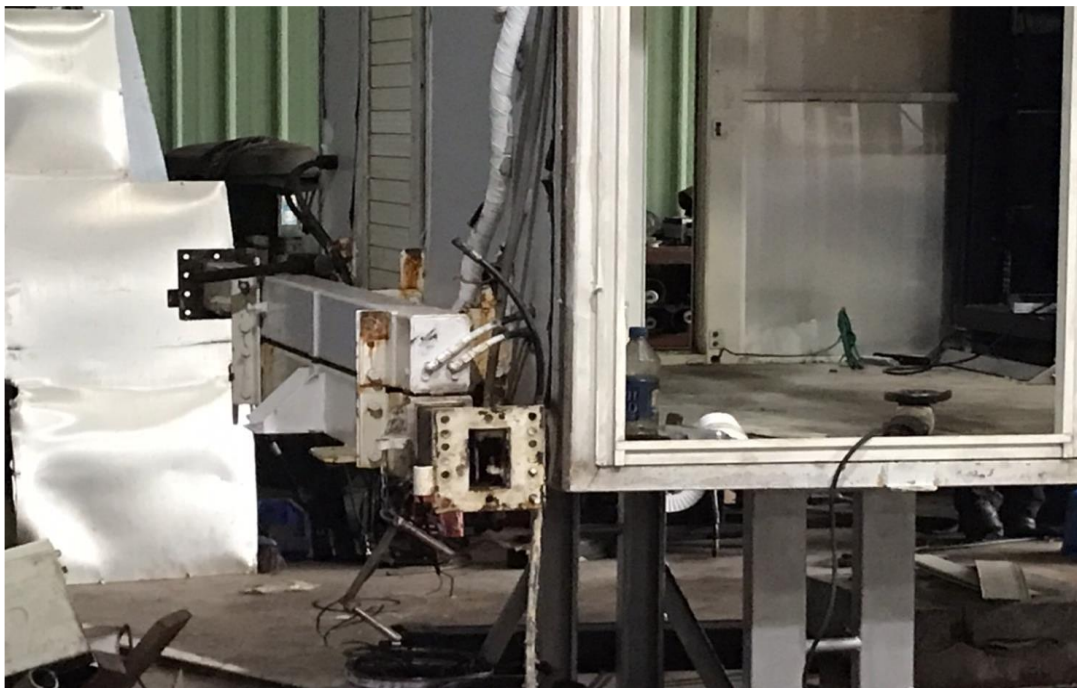


圖 3- 59 車廂整備(4)-結構整理翻修

(二)電源線檢整

「移動式雷達車」全車由電線所組成的穩定電力線路，為保障車廂所有電器的正常運轉，並且關乎到實驗操作便利與用電安全性，絕對是「GB-SAR 系統重建與改置(車廂改裝)」全計畫的安全核心。

為了這項無法忽略了且極其重要的隱蔽工程，沒察覺在不同過往的時空背景下，早期線路已不符現今的用電需求而難以負荷，如果大量使用延長線與增加電源插座，只會因電線超載使用埋下火災的隱憂；故應以用電穩定為核心需求，避免加速電線的老化與破壞，一步到位選擇更新電纜線，做好超前佈署穩固根基。

讓 GB-SAR 實驗過程中，不必擔心不斷加重的線路負擔，這樣不管是嚴寒冬季或炎酷夏日，高功率電器(如發電機輸出)的使用都能確保實驗全程的安全。

- ① 確保電纜/轉接器元件，施工及功能正確。
- ② 確保電纜(導)線正確端接
- ③ 確保電線「不」綑綁重壓
- ④ 確保用電「不」超過負載
- ⑤ 電力插頭/座「不」可積累灰塵及受濕，並適時清潔、維護。
- ⑥ 電線使用狀態超出舊有導線的負荷時，會造成電線升溫，使絕緣外皮硬化並破損，溫度每上升一度，電阻就上升將近 0.4%，電流也跟著提高，依據「用戶用電設備裝置規則」法規，建議經過 15~20 年使用的舊有電線，最好要全部換新為佳，避免電線走火的危險。

執行相關電源線檢整作業，以確保車廂及「GB-SAR 系統」的使用安全(詳如圖 3-60、圖 3-61 所示)



圖 3- 60 電源線整理與補強(1)



圖 3- 61 電源線整理與補強(2)

三、車廂結構補強與翻新

(一)車頂（原）滑軌規劃

本(113)年度預劃接續完成 GB-SAR 系統的改置作業，將重建後的 GB-SAR，改置於國立中央大學現有的「移動式雷達車」，滿足更穩定運作平台及更長時效的電源供應。有效達成以「移動式雷達車」作為 GB-SAR 移動載具。

現有「移動式雷達車」由雷達車廂及 3.5 噸車頭(動力載具)所組成，其雷達車廂具液壓承載式(四隻支腿)平衡穩定系統，有助於 GB-SAR 系統運作之成果精度。且 GB-SAR 定點長期觀測時，可選擇與車頭(載具)分離或合併作業。

為了更加的觀測視野，研究將 GB-SAR 觀測平台改裝安置於「移動式雷達車」車頂，面積觀測平台安置於「移動式雷達車」，面積觀測平台安置於「移動式雷達車」，其面積大（長 3.34m、寬 2.1m），離地高度 2.9m，可滿足 GB-SAR 全波段觀測的大視野需求；應用構想詳如圖 3-62 所示。



圖 3- 62 移動式雷達車廂及載具構想

利用「移動式雷達車」車頂平台，具選擇性安置重建後 GB-SAR，以獲得更高、更廣的觀測視野。為達此目標我們考量翻新車廂、並施以結構補強。透過車廂鈑金整修或鈑件更新，強化「移動式雷達車」車頂平台，以安置 GB-SAR 軌道(詳如圖 3-63、圖 3-64)。



圖 3- 63 車廂整備(5)-結構補強



圖 3- 64 車廂整備(6)-結構補強

經實際作業測試，發現車頂平台離地高度 2.9m，GB-SAR 儀器(含二軸(XY)軸向掃描儀、天線連接座及作動控制器等)上下不便；需另行增加安全防護機具及設備。

(二)車廂內(新)滑軌規劃

故再進一步改良車廂，嘗試開創「上掀式車門(詳如圖 3-65)」或「左右側開式車門(如圖 3-66 所示)」，以便利 GB-SAR 操作及後續實驗進行。

後續考量將進行車廂修改的設計與製造、完成 GB-SAR (天線)滑軌系統修改與安置。



圖 3- 65 車廂修改規劃(1)-上掀式車門

******<https://www.boxman.co.nz/wp-content/uploads/2023/05/20ft-Container-Gym-Awning-Hydraulics-Shelving.jpg>



圖 3- 66 車廂修改規劃(2)-左右側開式車門

**<https://www.bettastorage.com.au/engineering-containers.html>

(三)二維(XY)軸向掃描儀滑軌縮小優化

受限雷達車車廂室內空間限制，以確保車載及運作安全需求，將二維(XY)軸向掃描儀的 Y 軸(高度)滑軌縮短優化。由原先最大可移動高度2,200 mm 尺寸，以更換直桿方式調降為1,950 mm(施工詳如圖 3-67 所示)」；有效避免避撞而損及 GB-SAR 裝備(縮短優化前、後之比較，詳如圖 3-68 所示)。



圖 3- 67 二維(XY)軸向掃描儀 Y 軸(高度)滑軌縮短優化

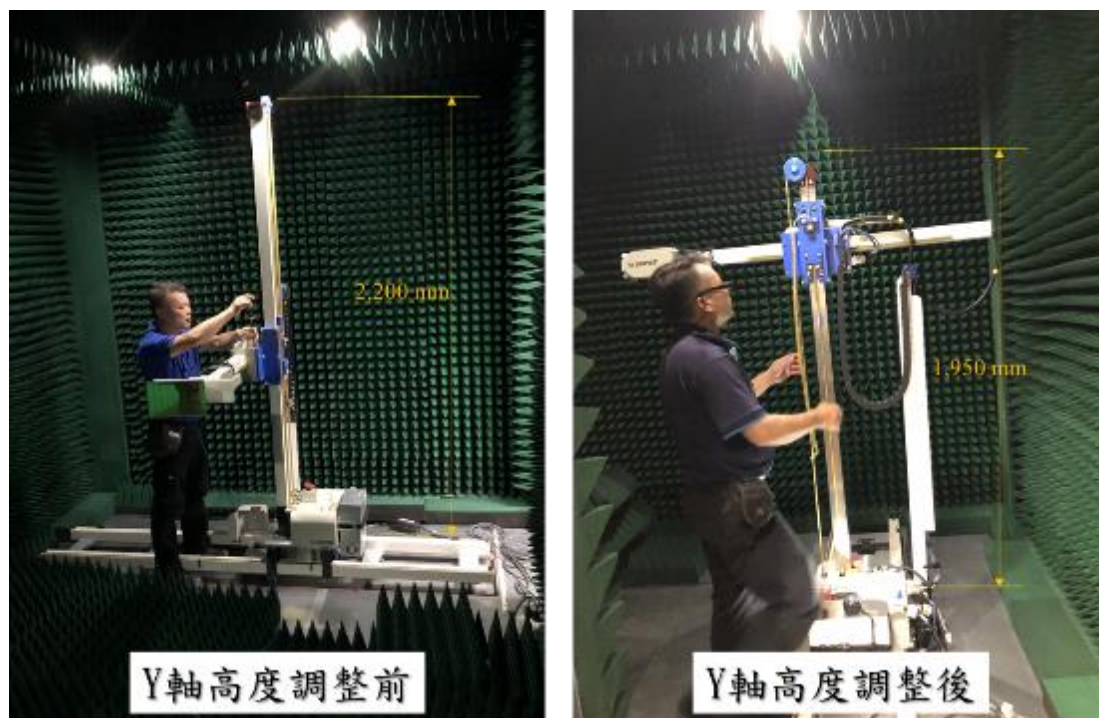


圖 3- 68 二維(XY)軸向掃描儀 Y 軸(高度)滑軌比較

(四)GB-SAR 戶外實驗區測試驗證

為有效確保 GB-SAR 的重建與改置效能，已徵詢「北極星測繪科技有限公司」⁸同意，GB-SAR 執行戶外實驗區測試驗證時，將利用該公司現有 G2000M GB-SAR 裝備併同實施(詳如圖 3-69、圖 3-70 所示)」，並比對地表形變監測數值，以確保本研究案「GB-SAR 的重建與改置」能符合預期效能。

⁸ <http://www.rs-survey.com/>

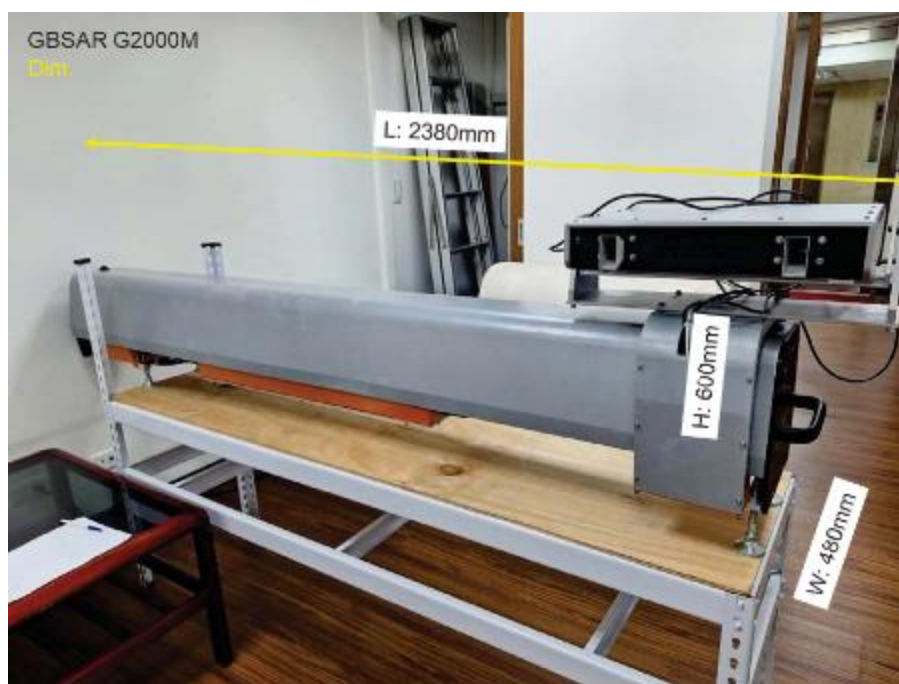


圖 3- 69 「北極星測繪科技有限公司」 G2000M GB-SAR(1)

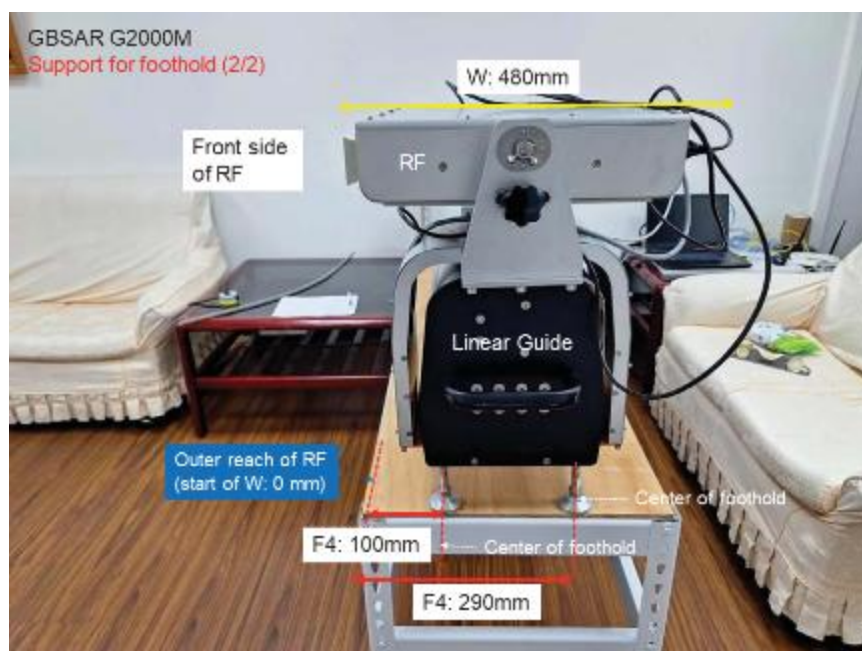


圖 3- 70 「北極星測繪科技有限公司」 G2000M GB-SAR(2)

第四章 結論及建議

「GB-SAR 系統的重建與改置(車廂改裝)」研究案執行迄今，已驗證相關設備具體可行，達成 GB-SAR 重建作業；另改置作業亦按部就班的逐步實現，有效執行車廂改裝作業。

目前已執行的「車廂改裝」作業包括雷達車廂電力(發電機)系統整建（液壓系統檢整、電源線補強(更新)與車廂結構補強與翻新）、車廂軌道改置規劃（車頂及車廂內滑軌規劃）及二維(XY)軸向掃描儀滑軌縮小優化，並規劃 GB-SAR 戶外實驗區測試驗證。

GB-SAR 系統的重建與改置作業，目前已完成微波暗房角反射器選定及其角反射器 RCS 值計算及 GB-SAR 實驗波段設計分析；目前正積極執行微波暗房整體實驗測試。

本年度(113)內已完成 GB-SAR 系統的改置作業，將重建後的 GB-SAR，改置於國立中央大學現有的「移動式雷達車」，滿足更穩定運作平台及更長時效的電源供應。有效達成

- 一、以「移動式雷達車」作為 GB-SAR 移動載具。
- 二、利用「移動式雷達車」車頂(外部)或車廂(內部)平台，具選擇性安置重建後 GB-SAR，以獲得更高、更廣的觀測視野。
- 三、以「移動式雷達車」的內載發電機，提供 GB-SAR 長效、穩定及安全的電力供應需求。
- 四、執行「GB-SAR 系統的重建與改置」的軟、硬體整合測試，完成 GB-SAR 系統的全般整備作業。其後將接續執行：

- (一)以「移動式雷達車」作為 GB-SAR 移動載具。
- (二)利用「移動式雷達車」車內台，具選擇性安置重建後 GB-SAR，以獲得更定更加訂穩定的邊坡觀測效果。
- (三)以「移動式雷達車」的內載發電機，提供 GB-SAR 長效、穩定及安全的電力供應需求。
- (四)機動式雷達車的校內測試評估後
 - ①確保 GB SAR 執行效能及操作安全，並先行於中央大學校園內，完成全般測試確定整體效能
 - ②戶外崩塌地的實地觀測，執行區域規劃為桃園市復興區「光華崩塌地」大規模崩塌潛勢區或新竹縣尖石鄉秀巒邊坡崩塌地。

參考文獻

1. Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-based radar interferometry: A bibliographic review. *Remote Sensing*, 11(9), 1029.
2. Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., Fortuny-Guasch, J., & Sieber, A. J. (2003). Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 745-752.
3. Takahashi, K., Matsumoto, M., & Sato, M. (2013). Continuous observation of natural-disaster-affected areas using ground-based SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1286-1294.
4. Noferini, L., Pieraccini, M., Mecatti, D., Macaluso, G., Luzi, G., & Atzeni, C. (2007). DEM by ground-based SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4(4), 659-663.
5. Pieraccini, M., Luzi, G., & Atzeni, C. (2001). Terrain mapping by ground-based interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(10), 2176-2181.
6. Luzi, G., Imperatore, P., & Riccio, D. (2010). Ground based SAR interferometry: a novel tool for Geoscience. *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*, 508.
7. Takahashi, K., Matsumoto, M., & Sato, M. (2013). Continuous observation of natural-disaster-affected areas using ground-based SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3), 1286-1294.

8. Gurralla, K. K., & Das, S. (2012). Impact of relay location on the performance of multi-relay cooperative communication. *International Journal of Computer Networks and Wireless Communications*, 2(2), 226-231.
9. Fei, L., Qinghua, L., Tao, L., & Guangxin, Y. (2007, April). Impact of relay location according to SER for amplify-and-forward cooperative communications. In *2007 International Workshop on Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID)* (pp. 324-327). IEEE.
10. Xue, K., Hong, X., Chen, L., Xiong, J., Shi, J., & Wang, C. X. (2013, December). Performance analysis and resource allocation of heterogeneous cognitive Gaussian relay channels. In *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1167-1172). IEEE.
11. Tera, A. D., Gurralla, K. K., & Das, S. (2014, March). Power allocation for AF cooperative relaying using particle swarm optimization. In *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)* (pp. 1-4). IEEE.
12. Chet, K. V., Kuan, C. B., & Teik, C. H. (2003). Development of a ground-based radar for scattering measurements. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), 36-42.

13. Chet, K. V., Kuan, C. B., & Teik, C. H. (1999, June). Design and development of a scatterometer system for environmental monitoring. In IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293) (Vol. 1, pp. 583-585). IEEE.
14. Tarchi, D, Casagli, N, Moretti, S, et al.: 'Monitoring landslide displacements by using ground based synthetic aperture radar interferometry: application to the ruinon landslide in the Italian Alps', J.Geophys. Res., 2003, 108, (B8),pp. 10–14
15. Rödelsperger, S, Becker, M, Gerstenecker, C, et al.: 'Digital elevation model with the grounded based SAR IBIS-l as basis for volcanic deformation monitoring', J. Geodyn., 2010, 49, (3–4), pp.241–246
16. Pipia, L, Aguasca, A, Fabregas, X, et al.: 'Temporal decorrelation in polarimetric differential interferometry using a ground based SAR sensor', In Proc. IGARSS, Seoul, Korea, 2005, pp. 4108–4111
17. 余騰鐸. (2020) .「應用地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡崩塌預警系統建置」成果報告書 ,水保局 SWCB-109-264 。
18. 余騰鐸. (2021) .「應用地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡與土石流之預警機制偵測」成果報告書 ,水保局 110 保發 -8.1-保-01-06-001(27) 。
19. 余騰鐸. (2021). 應用地基合成孔徑雷達干涉技術於邊坡崩塌預警系統建置. 水保技術,15(3), 36-37.

20. Kerr, D. E. (Ed.) , et al. (1987). Propagation of short radio waves , MIT, Radiation Laboratory Series, (Vol. 24). IET.
21. Treuhaft, R. N., & Cloude, S. R. (1999). The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 37(5), 2620-2624.
22. Bekefi, G., & Barrett, A. H. (1977). Electromagnetic vibrations, waves, and radiation. Mit Press.
23. Burki, J., Ali, T., & Arshad, S. (2013, December). Vector network analyzer (VNA) based synthetic aperture radar (SAR) imaging. In INMIC (pp. 207-212). IEEE.
24. V. T., Nehru, D. N., Pettersson, M. I., & Sjögren, T. K. (2013, September). An experimental ground-based SAR system for studying SAR fundamentals. In Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) (pp. 424-427). IEEE.
25. Gromek, A. (2014, June). High resolution SAR imaging trials using a handheld vector network analyzer. In 2014 15th International Radar Symposium (IRS) (pp. 1-4). IEEE.
26. Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-based radar interferometry: A bibliographic review. Remote Sensing, 11(9), 1029.
27. Frukacz, M., & Wieser, A. (2017). On the impact of rockfall catch fences on ground-based radar interferometry. Landslides, 14(4), 1431-1440.

28. Doerry, A. W. (2014). Reflectors for SAR performance testing (No. SAND2014-0882). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
29. Wang, S., Chen, K. S., & Sato, M. (2020). Performance of SAR polarimetric calibration using hybrid corner reflectors: Numerical simulations and experimental measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 440-451.
30. Miacci, M. A. S., Nohara, E. L., Martin, I. M., Peixoto, G. G., & Rezende, M. C. (2012). Indoor radar cross section measurements of simple targets. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4(1), 25-32.
31. Vu, V. T., Nehru, D. N., Pettersson, M. I., & Sjögren, T. K. (2013, September). An experimental ground-based SAR system for studying SAR fundamentals. In *Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)* (pp. 424-427). IEEE.

附錄

附錄一、期初、期中及期末審查紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
期初報告內容審查意見：		
一	請補充對水土保持或防災方面之實際應用案例？	①透過本研究成果確認合「GB-SAR 的重建與改置效能」，以 VNA 為基礎的地基合成孔徑雷達系統驗證最佳成像及植被穿透效能，增進坡地偵測的防災預警效能。 ②國外實際應用案例，如參考文獻[13~16]。 ③國內實際應用案例，如參考文獻[17~19]等。
二	請補充目前實際應用的落實程度為何？	①目前已完成微波暗房角反射器選定、微波暗房整體測試作業，開始執行 GB-SAR 先期測試，相關實驗作業，正陸續進行中。 ②「移動式雷達車」車廂改裝作業，已完成電力(發電機)系統整建、雷達車廂維護整修(液壓系統檢整、電源線檢整作業)等，目前正執行車廂結構補強與翻新，以便利 GB-SAR(天線)滑軌系統安置作業。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	請補充移動式雷達車遭遇之問題及解決方案俾利了解其需突破問題。	移動式雷達車問題已逐步解決，期中雷達車廂的改裝全盤作業及測試，進度如下 ① 已執行車廂車頂的強化加固作業。 ② 人員(器材)上下車廂車頂安全防護器具，已規劃設計「上掀式車門」或「左右側開式車門」，將 GB-SAR(天線)滑軌改置於車廂內的方式處理。 ③ 發電機電源及電力線已改善。 ④ 目前執行 GB-SAR 各波段射頻發射及接收測試中。
四	未來移動式雷達車至現場監測，其資料是現地解算或回傳解算，是否能達到即時？	資料攜回後成像並解算。
五	本案實驗區域預定為新竹縣尖石鄉秀巒邊坡崩塌，惟其重要工作項目之實施地點為中央大學，似有出入，請修正。	GB-SAR 系統的重建與改置中期(車廂改裝)案，今年度執行重點為雷達車廂改裝及 GB-SAR 改置作業，為確保 GB-SAR 執行效能及操作安全；先行於中央大學校園內，完成全般測試確定整體效能後，後續開赴新竹縣尖石鄉秀巒邊坡實行崩塌。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	學術創新面，有國際研討會發表，惟其篇數為” 0” ，有所矛盾。	已修正為 1 篇

項 次	審查意見	回覆辦理情形
期中書面審查意見：		
一	P1-1 建議補充機載、衛載及本案的車載雷達，三者間的觀測特性與優劣。且相較於目前商業系統，本系統在成本上是否具有優勢？	①依審查意見，增加機載、衛載及 GB-SAR 的比較論述。 ②現有商用 GB-SAR 系統，由商用現貨(COTS)設備組成，以固定波段、有限功能滿足特定的遙測作業需求。 ③本案「GB-SAR 系統」重建，利用中央大學現有及新購高價儀器及設備，組成新形式的 GB-SAR 系統。嘗試不同波段的 GB-SAR 射頻，測試新的穿透效能。相較市售產品，將以更長的雷達移動軌道，且二維（可水平及垂直）掃描成像平台，取代 GB-SAR 一維水平軌道平台。 ④功能及訴求不同，無法比較成本優劣。
二	P3-25，針對 RCS 數據成果進行說明與結論，並概述不同角反射器應用於邊坡監測之適用性與差異。	依審查意見辦理。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	目前對於GB-SAR 系統的測試主要在暗房內進行，未來在實際安裝到測量車之前，是否會先進行戶外測試，以了解實際外部環境的影響？即本系統是否會在各種環境條件下進行系統可靠性之測試？建議補充說明「移動式雷達車」的建議安置環境、天氣狀態…等條件，以利落實於實際的邊坡業務應用。	①依審查意見辦理。 ②本案「GB-SAR 系統」重建後，改置於測量車之前，為確保 GB SAR 執行效能及操作安全；除微波暗房測試，會先行於中央大學校園內，完成全般測試，以瞭解實際外部環境的影響。 ③會依據測試情況，撰述「移動式雷達車」的相關建議安置環境、天氣狀態…等要求條件。
四	應用於坡地監測的 GB-SAR 除了考量植被區域的穿透能力之外，尚須考量其測量坡體滑動量以及偵測相關幾何特徵的精度，此兩者彼此互不滿足，本研究如何規劃一適合坡地監測應用之「移動式雷達車」。	①GB-SAR系統的重建與改置中期(車廂改裝)案，今年度執行重點為雷達車廂改裝及GB SAR改置作業。 ②待本年度計畫完成後，未來「重建與改置GB SAR系統的觀測實驗」選址測試以不同波段的GB SAR 射頻(Ku、C、S及L波段)，嘗試對植被的新穿透效能，尋求最適用於以獲用於台灣地區邊坡偵測的最佳波段配置。 ③後續將整合GB-SAR硬、軟體及新移動載具的測試評估，針對實驗試驗區邊坡條件執行測試。

項 次	審查意見	回覆辦理情形
五	本研究的目標為取代目前商業模式下廠家產製「定頻」GB-SAR，是否表示所研發之 GB-SAR 系統具有發射多波段雷達波的能力。	①本案以向量網路分析儀 VNA(Vector Network Analyzer)，作為 GB-SAR 系統雷達波的發射及接收基礎。 ②以網路分析儀 (Agilent N5245A PNA-X)為例，其本身發射頻率為 10MHz 到 50GHz，但須搭配合適角錐天線。

項次	審查意見	回覆辦理情形
期末成效評核表審查意見：		
一	成品的自主性極高	本研究案利用國立中央大學現有的高價儀器（向量分析儀、訊號產生器…及移動成像軌道），組成新形式的 GB-SAR 系統；以取代商業模式所產製的 GB-SAR 產品。
二	建議補充說明計畫實用性與應用層面	依審查意見辦理於第四章「結論及建議」章節補充說明。
三	如何因應車體震動的問題？	① 車廂因具備四足液壓承載穩定系統，故實務上 GB-SAR 運作時，發電機（發電）運作震動甚微，故不影響 GBSAR 觀測實驗成果。 ② 若有震動疑慮，發電機亦可即時自車廂卸下，獨立安置於地面供電。