


# 行政院環境保護署

106 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

## 土壤汙染現地寬頻電性量測技術研發

期末報告（定稿本）

主 辦 單 位：  行政院環境保護署  
專案執行單位： 國立交通大學／防災與水環境研究中心  
專案主持人： 林志平 教授  
專案執行期間： 106 年 01 月 09 日起至  
106 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 106 年 12 月 印製



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告  
☒修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	106 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 預防 <input checked="" type="checkbox"/> 其他	主持人：林志平 NO：29	
計畫名稱	土壤污染現地寬頻電性量測技術研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一：</p> <p>1. 本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治工作推動的貢獻似不易評估。</p> <p>(1)前一年度的計畫：“地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展”，並未具體說明於實場如何應用，本計畫亦類似。</p> <p>(2)本研究成果的適用條件與限制條件未具體說明。</p> <p>2. 本專案預估之成果績效似不易評估。</p> <p>3. 研究方法可行，對未來實場應用性的說明似不具體。</p> <p>4. 預期成果評估原則與評估條件的說明似不具體。</p> <p>(1)計畫書中說明“...快速精確率定方法...”，但未說明如何評估此成效？評估因子與條件或依據為何？建議說明。</p> <p>(2)前一年度的計畫成果亦有類似狀況，及已有研究成果，但該技術的應用限制條件或是適用條件卻未具體說明。有些研究結果的解讀與情境不易釐清，本計畫書亦有類似狀況，即「該如何應用本計畫的成果？」。</p> <p>5. 計畫書 七. (一) 漏列了 105 年度的土污基金計畫「地電阻影像探測監控土壤與地下水污染整治的技術發展」乙項。</p>		<p>1. 從前期的研究計畫與對於國內外地球物理探測技術於土壤及地下水污染調查與整治的應用的掌握，可以發現目前技術的瓶頸受限於對於土壤的水文地質與污染特性缺乏寬頻電學性質的關連性掌握，且大部分量測僅侷限於特定頻率區間（例如直流或極低頻的地電阻影像、高頻的透地雷達），單一或侷限的性質無法獲得明確的水文地質或污染特性資訊。</p> <p>。本計畫之主要目的在於發展具高度潛力之寬頻介電頻譜量測技術。各汙染物具有不同之介電頻譜，透過對其特徵頻段的掌握，即可於現場進行辨識與調查。但目前既有室內量測技術具高度複雜性，介電頻譜模型的建立不易，更無現場量測技術。因此在明確談論其適用條件與限制條件時，須先行有可行之量測技術，才可針對此量測技術進行其適用條件與限制條件的評述，亦即為本研究之重要工作。</p> <p>2. 本計畫屬技術研發工作之進行，由數模以及室內試驗可驗證本研究所提出之新量測技術之方法論的成果，並以之作為成果績效，在評估上應無難處。而針對現場測試的部分，將是應用端的改善與提升，可做後技術後續推廣上的進一步研發與改善。</p> <p>3. 感謝委員對方法論之認可，請參考 1 與 2 之回覆說明。</p> <p>4. 感謝委員指教。惟本計畫以研發工作為主，由數模以及室內試驗可驗證本研究所提出之新量測技術之方法論的成果。而應用端需要有足夠的現場工作較可有明確之成效評估。</p> <p>5. 感謝委員提醒，已補正。</p>	

委員審查意見	計畫單位回覆
<p>委員二：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫屬基礎資訊建立，及與理論間之解析，預期成果應該以論文發表為主，但其成果可以做為後續污染調查應用之參考。</li> <li>2. 本研究擬發展一個寬頻的電學特性量測系統，以應用於現地污染場址電學特性量測。該研究議題在國內研究者少，具有其重要性。</li> <li>3. 主持人對於研究議題清楚，步驟合理；惟計畫書撰寫過於簡略，例如對於污染類型、污染場址完全未說明。</li> <li>4. 建議應針對污染場址及污染物類型，以及目標精確度更進一步探討。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員之認可。研究突破將即時著手論文發表。</li> <li>2. 感謝委員之認可，並理解本研究之重要性。</li> <li>3. 感謝委員指教，在本研究室內試驗規劃上說明以有機汙染物為試驗標的，惟尚未有明確有機汙染物對象，初步擬對成分較單純之化合物進行選取，以避免樣品差異而無法釐清問題，目前規劃有四氯乙烯、三氯乙烯以及氯乙烯。</li> <li>4. 感謝委員指教，煩請參閱前項回覆。</li> </ol>
<p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 計畫目標內容具體、明確。</li> <li>2. 預期成果具價值性。</li> </ol>	<p>感謝委員對本計畫之認可與支持。</p>
<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建立寬頻電學特性量測系統，在現地應用時可能影響因素，應優先納入實驗設計考量，例如是否可克服污染物電磁波與背景地層特性相當之狀況。</li> <li>2. 複合性污染場址如 TPH、BTEX 等污染物電磁波特性是否近似?建立此寬頻電學特性量測系統，可否進一步判讀其差異。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 汙染物與現地背景地層具有其獨特之寬頻電學特性(介電頻譜)，最主要是要找到該汙染物之特徵頻段即可作為後續比對之基礎。目前在這方面對於不同汙染物的借電頻譜模型建立仍不齊全，本研究即是要發展便利之量測之技術，並且加以將常見汙染物之特徵頻段找出。</li> <li>2. 不同汙染物具有其不同寬頻電學特性(介電頻譜)是可確定，然而其間之差異與差異特徵所在頻段以及其間差異的大小是否為本研究所開發之技術所可以分別，皆須先建立有量測技術才有辦法加以釐清。而本研究之重點即在於量測技術之發展。</li> </ol>

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告  
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	106 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 預防 <input checked="" type="checkbox"/> 其他	主持人：林志平 NO：29	
計畫名稱	土壤污染現地寬頻電性量測技術研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>執行現況、流程及方法已具體說明。</li> <li>計畫後續執行工作項目已於P. 60中說明。</li> <li>本計畫的執行進度並無落後。</li> <li>進度符合，依結案標準本計畫應可達成原計畫標的。</li> <li>研究內容與計畫目的相符。</li> <li>本計畫為執行中的計畫，目前已有初步的成果，執行成果的討論與建議的合理性尚待期末報告中進一步說明。</li> <li>整體研究成果符合預期。</li> <li>學術產出及活動、人才培育等符合預期(依據以往的成果研析)。</li> <li>本計畫仍在執行中，研究成果獲得專利、技術轉移等尚待期末報告中提出。</li> <li>本計畫的預期成果對社會經濟發展(土壤與地下水污染的產業)的效益尚待期末報告中提出。</li> <li>對LNAPL與DNAPL的說明尚待進一步確認，本研究中所指的NAPL是否是指純相物質？(NAPL傳統上是指純相物質)或是溶解相亦屬本試驗的NAPL定義？</li> <li>適合的應用情境建議說明。</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>感謝委員對本計畫之認可。</li> <li>感謝委員指教，待本計劃完成現地測試後將在期末報告中進一步討論成果與建議。</li> <li>感謝委員的認可。</li> <li>感謝委員指教，若研究成果獲得專利、技術轉移等項目，將在期末報告中提出。</li> <li>待現地測試完成後將就實驗結果進行該議題之討論，感謝委員提醒。</li> <li>本研究中所指的NAPL為非水液相 (Non-aqueous phase liquid) 之污染物，目前主要針對其溶解相之探討，純相NAPL在現地污染較少存在且僅出現在異常高濃度區域。</li> <li>感謝委員提醒，已在5.4.1結論進行補充。</li> </ol>	

委員審查意見	計畫單位回覆
<p>委員二：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 實際進度符合預期進度。</li> <li>2. 審查意見回覆情形未附報告。</li> <li>3. 建議可以選擇就整治中的場址進行驗證可行性。</li> <li>4. 期末報告建議將論文期刊文件附冊。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員對本計劃的認可。</li> <li>2. 因期中報告初稿未要求附上，本次修訂稿將附上審查意見回覆表，感謝委員提醒。</li> <li>3. 感謝委員的建議，本計劃將盡量選擇整治中的場址進行本量測技術之驗證。</li> <li>4. 期末報告提交前若完成論文期刊文件撰寫會將其附冊，感謝委員提醒。</li> </ol>
<p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 土壤污染場址若為運作中工廠，現地介電頻譜量測技術是否可以克服管線地形等障礙影響?現地執行干擾因素，建議應優先納入後續實驗設計考量，以提高未來應用可行性。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員的建議，本計劃中寬頻介電量測技術為採用貫入式感測器進行介電頻譜量測，目前預期受到之主要干擾來自環境中之電流雜訊。若在運作中工廠進行施測，有顯著管線地形等障礙時可搭配透地雷達 (Ground penetrating radar) 尋找潛在地下管線，圈畫出可施測之範圍。</li> </ol>
<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫旨在建立直接貫入實驗時，地下系統中污染物之電學特性，以協助建立研判地質與污染物分布情形。計畫中已完成包括反射訊號分析之理論、數值模擬、實驗室實驗驗證8種材料、LNAPL及DNAPL等特性，工作內容符合計畫要求。</li> <li>2. 本計畫建立之特性資料，預期可以提供相關測試之基礎數據，並可以提供進一步技術發展之參考。</li> <li>3. 目前所有測試資料均在非常單純之系統中測試，後續若有機會，建議能測試較接近實際系統，如砂箱或是污染場址測試，以驗證技術實用性。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1-2 感謝委員對本計畫之認可。</li> <li>3. 感謝委員的建議，本計畫現階段主要現完成方法論的建立，後續再以砂箱、現地污染場址進行測試，以進一步驗證本計劃所提出之量測技術。</li> </ol>

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告  
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	106 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 預防 <input checked="" type="checkbox"/> 其他	主持人：林志平	NO：29
計畫名稱	土壤污染現地寬頻電性量測技術研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
<p>委員一：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>專案研究計畫執行現況、流程及方法已具體說明</li> <li>計畫後續執行工作項目及內容已於 p. 70 說明</li> <li>計畫執行進度與預定進度符合</li> <li>執行進度並未落後</li> <li>結案標準與原計畫相符</li> <li>研究內容與原計畫目的相符</li> <li>根據研究內容所提出之討論與建議合理，整體研究成果符合預期</li> <li>學術產出及活動、人才培育等是符合預期</li> <li>成果研發獲得專利、技術轉移：未說明</li> <li>本計畫的研究成果具應用潛力</li> <li>已有現地試驗，其結果與預期結果之間的差異建議討論</li> <li>對實際污染調查技術與應用條件(或適用條件)(5.4.3節)建議說明</li> <li>圖67的意義(與解讀)建議更具體說明</li> </ol>		<ol style="list-style-type: none"> <li>感謝委員對本計畫之認可。</li> <li>本計劃之研究成果目前未申請專利與技術轉移。</li> <li>感謝委員對本計劃研究成果之認可。</li> <li>感謝委員指教，已在5.4.3節中補充現地試驗預期成果討論、適用條件說明以及針對圖67之說明。</li> </ol>	

委員審查意見	計畫單位回覆
<p>委員二：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>計畫執行工作項目及內容說明完整。</li> <li>計畫進度達成原訂目標。</li> <li>自評表計畫成果預定發表國內研討會及投稿國外期刊，請於定稿本備註欄說明發表處，名稱等。</li> <li>自評表期末達成率請填寫。</li> <li>計畫成果開發技術完成後，請於備註欄說明。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1-2. 感謝委員對本計畫之認可。</li> <li>3-4. 感謝委員提醒，已針對自評表中該二項目更新投稿詳情、並更新期末達成率。</li> <li>5. 感謝委員提醒，已在6-1中『已開發技術』補充說明。</li> </ol>
<p>委員三：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>本計畫旨在建立有機汙染場址之電學特性，已初步建立包括LNAPL及DNAPL等電學特性，並於汽油汙染場址初步測試，成果可作為後續研究發展使用。</li> <li>在真實場址中所測得之資訊，已找出其特徵訊號；可否與污染物分布做進一步資料比較及解析？</li> <li>後續建議可朝不同土壤類型場址中油品及DNAPL定量或半定量、以及空間解析發展。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員對本計劃研究成果之認可。</li> <li>2. 感謝委員指教，TDR介電頻譜量測之施測點為整治廠商劃定之污染範圍，經採樣測得該污染場址之TPH污染濃度約為3000~5000 mg/kg。實際污染物分布需額外之地球物理方法劃定，該場址仍處整治階段，相關施測結果屬商業財產權暫時無法取得。</li> <li>3. 感謝委員指教，將列入後續研究內容與方向。</li> </ol>
<p>委員四：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>自評表請補填結案達成率，並建議移至首頁後。</li> <li>同意修正後結案。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員提醒，已更新結案達成率，並根據規定裝訂順序編排。</li> <li>2. 感謝委員對本計劃之認可。</li> </ol>



# 專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別		<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗	
研究主題		<input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 預防 <input checked="" type="checkbox"/> 其他					
申請機構系所		國立交通大學防災與水環境研究中心					
機構地址		新竹市大學路 1001 號					
計畫主持人		林志平		職等／職稱		教授	
協同主持人		林俊宏		職等／職稱		約聘助理研究員	
協同主持人		劉興昌		職等／職稱		約聘助理研究員	
專案名稱	中文	土壤汙染現地寬頻電性量測技術研發					
	英文	Development of in-situ measurement system for Broadband Electrical Properties of Contaminated soils					
	關鍵字	Contaminated soils, Broadband Electrical Properties, In-situ measurement system					
執行期程		自民國 106 年 1 月 9 日起 至民國 106 年 11 月 30 日止					
計畫主持人		姓名：林志平		Email：cplin@mail.nctu.edu.tw		專線：03-5131574 手機：0922747731	
專任助理		姓名：陳軍韜		Email：Ctcmm001@yahoo.com.tw		專線： 手機：0956-854976	
經費分析總表	專案預估經費		金額		編列說明		
	1.	人事費用		315,102	(1-5 項相加之 50% 為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費		0	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用		295,000	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用		0	(差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用		26,262	(1-6 項相加之 5% 為限)		
	6.	行政管理費		63,636	(1-5 項相加之 10% 為限)		
專案計畫申請總金額			700,000	校長張世中			

專案主持人(簽名及蓋章):

林志平



日期: 106-1-16



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會  
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

**106 年度專案成果績效自評表**

一、專案基本資料

填表日期：106 年 12 月 01 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 其他		
申請機構系所	國立交通大學防災與水環境研究中心	計畫主持人	林志平
專案名稱	土壤汙染現地寬頻電性量測技術研發		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

項目		目標達成程度	申請 預估 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或學術產出發表日期、發表處、發表名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1. 國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	1	100%	發表處：The 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 發表名稱：Complex dielectric spectroscopy of soil using multiple reflection analysis on TDR signal 投稿日期：2017 年 11 月 29 日
	2. 國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100%	發表處：IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 發表名稱：Multiple Reflection Analysis of TDR Signal for Complex Dielectric Spectroscopy 投稿日期：2017 年 11 月 24 日
		(2)研討會論文	0	0	0		
	3. 報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	0	0	0		
	4. 專著 (本數)		0	0	0		
	5. 辦理學術	(1)研討/說明會	0	0	0		

<div>目標達成程度</div> <div>項目</div>			申請 預估 數	期中 達成 數	期末 達成 數	結案 達成 率	備註 (說明未達成原因或學術產出發表日期、發表處、發表名稱、影響指數等)
	會議(場數)	(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	1	1	1	100%	現地土壤污染介電頻譜量測技術
		(2)技術平台	0	0	0		
B  人才 培育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	1	100%	
		(2)博士	0	0	1	100%	
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0		
		(2)跨機構團隊	0	0	0		
		(3)形成研究中心	0	0	0		
		(4)形成實驗室	0	0	0		
9.其他指標		(請自填)					

## (二) 產業面

目標達成程度 項目				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利(件數)	已核准	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
		申請中	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
B 研發技術轉移	2.先期技術成果移轉	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0		
	3.技術移轉(專利)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0		
	4.技術移轉(應用技術)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		

目標達成程度 項目			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
		衍生利益金(仟元)	0	0	0		
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)	0	0	0		
		(2)品種/系(件數)	0	0	0		
C 產 學 研 合 作	6.促成合作研 究	件數	0	0	0		
		金額(仟元)	0	0	0		
	7.促成投資	件數	0	0	0		
		投資金額 (仟元)	0	0	0		
	8.促成取得業 界科專	件數	0	0	0		
		業界投資金額 (仟元)	0	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

### (三) 政策面

目標達成程度 項目			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
		(3)規範	0	0	0		
		(4)標準	0	0	0		
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)		0	0	0		
	5.獲得獎項(件數)		0	0	0		
	6.提升能源效率(%)		0	0	0		
	7.節能減碳效率(%)		0	0	0		
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

不同污染物在動態電磁場下有其不同的極化反應，並反映在其複介電頻譜上，透過對不同污染物之複介電頻譜特性的掌握將可有利於現場快速初步檢測污染物，為實現此目標，建立不同污染物之複介電頻譜特性以及發展現場量測技術極為重要。本研究提出創新的時域反射技術多重反射訊號分析 (TDR RRA/MRA) 方法，經室內試驗與現地試驗驗證可獲得 10MHz - 1GHz 寬頻的全電學性質（複介電度實部與虛部），對材料電學性質量測有很大突破。該量測系統具備容易組裝、標定及操作的特性，有助於探討各種污染物及不同土壤組成與含水量的電學特性，據以作為電學探測結果解讀與量化分析的依據。RRA 在特定情況之量測可靠度較不佳，後續可加裝人工阻抗模組以產生一訊號穩定且無頻散現象之穩定  $R_1$ ，並可延伸至與 CPT、MIP 貫入試驗結合，可應用於現地調查及監測。長期而言，現地污染探測需更完善寬頻電學量測技術，結合基於中高頻波傳方法與低頻電路方法，研發適合實驗室與現地試驗之試體感測器及現地貫入式探測器以達到此目標。

## 摘要

近年來環境地球物理探測在土壤污染的快速探測與評估中獲得越來越廣泛的應用，常見土壤污染物改變土壤孔隙水特性，甚而形成額外獨立相，即所謂的非水相液體 (Non-Aqueous Phase Liquid)。因土壤電學特性改變而影響電流或電磁波在污染區域內傳輸產生異常，為地球物理探測的電學方法應用提供了探測前提。由於污染土壤為三相或四相的複和材料，其電學性質與土壤含水量、孔隙率、污染含量之關係相當複雜，有必要在相當寬的頻率範圍內來探討污染土壤的電學性質。本研究提出創新的時域反射技術多重反射訊號分析 (TDR RRA)方法，經室內試驗與現地試驗驗證可獲得 10MHz–1GHz 寬頻的全電學性質（複介電度實部與虛部），對材料電學性質量測有很大突破。該量測系統具備容易組裝、標定及操作的特性，有助於探討各種污染物及不同土壤組成與含水量的電學特性，據以作為電學探測結果解讀與量化分析的依據。RRA 在特定情況之量測可靠度較不佳，後續可加裝人工阻抗模組以產生一訊號穩定且無頻散現象之穩定 $R_1$ ，並可延伸至與 CPT 貫入試驗結合，可應用於現地調查及監測。長期而言，現地污染探測需更完善寬頻電學量測技術，結合基於中高頻波傳方法與低頻電路方法，研發適合實驗室與現地試驗之試體感測器及現地貫入式探測器以達到此目標。





## Abstract

Recent implementation of environmental geophysical exploration technique in rapid detection and evaluation of soil contamination is widely involved. Typical soil contaminants tend to alter the pore fluid properties and some even form an individual phase, namely non-aqueous phase liquid (NAPL). Due to the variation of soil electrical properties, the transmission path of electrical currents or electromagnetic waves may be affected within the contaminated region, which in turn provided the detection basis of the electrical and electromagnetism methods in geophysical exploration methods. As contaminated soils consisted of composite materials of three or four phases, the relationship between their electrical properties and their water content, porosity, contaminant concentration are relatively complex. The demand for a wide electrical spectral range has hence arisen for contaminated soil detection. This study proposed an innovative Time-domain reflectometry (TDR) Remaining Reflection Analysis (RRA) method, in order to measure a broadband complex dielectric spectrum (including both real and imaginary parts of complex dielectric permittivity, CDP) within 10MHz – 1GHz frequency range and to perform a more complete electrical characterization of contaminated soil. The robustness, in-situ applicability, and performance of the proposed RRA method is verified using series of laboratorial and in-situ experiments, involving various contaminants. The measurement system of RRA can be setup, calibrated and operated easily, which assisted in investigating the electrical characteristics of various contaminants and soil composition. This provided useful insights into the interpretation of in-situ electrical exploration data results. However, RRA encountered some limitations in materials of highly dispersive or low dielectric permittivity. This limitation may be resolved by adding an impedance block prior to the sensing section and provide a steady, non-dispersive  $R_1$ . The TDR RRA sensing probe can even be adapted to CPT probe for field investigation and monitoring. In the long run, a more comprehensive broadband electrical measurement technique, which involves wave based and circuit based methods, is required for the ultimate goal of in-situ soil contamination exploration. Specimen probes and in-situ penetrating probes can also be designed and integrated with the aforementioned technique for laboratorial and in-situ experiments.



# 目錄

目錄 .....	I
圖目錄 .....	III
表目錄 .....	VI
第一章 前言 .....	1
第二章 研究目的 .....	4
第三章 文獻探討 .....	5
3.1. 時域反射介電頻譜量測系統 .....	5
3.2. 既有之現地介電頻譜量測技術 .....	11
3.3. 有機汙染物及非污染土壤介電頻譜與土壤物理性質 .....	14
第四章 研究方法與過程 .....	16
4.1. 研究流程 .....	16
4.2. 工作進度甘特圖 .....	17
第五章 結果與討論 .....	18
5.1. TDR 多重反射訊號分析 (RRA) 理論架構 .....	18
5.1.1. 多重反射 (Multiple reflections) .....	18
5.1.2. 多重反射訊號分析 (RRA) .....	20
5.1.3. 訊號處理方法 .....	23
5.2. 數值模擬探討 .....	26
5.2.1. 最佳化函數與初始值給定 .....	28
5.2.2. RRA 1 數值模擬驗證 .....	30

5.2.3. RRA 2 數值模擬驗證 .....	35
5.3. 室內試驗驗證 .....	40
5.3.1. 室內試驗量測系統配置 .....	40
5.3.2. 八種待測材料 .....	42
5.3.3. 有機污染物 - 輕非水相液體 LNAPL .....	53
5.3.4. 有機污染物 - 重非水相液體 DNAPL .....	55
5.3.5. 室內土壤試驗量測系統配置 .....	58
5.3.6. 污染與非污染土壤 .....	60
5.4. 現地介電頻譜量測試驗 .....	64
5.4.1. 現地介電頻譜量測系統配置 .....	64
5.4.2. 未污染場址 .....	65
5.4.3. 有機污染物污染場址 .....	67
5.5. 結論與建議 .....	70
5.5.1. 結論 .....	70
5.5.2. 建議 .....	72
參考文獻 .....	73

## 圖目錄

圖 1 TDR 量測系統.....	5
圖 2 TDR 感測器形式(a) 同軸 (b) 多根導體桿 (c) 貫入式.....	6
圖 3 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method) .....	9
圖 4 將 TDR 量測系統分解為多段均勻傳輸線的疊加 .....	9
圖 5 TDR 在水中模擬波形與實測波形比較，虛線為未考慮纜線電阻的比較.....	10
圖 6 TDR 相位速度分析法 (PVA) 訊號處理: (a) TDR 時域訊號; (b) 微分(a)後之脈衝訊號; (c) 感測器頂端訊號 $R_1$ ; (d) 感測器末端訊號 $R_2$ (Lin et al., 2017) 。 .....	13
圖 7 PVA 應用於 TDR 模擬波形量測之視介電頻譜(Lin et al., 2017) 。 .....	13
圖 8 研究流程圖.....	16
圖 9 工作進度甘特圖 .....	17
圖 10 TDR 反射訊號之射線追蹤軌跡圖 .....	20
圖 11 RRA (a) 方法 1 (b) 方法 2.....	22
圖 12 RRA 訊號處理示意圖 (以清水為例): (a) TDR 階躍式波形 (b)微分(a)後之脈衝訊號; (c) 截取之 $R_{remaining}$ ; (d) 截取之 $R_1$ 。 .....	25
圖 13 表 1 中待測材料之 TDR 模擬訊號。(a)低頻散材料 (b)高頻散材料 (醇類) (c) (b)中訊號放大示意圖.....	27
圖 14 理論 RRA 頻譜比之目標函數結構 (a) RRA 1, 10 MHz (b) RRA1, 1GHz (c) RRA2, 10MHz (d) RRA2, 1GHz 。 .....	29
圖 15 RRA1 於蒸餾水之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部 。 .....	31
圖 16 RRA1 於自來水之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部 。 .....	31
圖 17 RRA1 於丙酮之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部 。 .....	32
圖 18 RRA1 於空氣之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部 。 .....	32
圖 19 RRA1 於甲醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部 。 .....	33
圖 20 RRA1 於乙醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部;	

(d) RRA1 頻譜比之虛部。	33
圖 21 RRA1 於異丙醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	34
圖 22 RRA1 於正丁醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	34
圖 23 RRA2 於蒸餾水之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	36
圖 24 RRA2 於自來水之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	36
圖 25 RRA2 於丙酮之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	37
圖 26 RRA2 於空氣之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	37
圖 27 RRA2 於甲醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	38
圖 28 RRA2 於乙醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	38
圖 29 RRA2 於異丙醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	39
圖 30 RRA2 於正丁醇之模擬訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	39
圖 31 (a) TDR 阻抗匹配同軸感測器 (b) A-A' 斷面示意圖	40
圖 32 (a) 室內試驗量測系統配置 (b) 同軸感測器置入待測材料中	41
圖 33 表 1 中待測材料之 TDR 實驗訊號。(a) 低頻散材料 (b) 高頻散材料	42
圖 34 RRA1 於蒸餾水之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	44
圖 35 RRA1 於自來水之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	44
圖 36 RRA1 於丙酮之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	45
圖 37 RRA1 於空氣之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	45

圖 38 RRA1 於甲醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	46
圖 39 RRA1 於乙醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	46
圖 40 RRA1 於異丙醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	47
圖 41 RRA1 於正丁醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。	47
圖 42 RRA2 於蒸餾水之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	49
圖 43 RRA2 於自來水之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	49
圖 44 RRA2 於丙酮之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	50
圖 45 RRA2 於空氣之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	50
圖 46 RRA2 於甲醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	51
圖 47 RRA2 於乙醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	51
圖 48 RRA2 於異丙醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	52
圖 49 RRA2 於正丁醇之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。	52
圖 50 LNAPL 之 TDR 實驗訊號。	53
圖 51 RRA2 於 LNAPL 之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部。	54
圖 52 DNAPL – TCE 之 TDR 實驗訊號。	56
圖 53 RRA2 於高濃度 TCE 溶液之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部。	56
圖 54 DNAPL – PCE 之 TDR 實驗訊號。	57
圖 55 RRA2 於高濃度 PCE 溶液之實驗訊號: (a) $\varepsilon * f$ 實部; (b) $\varepsilon * f$ 虛部。	57
圖 56 (a) TDR 土壤同軸感測器 (b) B-B' 斷面示意圖	58

圖 57 室內土壤試驗量測系統配置 (a)土壤同軸感測器量測示意圖 (b)在備妥之土壤試體中插入內導體準備量測 .....	59
圖 58 污染與非污染土壤之 TDR 實驗訊號:(a)完全乾燥細砂; (b)非飽和細砂; (c)飽和細砂。 .....	62
圖 59 完全乾燥細砂 (污染與非污染): (a) $\epsilon * f$ 實部; (b) $\epsilon * f$ 虛部; (c) MRA1 頻譜比。 .....	62
圖 60 非飽和細砂 (污染與非污染): (a) $\epsilon * f$ 實部; (b) $\epsilon * f$ 虛部; (c) MRA1 頻譜比。 .....	63
圖 61 飽和細砂 (污染與非污染): (a) $\epsilon * f$ 實部; (b) $\epsilon * f$ 虛部; (c) MRA1 頻譜比。 .....	63
圖 62 現地土壤同軸感測器: (a) 以夾具固定不銹鋼釘位置 (b)敲入不銹鋼釘後確認位置水平(c) 土壤同軸感測器探頭置於不銹鋼釘進行量測。 .....	64
圖 63 未污染場址:(a)現場照片 (b)現地介電頻譜量測系統 .....	66
圖 64 未污染場址介電頻譜量測結果:(a)現場 TDR 訊號; (b) $\epsilon * f$ 實部; (c) $\epsilon * f$ 虛部。 .....	66
圖 65 有機污染物 (92 無鉛汽油) 污染場址:(a)現場照片 (b)現地介電頻譜量測系統 .....	68
圖 66 現地土壤量測示意圖: (a)鄰近非污染土壤之背景值; (b)污染土壤 1;(c) 污染土壤 2。 .....	69
圖 67 污染場址介電頻譜量測結果:(a)現場 TDR 訊號; (b) $\epsilon * f$ 實部; (c) $\epsilon * f$ 虛部。 ....	69

## 表目錄

表 1 RRA 中待測材料之 Cole-cole 函數 .....	27
表 2 污染與非污染土壤之物理參數 .....	60



## 第一章 前言

環境工址調查的主要目的在於鑑定土壤與地下水污染在地下的深度與範圍，並取得評估與預測污染傳輸與長期演化所需要的地層特性。傳統直接的手段需要取得代表性的土樣或地下水樣，進行相關的化學或生物實驗室試驗，以確定目標污染物是否超過標準，在缺乏污染物可能分佈範圍的預先資訊，取樣試驗往往為極反覆與耗時的程序。近年來環境地球物理探測在土壤污染的快速探測與評估中獲得越來越廣泛的應用，可以為地下污染物的定位和空間分佈提供科學的探測手段 (ASTM D 5730, 2011)，包括表面非破壞性的探測技術及孔內地球物理方法，其中以電學方法最為相關，常用的環境地物探測方法包括透地雷達 (Ground Penetration Radar) (e.g. Sneddon et al. 2000; Carcione et al. 2003)、電磁感應法 (Electromagnetic Induction)、地電阻影像探測 (Electrical Resistivity Tomography) (e.g. Benson and Stubben 1995; Cassidy et al. 2001)、激發極化法 (Induced Polarization) 等 (e.g. Sogade et al. 2006; Snieder et al. 2007)。此外，大地工址調查中的直接貫入現地試驗方法 (Direct Push Method)，近幾年在加入地物量測感應功能後，已成為輕度破壞性、經濟、快速的輔助調查與監測方法，其中最為常見的為電子錐貫入試驗 (Resistivity Cone Penetrometer Testing, RCPT) (Campanella and Weemees, 1990)。

土壤為多相孔隙介質，包括顆粒固相、孔隙液相及非飽和土的氣相，其整體電學性質 (包括複介電常數與導電度) 主要受到液相的含量與電性性質所影響。常見的土壤污染物有重金屬、垃圾掩埋滲出水及石化物，這些污染物改變土壤孔隙水的特性，進而影響土壤整體的電學性質 (Ajo-Franklin et al., 2006; Moroizumi and Sasaki, 2008; Son et al., 2009)，其中有機污染物甚而形成額外的獨立相，即所謂的非水相液體 (Non-Aqueous Phase Liquid)。污染物改變土壤的電學特性，進而影響電流或電磁波在污染區域內傳輸產生異常，為地球物理探測的電學方法應用提供了探測前提。因此，有必要對於污染土壤的電學特性與污染成分的關係進行探討，以增進對電流或電磁波信號測定污染土壤技術的認識與研究。本研究的目的是在於發展一寬頻的電學特性量測系統，提供寬頻的複介電度 (Complex Dielectric Permittivity) 及導電度的完整電學性質。該量測系統需具備容易組裝、標定及操作的特性，有助於探討各種污染物及不同土壤組成與含水量的電學特性，據以作為電學探測結果解讀與量化分析的依據；並可延伸至與 CPT 灌入試驗結合，達到可應用於現地調查及監測的目的。

在不考慮土壤中含有磁性成分的前提下，一般可假設土壤之電磁性質由電學性質所控制，材料之基本電學性質包括介電度（Dielectric Permittivity,  $\epsilon_r$ ）與導電度（Conductivity,  $\sigma_{dc}$ ）。其中，介電度為頻率之函數，在不同頻率之電場下，材料因不同介電極化作用（Dielectric Polarization）呈現不同之介電度。在頻率域，介電度可以表示為複數，實部（ $\epsilon'_r$ ）表示外部電場能量在材料中之儲存，虛部（ $\epsilon''_r$ ）表示介電極化之能量消散。電磁波波動方程式在頻率域之解析中，介電度與導電度兩項材料性質可合併為等值介電度（ $\epsilon_r^*$ ）如下式所示

$$\epsilon_r^*(f) = \epsilon'_r(f) + j\epsilon''_r(f) = \epsilon'_r(f) - j\left(\epsilon''_r(f) + \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_0}\right) \quad (1)$$

其中  $f$  為頻率， $\epsilon_0$  為真空之介電常數（相當於  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m 於 MKS 系統）。因此，介電度與導電度可整合以複介電度（ $\epsilon^*$ ）表示。導電度的量測相較於複數介電度容易，在實驗室或現地的探針量測，可採用直流電阻法，在現地的二維或三維分佈量測，有地電阻影像探測法（Electrical Resistivity Tomography），皆為基於直流電場理論之量測方法。由於複介電度更為完整，包含更多土壤資訊，因此本研究直接以複介電度之探討為主。目前國內外對污染土壤的介電特性已進行了大量研究，包括污染土壤複介電度量測技術及複介電度與污染成分的關係模型兩方面，劉豪睿等（2010）針對這兩方面進行了完整的文獻回顧。

複介電度量測技術方面可分為實驗室量測技術與現地量測技術，實驗室進行不同污染成分，不同含水率的複介電度量測，是瞭解污染土壤介電特性不可或缺的手段。複數介電常數的實驗室測量方法主要採用固定頻率的頻率域量測法，較適合土壤試體的量測方法有電橋法（Lee et al. 2003）、終端開路同軸線法（Rowe et al. 2001; Francisca and Rinaldi 2003; Amegashie et al. 2006; Saltasa et al. 2007）和傳輸線法（陳彥等 2008）。Lee et al. (2003)，使用阻抗分析儀，利用電橋法通過測量電容和電阻來分析污染土壤的複介電度，所使用的污染物包括重金屬，垃圾填埋場滲出液以及 BTEX，研究結果指出當採用介電度來研究地表下污染物的情況時，只用特定某種頻率的測量可能對污染物研究造成不準確的資訊，因此，必須在相當寬的頻率範圍內來探討介電度的頻散特性（Dielectric Dispersion）。上述實驗室量測技術可提供介電頻譜，文獻中針對某些污染物質，在某些土壤種類、土壤含水量及土壤密度的條件下，進行污染土壤電學特性的探討，但量測儀器複雜或試體準備不易，且不易延伸拓展為現地量測之技術，特別是可結合圓錐貫入試驗的感測器。

在現地淺層（數十公尺以內）量測介電度的方法主要有透地雷達（Ground Penetration Radar, GPR）（Solimene et al. 2008）及電磁波時域反射法（Time

Domain Reflectometry, TDR)。不同的介質內部有不同的電磁波傳播特性，電磁波會出現反射、透射或折射現象，GPR 正是利用上述特點進行工作，脈衝反射波的波形是透地雷達方法的主要記錄形式，具體工作時通過建立電磁波在地下介質中的正算模型，來研究電磁波在土壤淺層中的傳播規律，然後通過反演演算法對土壤特性進行獲取，在這個過程中，建立合理的正演模型和選擇恰當的反演演算法是探測研究的重點。由於現場情況複雜，透地雷達的定量分析仍有其困難，此外，現有的使用透地雷達探測工作中，由於雷達工作頻率基本是在 100 MHz、200 MHz、400 MHz、900 MHz 等有限的幾個頻點，不能在相當寬的頻率範圍內進行測量，只能從土壤的介電特性中進行定性的分析。TDR 的基本原理與 GPR 雷同，但以纜線及導波器(探針)進行探測，且一般發射的脈衝為寬頻的方波，又稱為纜線雷達 (cable radar)。一般 TDR 探針只有 30 公分，僅能量測表層土壤之介電度，且因為現地配線與接頭等組抗不連續面造成系統率定困難，因此以時域分析的方法為主，由分析電磁波在感測器段的視走時 (Apparent Travel Time) 決定視介電度 (Apparent Dielectric Constant)，其有效頻率因系統配置及土壤種類與含水量不同而異，一般而言在數百 MHz，視介電度與未受污染土壤的體積含水量有高度相關性，廣泛應用於現地土壤含水量量測 (Topp et al. 1980)。TDR 導波器若採複合式設計，將金屬導體透過絕緣材構成圓柱體，形成可量測不同深度的 TDR 貫入器 (Vaz and Hopmans 2001; Persson and Wraith 2002)，亦有可與 CPT 結合的 TDR 感測器 (Lin et al. 2006a; 2006b)。雖然 TDR 具有一定的頻寬，但現地感測器的訊號分析侷限於時域的視介電度，尚無法提供寬頻的介電特性。

綜合上述，污染土壤的電學性質為污染調查極為重要的資訊，它提供了地球物理探測技術資料判釋的基準，且可以結合直接貫入試驗，作為現地調查與監測的利器。由於污染土壤為複雜的三相或四相複合材料，其電學性質除了污染物的種類與含量，亦受到土壤種類、含水量、孔隙率等因素所影響，行為相當複雜，有必要透過寬頻的量測，提供更完整的資訊。但現有的寬頻介電特性實驗室量測技術，量測儀器複雜，試體準備不易，不適合例行性的試驗，且不易延伸拓展為現地量測之技術。

## 第二章 研究目的

本研究之目的在基於適用於現地量測的時域反射技術，發展一寬頻的電學特性量測系統，提供寬頻的複介電度（complex dielectric permittivity, CDP）及導電度的完整電學性質。該量測系統需具備容易組裝、標定及操作的特性，有助於探討各種污染物及不同土壤組成與含水量的電學特性，據以作為電學探測結果解讀與量化分析的依據；並可延伸至與 CPT 貫入試驗結合，達到可應用於現地調查及監測的目的。

### 第三章 文獻探討

#### 3.1. 時域反射介電頻譜量測系統

時域反射儀 (Time domain reflectometer) 主要由階躍脈衝電壓產生器 (step generator)、訊號採樣器 (sampler) 與示波器 (oscilloscope) 組成，TDR 之基本原理與雷達相同，由方波製波器 (step generator) 發射一電壓脈衝進入同軸電纜 (coaxial cable) 及感測導波器 (measurement waveguide)，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗 (impedance) 不連續所造成之反射，如圖 1 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線 (同軸纜線) 與感測導波器，導波器由兩組 (反相) 導體形成，為同軸纜線之延伸，同時作為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知環境變化參數。TDR 感測器為將電磁波從同軸纜線延伸導入待測介質的導波器，量測土壤的不同型態導波器如圖 2 所示，本研究首先採用以試體模具形成同軸式導波器，發展容易試體準備及適合土壤試體之量測導波器，以及簡易的介電頻譜 (不同頻率之複介電度) 量測方法。

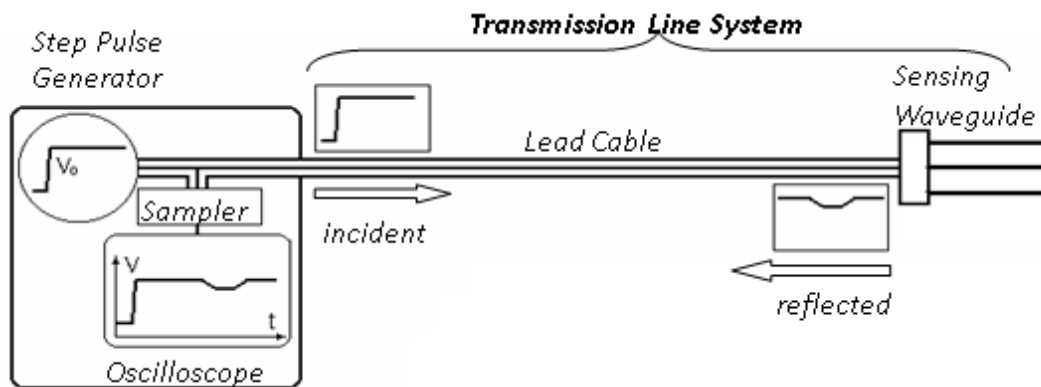


圖 1 TDR 量測系統

利用不同感測器設計與分析方法，TDR 技術可量測不同物理量，依其分析原理可分為：

界面型式：利用定位 TDR 反射訊號量測例如水位監測(空氣與水界面) (Dowding, et al., 1996)、位移監測 (Lin and Tang, 2005)、沖刷監測 (Yankielun and Zabilansky, 1999)。

變形型式：已知傳輸線組抗由纜線斷面幾何控制，若將纜線埋設於邊坡岩石或土體中，利用傳輸線變形與否監測岩石或土體邊坡位移(Dowding, 1988; Lin et al., 2009)。

介電分析型式：介電度即電磁波波速與光速比值之平方，將待測材料置入幾何固定的感測器內，利用反射訊號走時分析推估與含水量、乾密度相關的視介電度(Lin et al., 2000)；或利用反射波形穩態值計算材料導電度(electrical conductivity, EC) (Robinson et al. 2003; Lin, 2003; Lin et al., 2007)。

在介電分析型式之應用上，用於與量測土壤接觸之 TDR 感測器基本有三種常見類型：同軸式(coaxial)、多棒式(multiple rod)以及貫入式(penetrometer)，不同型式的感測器在空間上有不同的電磁分佈，因而有不同的感測範圍。同軸式感測器如圖 2a 所示，中間的電極棒被外圍環狀的金屬環所圍繞，其感應區域侷限於內外導體之間；多棒式的感測器如圖 2b 所示，中間的電極棒被外圍均勻分佈的電極棒圍繞，其感應區域大部份在內外電極棒之間，但對於電極棒所包圍區域外的土壤亦具有感應能力；而貫入式之感測器如圖 2c 所示，其僅採用兩支電極棒，中間以非導體填充絕緣，其電磁波向兩側逸散，兩極之電磁波波場並不形成封閉的空間範圍。不同的感測器類型因上述之不同電磁波波場分佈特性以及其幾何形狀差異之而有其不同的適用情形，一般而言，同軸式感測器較常見用於室內試驗，而多棒式以及貫入式較常見用於現地試驗之用。

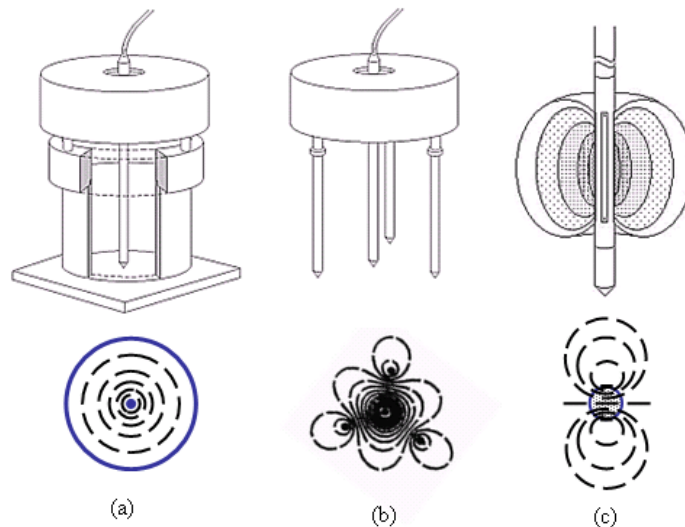


圖 2 TDR 感測器形式(a) 同軸 (b) 多根導體桿 (c) 貫入式

要量測 TDR 導波器介質之介電頻譜，首先必須掌握 TDR 波傳模式，TDR 波傳模擬可採用波譜法 (spectral method)，如圖 3 所示，詳細的計算方法參考 Lin and Tang (2007)。TDR 傳輸線之波傳系統函數可以圖 3 所示之電路模型推導得到，傳輸線波動控制方程式通解中的主要參數為傳遞常數 (propagation constant  $\gamma$ ) 與特徵阻抗 (characteristic impedance,  $Z_c$ )，傳遞常數控制波傳的速度與衰減，特徵阻抗控制阻抗不連續面的反射量。在頻率域 ( $f$ )，傳遞常數 ( $\gamma$ ) 與特徵阻抗 ( $Z_c$ ) 經推導為 (Lin and Tang 2007)

$$\gamma = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_r^*} * A \quad (2)$$

$$Z_c = Z_p / \sqrt{\epsilon_r^*} * A \quad (3)$$

$$A = \sqrt{1 + (1-j) \left( \frac{\eta_0}{Z_p} \right) \frac{\alpha_R}{\sqrt{f}}} \quad (4)$$

其中  $c$  是光速， $\epsilon_r^*$  是複介電度 (complex dielectric permittivity)，如公式(1)， $Z_p$  是幾何特徵阻抗(真空的特徵阻抗)， $A$  是考慮纜線電阻之修正因子， $j$  是  $\sqrt{-1}$ ， $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 120\pi$  ( $\mu_0$  為真空的磁導率)， $\alpha_R$  ( $\text{sec}^{-0.5}$ ) 是電阻衰減因子 (為纜線的特性)。TDR 量測系統之傳輸線至少包括延長線段及感應段，不同段之傳遞常數與特徵阻抗不同，可以多段模式模擬 (如圖 4)，每一段可以參數化為傳輸線幾何特性 ( $Z_p$ ) 介質電學性質 ( $\epsilon_r^*$ )、傳輸線電阻衰減因子 ( $\alpha_R$ ) 及段落長度 ( $L$ )，一旦各段落的這四個參數得知，即可完整模擬 TDR 訊號。波傳的模擬首先將不同段落的整體效應以起始端的輸入阻抗 (input impedance,  $Z_{in}$ ) 表示，起始端的輸入阻抗可由末端阻抗 ( $Z_L$ ) 及各段落之特徵阻抗以下式之遞回方式求得：

$$\begin{aligned} Z_{in}(z_n) &= Z_L \\ Z_{in}(z_{n-1}) &= Z_{c,n} \frac{Z_L + Z_{c,n} \tanh(\gamma_n l_n)}{Z_{c,n} + Z_L \tanh(\gamma_n l_n)} \\ Z_{in}(z_{n-2}) &= Z_{c,n-1} \frac{Z_{in}(z_{n-1}) + Z_{c,n-1} \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})}{Z_{c,n-1} + Z_{in}(z_{n-1}) \tanh(\gamma_{n-1} l_{n-1})} \\ &\vdots \\ Z_{in}(0) &= Z_{c,1} \frac{Z_{in}(z_1) + Z_{c,1} \tanh(\gamma_1 l_1)}{Z_{c,1} + Z_{in}(z_1) \tanh(\gamma_1 l_1)} \end{aligned} \quad (5)$$

其中下標  $i$  代表各段落。一般之 TDR 量測系統邊界條件為 ( $Z_L = \infty$ )，TDR 波形在頻率域之反應可由輸入阻抗與起始端之邊界條件推導得到 (Lin and Tang 2007)：

$$V(0) = \frac{Z_{in}(0)}{Z_{in}(0) + Z_S} V_S = H V_S \quad (6)$$

其中 $V(0)$ 是 TDR 波形的富立葉轉換， $V_s$  是 TDR 輸入方波的富立葉轉換， $Z_s$ 是源頭阻抗（source impedance），通常 TDR 儀器之  $Z_s = 50 \Omega$ ， $H = Z_{in}(0)/(Z_{in}(0) + Z_s)$  為系統函數。TDR 波形 $v(t)$ 之模擬可由 $V(0)$ 之富立葉反轉換得到。本研究以此模型標定傳輸線參數及反算介質電學性質，將量測到反射訊號之富立葉轉換（ $Y(f)$ ）除以脈衝產生器之入射訊號（ $X(f)$ ）可得 TDR 量測系統之實驗系統函數量測值，

$$H_m(\varepsilon_r^*, f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (7)$$

此量測值必須等於量測系統之理論系統函數（公式(6)之 $H$ ），由已知介電度之材料進行量測，利用此等式可進行傳輸線參數的標定，標定完成後，同樣利用此等式可進行介電頻譜的估計。圖 5 為系統經過標定後，由已知水的介電度所模擬之波形與實測波形比較，顯示模式的合理性。為了準確量測寬頻的介電度，必須要能夠準確的率定圖 4 所示之傳輸線參數。但除非類似文獻中的實驗室複介電度量測方法一樣，仔細的設計感測器，使其阻抗與延長纜線及接頭匹配，否則勢必會有許多不連續段，段數越多，所須率定的參數越多。而實務上，事先並不清楚在儀器端與感應端的接頭，應以多少不連續段表示方足夠，因此造成率定模式設定與反算收斂上的困難。



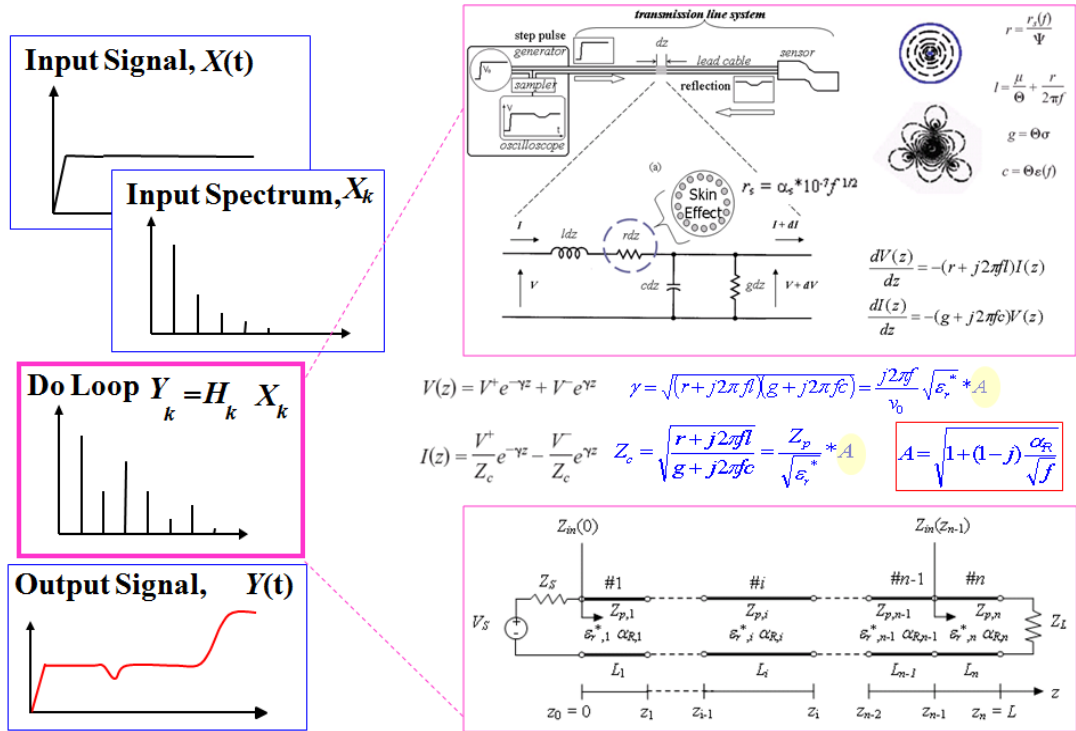


圖 3 TDR 波傳模擬波譜法 (Spectral method)

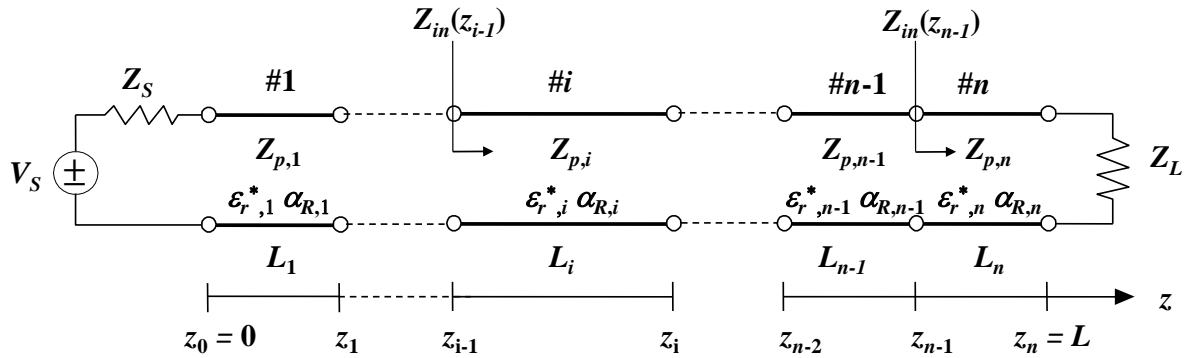


圖 4 將 TDR 量測系統分解為多段均勻傳輸線的疊加

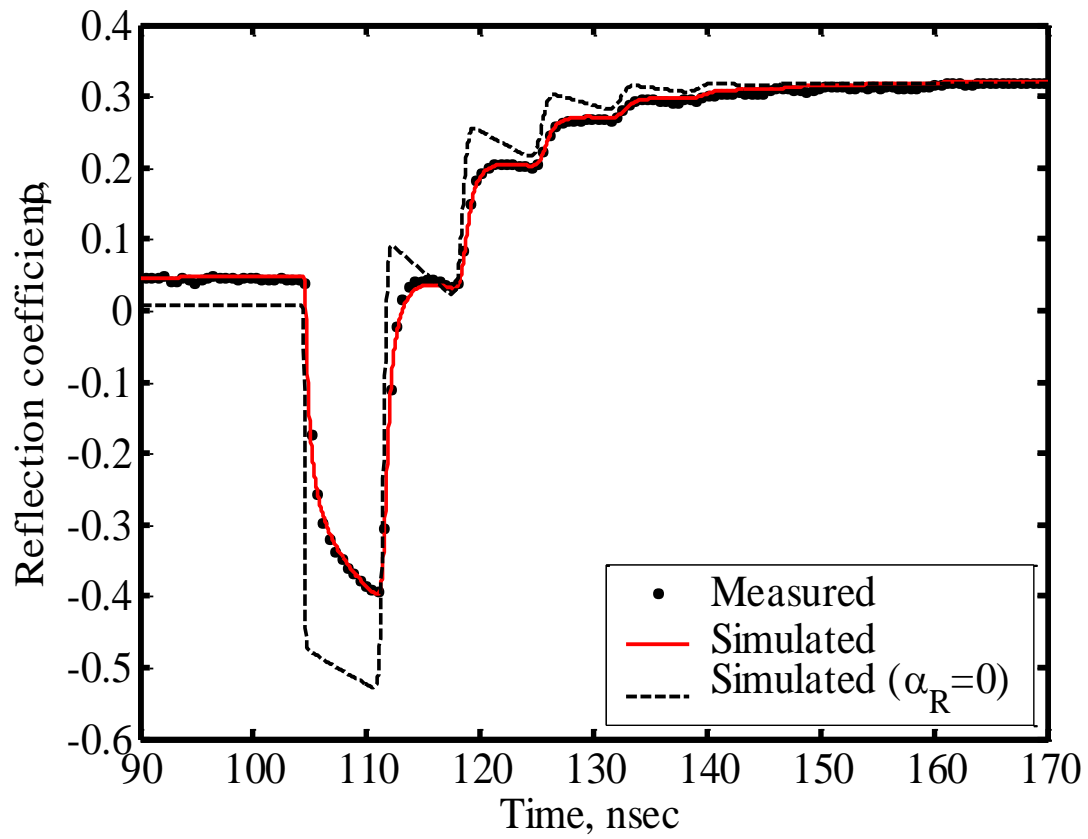


圖 5 TDR 在水中模擬波形與實測波形比較，虛線為未考慮纜線電阻的比較

### 3.2. 既有之現地介電頻譜量測技術

現有介電頻譜量測儀器為矢量網絡分析儀(vector network analyzer, VNA)，其量測過程耗時、繁雜、昂貴與需繁瑣之系統標定方能達到標的，於現地應用非常之困難。既有量測現地土壤介電度之傳統時域反射法 (TDR) 只採用簡易走時分析方法得到單一介電度數值，忽略了時域訊號中寶貴資訊而無法取得完整介電頻譜。為了準確量測寬頻的介電度，必須要能夠準確的率定圖 4 所示之傳輸線參數。但除非類似文獻中的實驗室複介電度量測方法一樣，仔細的設計感測器，使其阻抗與延長纜線及接頭匹配，否則勢必會有許多不連續段，段數越多，所須率定的參數越多。而實務上，事先並不清楚在儀器端與感應端的接頭，應以多少不連續段表示方足夠，因此造成率定模式設定與反算收斂上的困難。

Lin et al. (2017) 藉此契機提出相位速度分析法 (Phase velocity analysis, PVA)，利用 TDR 時域訊號進行訊號處理獲得介電頻譜，兼具快速、簡單、無需繁瑣系統標定之優點。PVA 方法只需利用局部時間域的波形資料（只需涵蓋感測器前後之前兩次反射訊號）及簡易快速傅立葉轉換之訊號處理，不必透過複雜之 TDR 傳輸線與全波形波傳理論，便可萃取出 10 MHz 至 1 GHz 之介電頻譜。其訊號處理方法為將所量測之 TDR 時間域波形進行微分(如圖 6b 所示)取得脈衝訊號(Impulse signal)，感測器頂端和末端分別採用 $t_{11}, t_{12}$ 間以及 $t_{21}, t_{22}$ 間時間段之訊號成為圖 6c、d 中兩組獨立訊號 $R_1$ 及 $R_2$ 。為了抵消負反射造成之 $\pi$ 相位角差，將 $R_1$ 訊號倒置處理，並將此二訊號進行快速傅立葉轉換且由二者相位角差 $\Delta\phi$ （即 $\angle(R_2/R_1)$ ），通過下式求得相位速度( $V_{PVA}$ )

$$V_{PVA} = \frac{4\pi f L}{\pi - \angle(R_2 / R_1)} = \frac{4\pi f L}{\angle(-R_1 / R_2)} \quad (8)$$

其中  $L$  為感測器長度， $f$  為頻率。代入各頻率之相位速度進入下式，即可求得視介電頻譜(apparent dielectric spectrum)

$$\varepsilon_a(f) = \left[ \frac{c}{V_{PVA}(f)} \right]^2 \quad (9)$$

其中  $c$  為光速。圖 7 為 PVA 分析法應用在模擬波形測得之視介電頻譜，可發現此方法能有效獲得 100MHz 至 1GHz 頻率段資料。對於部分具高頻散現象之材料（譬如酒精類），因介電耗損(dielectric loss)較高造成前述訊號截取時受到訊號斬截(signal truncation), 導致其有效頻率段或縮減至 500 MHz。Lin et al.

(2017) 發現無論何種材料，其有效頻率段下限 ( $f_{lower}$ ) 會受限於感測段長度和待測物質之相位速度，可由下式求得

$$\lambda_{workable} = 2 \times L_{probe} \quad (10)$$

$$f_{lower} = V_{PVA}(f)/\lambda_{workable} \quad (11)$$

其中  $\lambda_{workable}$  為有效波長， $L_{probe}$  為感測器長度。對於 17 公分長之感測器，其在清水中之有效頻率段下限約為 100 MHz。自來水(tap water)之視介電頻譜在 100 MHz 以前大幅偏離理論值，除了前述感測器長度影響外，其導電度造成相位角誤差  $\phi_p$  較其餘低導電度材料更為顯著，導致自來水之視介電頻譜低於有效頻率段時出現較大誤差。

由相位速度分析法求得之視介電頻譜，不但增加其物理意義，且可應用於寬頻介電頻譜的量測中作為高頻段的資料。對於現地介電頻譜量測提供一契機，以簡易 TDR 感測器搭配相位速度分析法即可獲得豐富之頻率域資料，無需複雜之系統標定即可獲得精確視介電頻譜。然而，視介電頻譜實際上結合了介電度之實部（介電度）與虛部（介電耗損）之綜合效應，在量測土壤污染之寬頻電學量測中缺少了二者獨立資訊，因此本研究研發新一代演算法，考慮 TDR 訊號中之多重反射所涵蓋之資訊，進行複介電頻譜（complex dielectric spectrum）之量測。

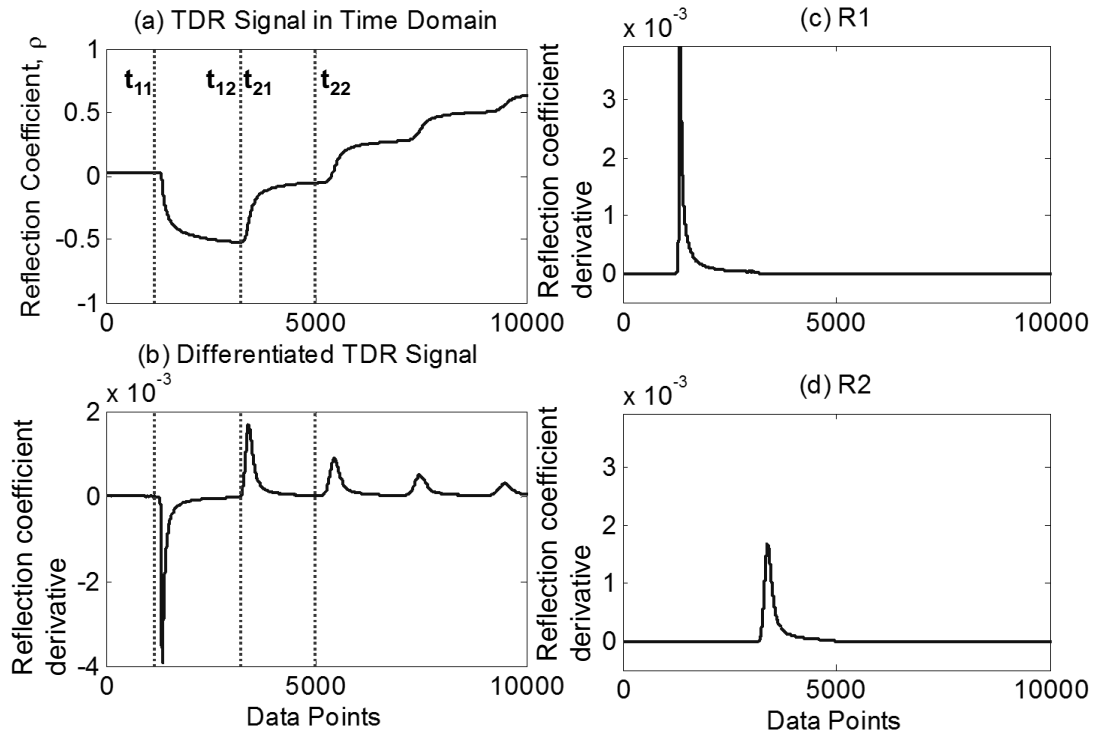


圖 6 TDR 相位速度分析法 (PVA) 訊號處理: (a) TDR 時域訊號; (b) 微分(a)後之脈衝訊號; (c) 感測器頂端訊號  $R_1$ ; (d) 感測器末端訊號  $R_2$  (Lin et al., 2017)。

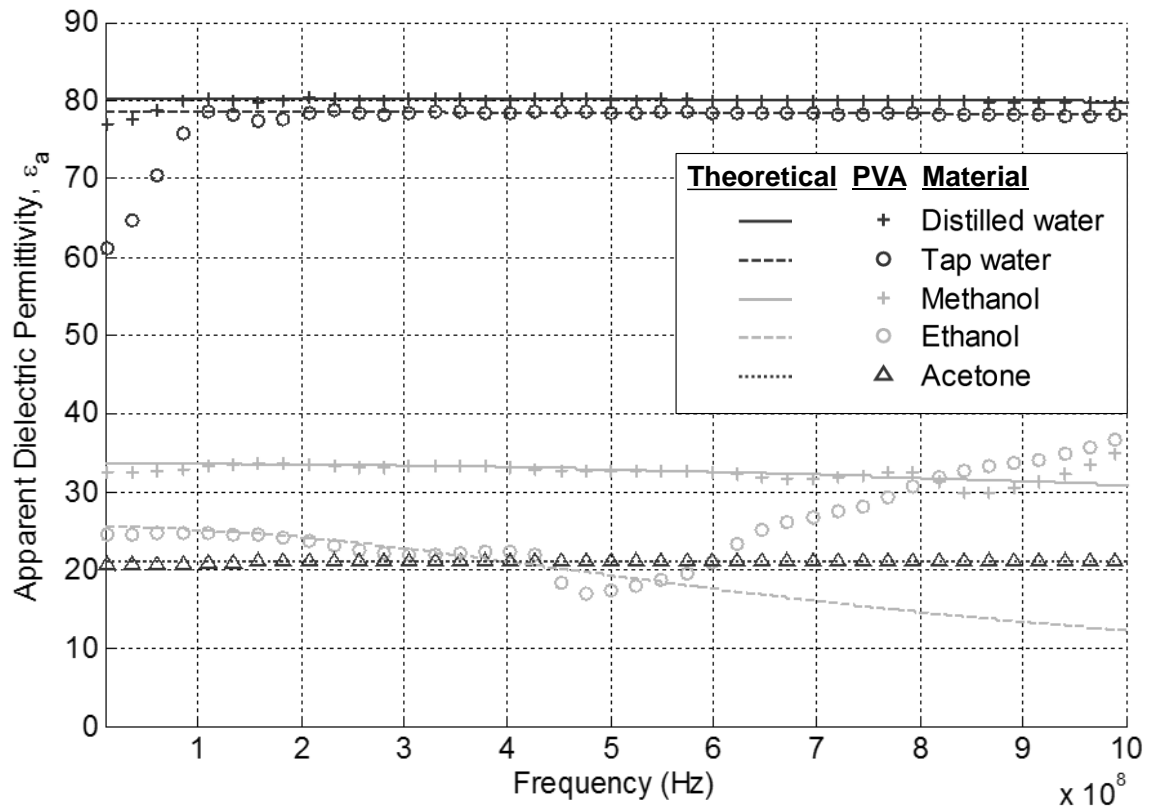


圖 7 PVA 應用於 TDR 模擬波形量測之視介電頻譜(Lin et al., 2017)。

### 3.3. 有機污染物及非污染土壤介電頻譜與土壤物理性質關係探討

在飽和的情況下，高頻介電度可以提供準確的含水率（與孔隙率），但在非飽和的情況下，則因為空氣相的存在，介電度仍可提供體積含水量，但如何同時量測土壤孔隙率，仍是一項極具挑戰性的工作。在探討污染土壤之電學特性之前，本研究擬透過寬頻電學性質量測再更完整的探討電學性質與土壤含水量、孔隙率及孔隙水導電度的關係，作為後續探討污染土壤的基準，並作為發展現地量測土壤含水量、孔隙率及孔隙水導電度技術的基礎。

Topp et al. (1980) 由時域反射儀 (Time Domain Reflectometry, TDR) 實驗結果提出土壤之視介電常數與土壤之體積含水量 (volumetric water content) 可以以三次式進行描述：

$$\theta = -5.3 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (12)$$

其中， $\theta$  為土壤體積含水量，表示每單位體積土壤中所含之水的體積； $K_a$  為視介電常數 (apparent dielectric constant)，可由 TDR 量測波形之走時分析獲得。在此式中，Topp et al.(1980) 並未考慮不同土壤所可能造成的差異，亦未考量乾密度差異所可能造成的誤差。Siddiqui and Drnevich (1995) 進一步考量土壤種類與乾密度所可能造成的影響，利用土壤乾密度 $\rho_d$ 將視介電常數進行正規化後，以其對土壤重量含水量 $w$ 之關係進行描述：

$$\frac{\sqrt{K_a \rho_w}}{\rho_d} = a + bw \quad (13)$$

其中， $a$ 以及 $b$ 為標定參數， $\rho_w$ 為水之密度，體積含水量與重量含水量的關係為 $\theta = w \cdot \rho_d$ 。Lin (2003) 發現，若將上式的視介電度以高頻介電度實部取代，可獲得幾乎不受土種類影響的關係式，此關係式可作為後續探討電學性質與土壤物理性質關係的重要束制條件。

關於非飽和土壤的介電頻譜，Dobson et al.(1985) 與 Heimovaara (1994) 提出一混合模型 (mixing model) 用以描述土壤介電頻譜，由土顆粒、自由水 (free water)、束限水 (bond water) 以及空氣四種介質介電度，透過體積混合理論模擬土壤總體介電頻譜，其數學式可表示為 (Lin, 2003)

$$\varepsilon_m^\alpha = \left( \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \varepsilon_s^\alpha + (\theta - \delta A_s \rho_d) \varepsilon_{fw}^\alpha + \delta A_s \rho_d \varepsilon_{bw}^\alpha + \left( 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} - \theta \right) \varepsilon_{air}^\alpha \quad (14)$$

其中， $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon_{fw}$ 、 $\varepsilon_{bw}$ 以及 $\varepsilon_{air}$ 分別是與頻率相關之土體總介電度、土顆粒介電度、自由水介電度、束限水介電度以及空氣介電度； $\delta$ 為束制水厚度； $A_s$ 為顆粒比表面積(specific surface area of soil)； $\theta$ 為體積含水量； $\rho_d$ 為土體乾密度； $\rho_s$ 為平均土顆粒密度； $\alpha$ 為迴歸係數。孔隙水的導電電度已包含在 $\varepsilon_{fw}$ 項內。

本研究利用前項工作項目所建立的量測系統，量測在不同含水量與乾密度情況下的寬頻介電頻譜。在探討污染土壤電學特性之前，本研究期望透過寬頻的介電頻譜，先探討非飽和土壤的介電頻譜特性，研擬可同時估計土壤含水量、孔隙率及孔隙水導電度的方法，此方法經調整，應可適用於飽和污染土壤的量化評估。本研究進一步選擇幾種台灣常見的有機污染物，進行其複介電度量測分析。當污染土壤處於非飽和狀態，預估其介電行為最為複雜，本研究基於本計畫研究成果，規劃後續污染土壤在飽和與非飽和情況下之探討。

## 第四章 研究方法與過程

### 4.1. 研究流程

本研究工作之工作流程圖如圖 8 所示，首先進行文獻回顧與資料蒐集，蒐集國內外複介電度量測技術相關研究，污染物以及污染土壤之電學特徵，作為後續實驗規劃參考與實驗結果比較。在時域反射量測系統建置中，針對介電頻譜量測系統整合與感測器研發。現地介電頻譜量測技術研發之理論架構完成後，利用蒐集之文獻中所提出之波傳模擬波譜法模擬出虛擬波形，在理想狀態下進行數值探討，驗證此量測技術之可行性與其限制。數值探討完畢再利用前述之量測系統在室內試驗環境中擷取待測材料之實際 TDR 訊號，再度驗證所量測介電頻譜的準確性和穩定性。後續探討有機污染物及非污染土壤介電頻譜與土壤物理性質關係探討。本研究所研發之現地介電頻譜量測系統於現地進行測試以驗證其實用性，於現地之測試工作中主要分兩個部分進行，一個部分是針對未污染場址，測試在土壤中之使用性以及量測的準確性，而另一部分針對有機污染物污染的場址進行，比較受有機物污染之場址的訊號差異，並與室內試驗之結果進行比對，以規劃未來針對有機污染物調查之模型建立與分析工作。

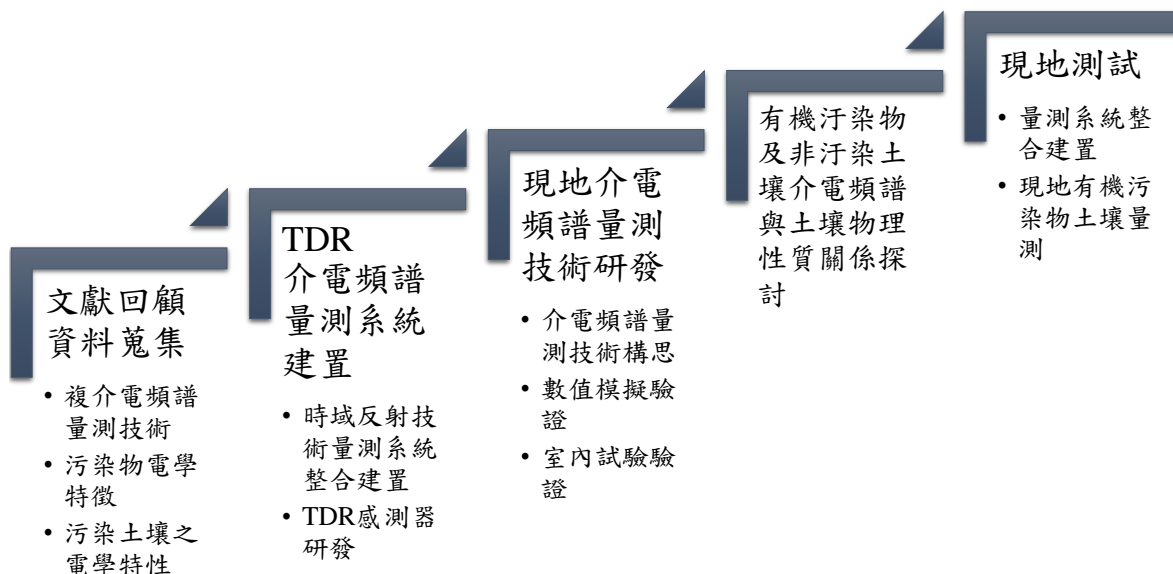


圖 8 研究流程圖



## 4.2. 工作進度甘特圖

本研究計畫之工作進度甘特圖如圖 9 所示，各工作項目之進度皆在設定之進度上，且期末預訂之查核點經已完成。

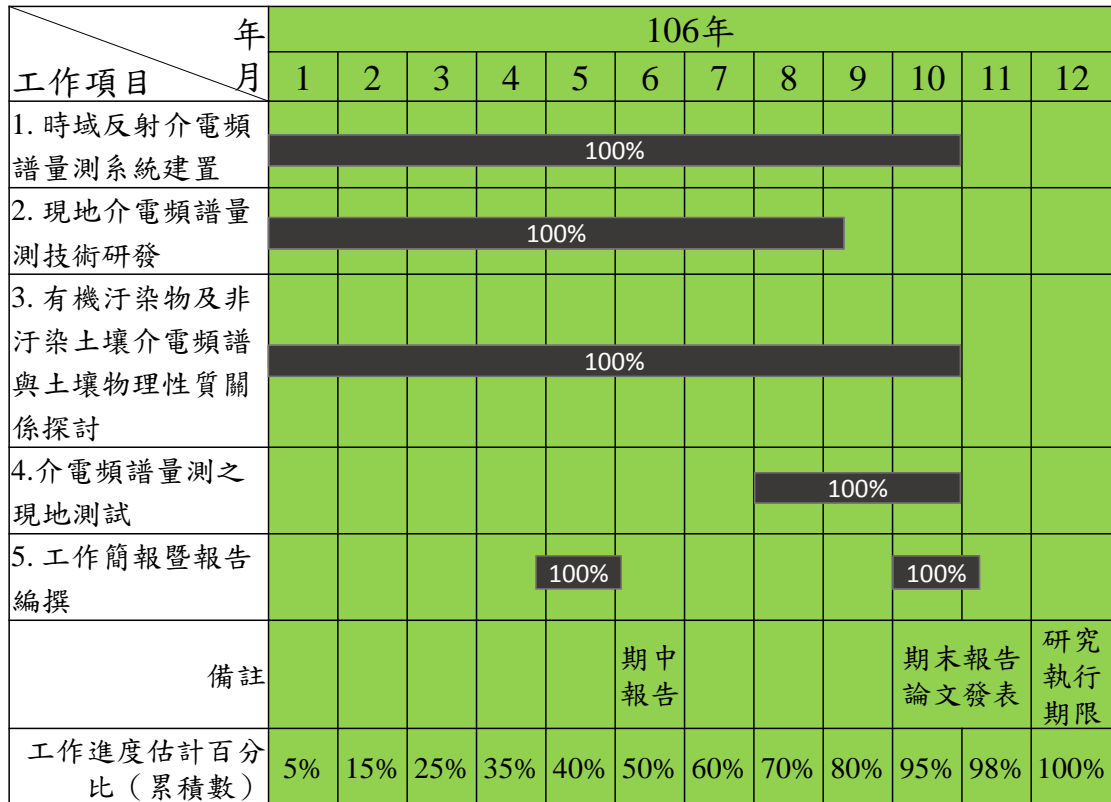


圖 9 工作進度甘特圖

## 第五章 結果與討論

### 5.1. TDR 多重反射訊號分析 (RRA) 理論架構

#### 5.1.1. 多重反射 (Multiple reflections)

時域反射方法 (Time-domain reflectometry, TDR) 訊號中之多重反射在訊號處理與分析中往往被忽略，更常被視為擾亂分析之雜訊，其重要性實際上被低估。Lin et al. (2017)之 PVA 分析方法中發現涵蓋了感測器主要兩個反射訊號後端之多重反射訊號，部分介電頻散效應(dielectric dispersion)極高之材料(如醇類)之視介電頻譜仍能被量測出來。縱使測得之視介電頻譜因涵蓋了多重反射而與理論值略有落差，其有效頻率段上限實際有顯著之提升。基於此因素，本研究提出 TDR 多重反射訊號分析(Remaining reflections analysis, RRA)，考慮所有出現於感測段後之多重反射訊號，旨在量測 10 MHz 至 1 GHz 之間之複介電頻譜 (Complex dielectric permittivity spectrum, CDP spectrum)。

在一末端斷路式感測器(open-ended probe)之 TDR 系統中，因特徵阻抗(characteristic impedance)不連續而產生前兩次主要反射訊號分別在傳輸線-感測器頂端、感測器末端與空氣段界面上。部分訊號能量因界面反射殘留在感測段，不斷來回反射與透射機制下產生多重反射(multiple reflections)，直到所有剩餘能量消散並達到穩態(steady state)。圖 10 為 TDR 反射訊號之射線追蹤軌跡圖，顯示一輸入訊號 $X$ 在一傳輸線系統中傳播，部分前向波抵達界面 I (interface I) 時反射回訊號接收段。此第一次反射訊號（以下稱為 $R_1$ ）可表示為

$$R_1 = X \cdot F \cdot \rho_1 \cdot B \quad (15)$$

其中 $F$  和  $B$  分別為輸入訊號 $X$ 在波傳過程中之前向與反向傳播系統函數，而 $\rho_1$ 則為在界面 I 之反射係數，可由以下定義計算

$$\rho_i = \frac{Z_{c,i+1} - Z_{c,i}}{Z_{c,i+1} + Z_{c,i}} \quad (16)$$

透射入感測段之部分前向波比例以透射係數 $\tau_1$ 定義

$$\tau_1 = 1 + \rho_1 \quad (17)$$

在感測段傳遞之 TDR 訊號將受到周圍材料電學特性影響，進而產生訊號衰減(attenuation)以及相位變更(phase change)。其對傳遞波之影響可由下列系統函數 $H(x, \varepsilon^*(f))$  描述

$$H(x, \varepsilon^*(f)) = \exp[-\alpha(f)x - jk(f)x] \quad (18)$$

其中  $\alpha$  為衰減常數(attenuation constant)，可表示為

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]} \quad (19)$$

而  $k$  則為相位常數(phase constant)或波數(wavenumber)，

$$k = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right]} \quad (20)$$

其中  $c$  為光速， $\varepsilon'$  與  $\varepsilon''$  分別為複介電度之實部(real part)與等值虛部(equivalent dielectric permittivity)。等值虛部如公式(1)所示，涵蓋了因介電耗損(dielectric loss)與導電度耗損(conductivity loss)之綜合影響。

當前向波來到位於斷路式感測器末端之界面 II，該界面之反射係數  $\rho_2$  在末端斷路條件下 ( $Z_{c3} = \infty$ ) 而由公式(16)計算出  $\rho_2 = 1$ 。此時前向波之訊號將在此界面以  $\rho_2$  比例反射，再度通過感測端且通過界面 I 時對應之反射與透射係數分別為  $-\rho_1$  以及  $1 - \rho_1$ 。沿著傳輸線回傳至接收器之第二次反射(以下稱為  $R_2$ )之訊號可表示為

$$\begin{aligned} R_2 &= X \cdot F \cdot (1 + \rho_1) \cdot H(2L, \varepsilon^*(f)) \cdot (1 - \rho_1) \cdot B \\ &= X \cdot F \cdot B \cdot H(2L, \varepsilon^*(f)) \cdot (1 - \rho_1^2) \end{aligned} \quad (21)$$

其中  $L$  為感測器長度，為了後續公式之簡潔呈現，感測段之系統函數  $H(2L, \varepsilon^*(f))$  將簡稱為  $H$ 。

在感測段不斷透射與反射之殘餘能量將循著類似  $R_2$  之波傳路徑但以較弱之訊號能量傳遞，而產生出多重反射  $R_3, R_4, \dots, R_n$  直到訊號完全衰減且達到穩態。遵循上述射線軌跡，前述多重反射可表示為

$$\begin{aligned} R_3 &= \frac{R_2}{1 - \rho_1} \cdot (-\rho_1) \cdot H \cdot (1 - \rho_1) \\ &= X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot H \cdot (-\rho_1) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{R_4}{1 - \rho_1} \cdot (-\rho_1) \cdot H \cdot (1 - \rho_1) \\
 &= X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot H^2 \cdot \rho_1^2
 \end{aligned} \quad (23)$$

觀察奇數與偶數倍之多重反射訊號，以下列通式形容後續之多重反射行進軌跡

$$R_k = X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot [H \cdot (-\rho_1)]^{(k-2)} \quad (24)$$

其中 $k = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ 。對於此段落之公式， $X, F$  and  $B$ 為系統函數而非待量測之對象。

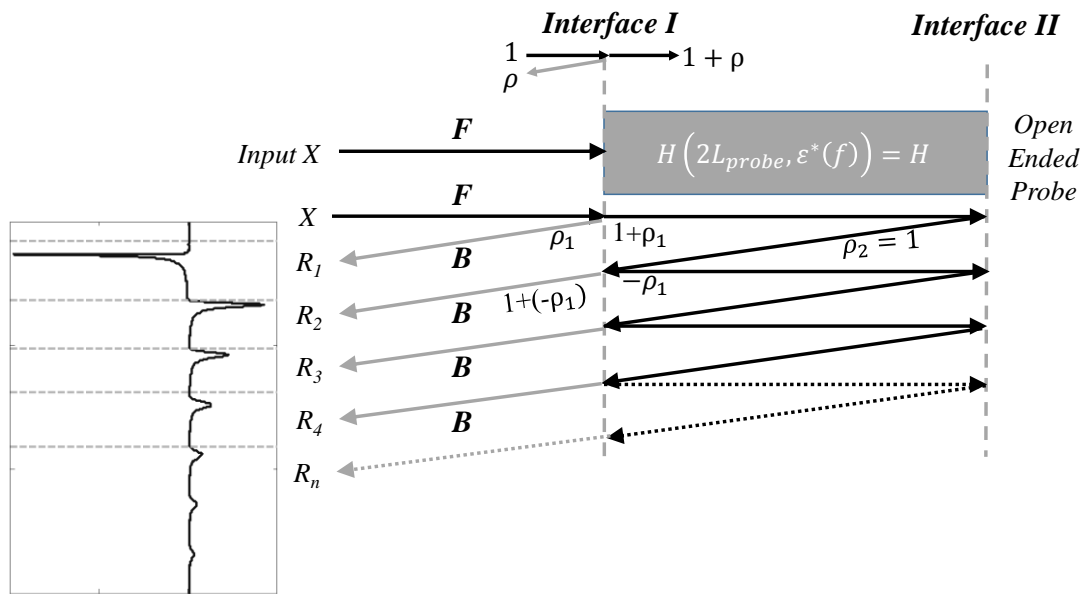


圖 10 TDR 反射訊號之射線追蹤軌跡圖

### 5.1.2. 多重反射訊號分析 (RRA)

在此多重反射訊號分析方法中，主要針對隱含在 $H(x, \epsilon^*(f))$  和  $\rho_1$ 內富有頻率含量之複介電度資訊， $\epsilon^*(f)$ 。通過比對萃取出之訊號之頻譜比例(spectral ratio)，源輸入函數 $X$ 以及傳輸線內之波傳系統函數 $F, B$ 將可輕易相互抵消，針對非顯然情況(non-trivial conditions)下取得有興趣之 $\epsilon^*(f)$ 頻譜。通過最佳化函數來擬合理論解與所量測之 RRA 比例 (RRA ratio)，待測物質之複介電頻譜 (CDP spectrum) 可由此反演得出。本研究針對 RRA 提出兩種演算法，利用兩組多重反射訊號頻譜比例形式進行複介電頻譜反演。

### 5.1.2.1. RRA 方法 1

RRA 方法 1 針對 $R_1$ 以及 $R_1$ 以後之多重反射（以下簡稱 $R_{\text{remaining}}$ ，即為 $R_2, R_3, R_4, \dots$ ）作頻譜比較，圖 11a 顯示定義該二組訊號之微分時域區間。根據公式(24)中的通式， $R_{\text{remaining}}$ 各訊號至穩態之頻譜總和可表示為

$$\sum_{k=2}^{\infty} R_k = X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot \sum_{k=2}^{\infty} [H \cdot (-\rho_1)]^{(k-2)} \quad (25)$$

取代 $k = n + 2$ 取代 $k$ 項，最後一項以幾何級數總和，如下

$$\sum_{n=0}^{\infty} [H \cdot (-\rho_1)]^n = \frac{1}{1 - (-\rho_1 H)} \quad (26)$$

其中必須滿足 $|\rho_1 H| < 1$ 條件使得上式成立。將公式(26)代入公式(25)， $R_{\text{remaining}}$ 可表示為

$$R_{\text{remaining}} = X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot \frac{1}{1 + \rho_1 H} \quad (27)$$

回顧公式(15)中的 $R_1$ ，RRA 方法 1（RRA1）之頻譜比如下

$$\begin{aligned} RRA1 &= \frac{R_{\text{remaining}}}{R_1} = \frac{\sum R_2 + R_3 + \dots + R_{\infty}}{R_1} \\ &= \frac{H \cdot (1 - \rho_1^2)}{\rho_1 \cdot (1 + \rho_1 H)} \end{aligned} \quad (28)$$

其中二項假設 $|\rho_1 H| < 1$  以及  $\rho \neq 0$  須滿足以讓 RRA1 成立且有意義。

### 5.1.2.2. RRA 方法 2

前述 RRA1 在訊號處理過程中可能會造成  $R_1$  之訊號斬截(signal truncation) 以及由  $R_1$  漏磁(leakage)進入  $R_{\text{remaining}}$  中。因此本研究同時提出第二種 RRA 方法，採用  $R_{\text{remaining}}$  以及由感測器頂端起往後之所有反射訊號(簡稱為  $R_{\text{all}}$ , 即為  $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$ ) 來比較二者之頻譜比。 $R_{\text{all}}$  實際為  $R_1$  和  $R_{\text{remaining}}$  之總和，將公式(15) 和公式(27)相加可得

$$\begin{aligned} R_{\text{all}} &= R_1 + R_{\text{remaining}} \\ R_{\text{all}} &= [X \cdot F \cdot B \cdot \rho_1] + \left[ X \cdot F \cdot B \cdot H \cdot (1 - \rho_1^2) \cdot \frac{1}{1 + \rho_1 H} \right] \\ &= X \cdot F \cdot B \cdot \left[ \frac{\rho_1 + H}{1 + \rho_1 H} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

將公式(27) 中  $R_{\text{remaining}}$  與公式(29) 中的  $R_{\text{all}}$  相比，RRA2 之頻譜比如下

$$\begin{aligned} RRA2 &= \frac{R_{\text{all}}}{R_{\text{remaining}}} = \frac{\sum R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{\infty}}{\sum R_2 + R_3 + \dots + R_{\infty}} \\ &= \frac{(\rho_1 + H)}{H \cdot (1 - \rho_1^2)} \end{aligned} \quad (30)$$

其中  $|\rho_1 H| < 1$  之假設必須滿足使得上式成立。

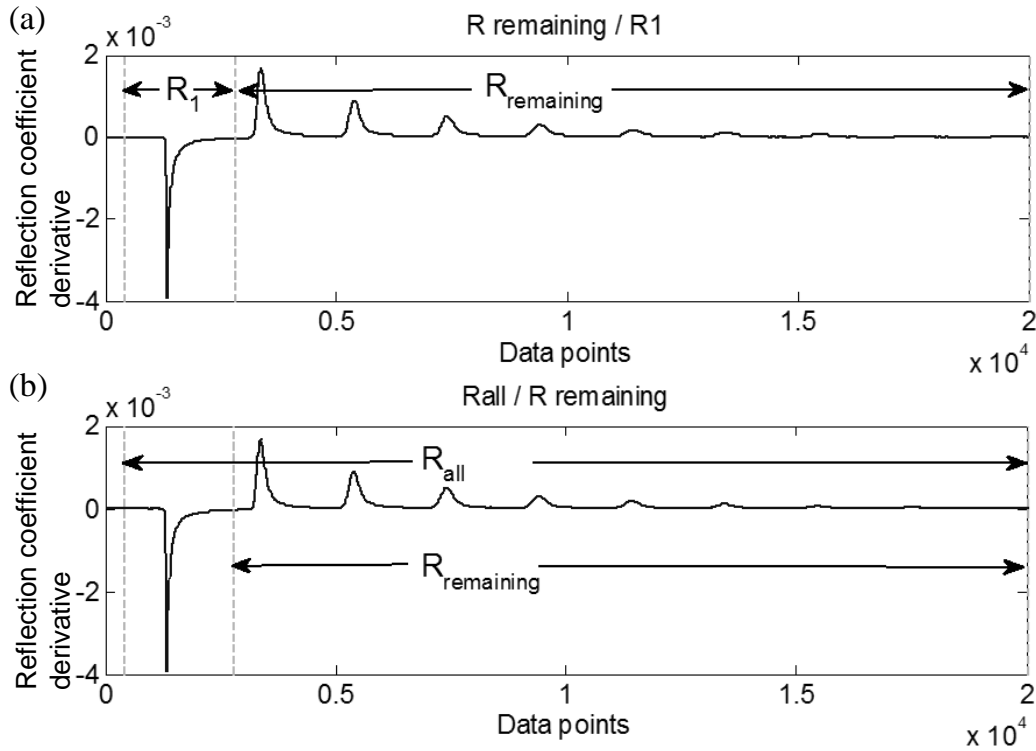


圖 11 RRA (a) 方法 1 (b) 方法 2

### 5.1.3. 訊號處理方法

由公式(28)和(30)分別得到之 RRA1 和 RRA2 頻譜比，待測材料之複介電度可通過最佳化函數求得其複介電度，使得 $\varepsilon^*(f)$ 代入 $H(x, \varepsilon^*(f))$ 和 $\rho_1$ 後所求得之 RRA 比符合量測值。此方法需預先標定兩項系統參數，分別為感測器之感測段長度(L)、感測器頂端與感測段之特徵阻抗比( $Z_{ch}/Z_{p1}$ )。公式(18)內 $H(x, \varepsilon^*(f))$ 之波傳距離 $x$ 為感測段長度，可由直接量測或以任意已知材料(通常為清水)進行參數標定。後者 $Z_{ch}/Z_{p1}$ 特徵阻抗比則因求解 $\rho_1$ 過程中需要，如下式所示

$$\rho_1 = \frac{Z_{c1} - Z_{ch}}{Z_{c1} + Z_{ch}} = \frac{1 - \frac{Z_{ch}}{Z_{c1}}}{1 + \frac{Z_{ch}}{Z_{c1}}} = \frac{1 - \frac{Z_{ch}}{Z_{p1}} \sqrt{\varepsilon_1^*}}{1 + \frac{Z_{ch}}{Z_{p1}} \sqrt{\varepsilon_1^*}} \quad (31)$$

其中 $Z_{ch}$ 和 $Z_{c1}$ 分別為感測器頂端、感測段之特徵阻抗， $Z_{p1}$ 為感測段之幾何阻抗或充滿空氣之特徵阻抗。對於一般正規幾何截面之感測器， $Z_{ch}$ 以及 $Z_{p1}$ 可由電磁波理論計算得出，此公式之 $Z_{ch}$ 實際上在阻抗匹配之感測器系統(matched probe system)中相當於感測器前端傳輸線之特徵阻抗。對於非正規幾何斷面之感測器，採用任意已知複介電度材料即可輕易標定 $Z_{p1}$ 。

綜合以上敘述，RRA 分析方法需要四種資料進行複介電度反算，即 $Z_{ch}/Z_{p1}$ ,  $L$ ,  $R_{remaining}$  以及 $R_1$  (RRA1) 或  $R_{all}$ (RRA2)。前二系統參數可由前述標定方式取得，而後二者則需要訊號處理將其由原始 TDR 時域訊號中截取。本研究利用由阻抗匹配之感測器系統在清水中量測之 TDR 訊號(圖 12a)來示範下述訊號處理流程。

(1) 將原有之 TDR 階躍式訊號 (step-pulse signal) 微分成脈衝訊號 (Impulse signal)，如圖 12b 所示。

(2) 截取反射訊號：此步驟為本研究提出之 RRA 中最關鍵步驟，錯誤選取之波形將無法進行反演。RRA 中兩種分析方法所需要之訊號截取實際上非常簡單與直接。兩種分析方法皆採取之 $R_{remaining}$  訊號，其起點位於感測段末端，如圖 12b 中的 $t_2$ 所示。此位置建議為圖 12a 中階躍式訊號之最低點且一般同時通過圖 12b 中脈衝訊號之零點。對於 RRA1,  $R_1$ 建議選擇介於 $t_1$ 與 $t_2$ 間且最好靠近感測器之頂端，但一般阻抗匹配之感測器系統在感測段之前 TDR 訊號皆平整， $R_1$ 之起點選擇並無太大影響。對於 RRA2,  $R_{all}$ 建議涵蓋 TDR 訊號完整收錄訊號段，由感測器起點直到多重反射達到穩態值為止，對於本研究採用之 17 公分感測器，訊號收錄時間約為 $2 * 10^{-7}$ 秒。

(3) 對較短之訊號補零 (zero-padding): 因步驟 (2) 截取之訊號長度不相等, 對於訊號長度較短之訊號建議以補零方式處理, 以確保傅立葉轉換後之頻率域解析度符合需求。補零處理後之 $R_{\text{remaining}}$  和 $R_1$ 如圖 12 c、d 中所示。

(4) 對截取後之訊號進行快速傅立葉轉換 (Fast fourier transform, FFT) 。對於 RRA1, 該訊號為 $R_{\text{remaining}}$  和 $R_1$ , 對於 RRA2 則為 $R_{\text{remaining}}$  和 $R_{\text{all}}$ 。轉換至頻率域後, 再比較該二訊號之頻譜比( $RRA1 = R_{\text{remaining}}/R_1, RRA2 = R_{\text{all}}/R_{\text{remaining}}$ )。

(5) 定義最佳化分析時, 擬合 RRA 頻譜比所採用之頻率範圍 ( $f_{\text{opt}}$ ), 對於 TDR 訊號一般為 10 MHz – 1 GHz。

(6) 給定包含實部與虛部之複介電度初始值, 並代入公式 (18)與(31)中分別求得系統函數 $H$ 和 $\rho_1$ 之理論值, 而初始值之給定將在數值模擬前詳細敘述。

(7) 根據 RRA1 或 RRA2 之頻譜比, 將步驟 (6) 之系統函數代入公式 (28) 或(30)計算理論 RRA 頻譜比。

(8) 利用最佳化分析方法比較步驟 (7) 之初始理論值與步驟 (4) 之量測理論值, 利用目標函數方法由低頻至高頻一一反算出正確之複介電度。

(9) 以目標函數計算之反算誤差, 給定下一個初始值並通過步驟 (6)-(8) 不斷疊代直到最佳化分析方法收斂至 RRA 頻譜比之量測值, 取得待測材料之複介電頻譜。



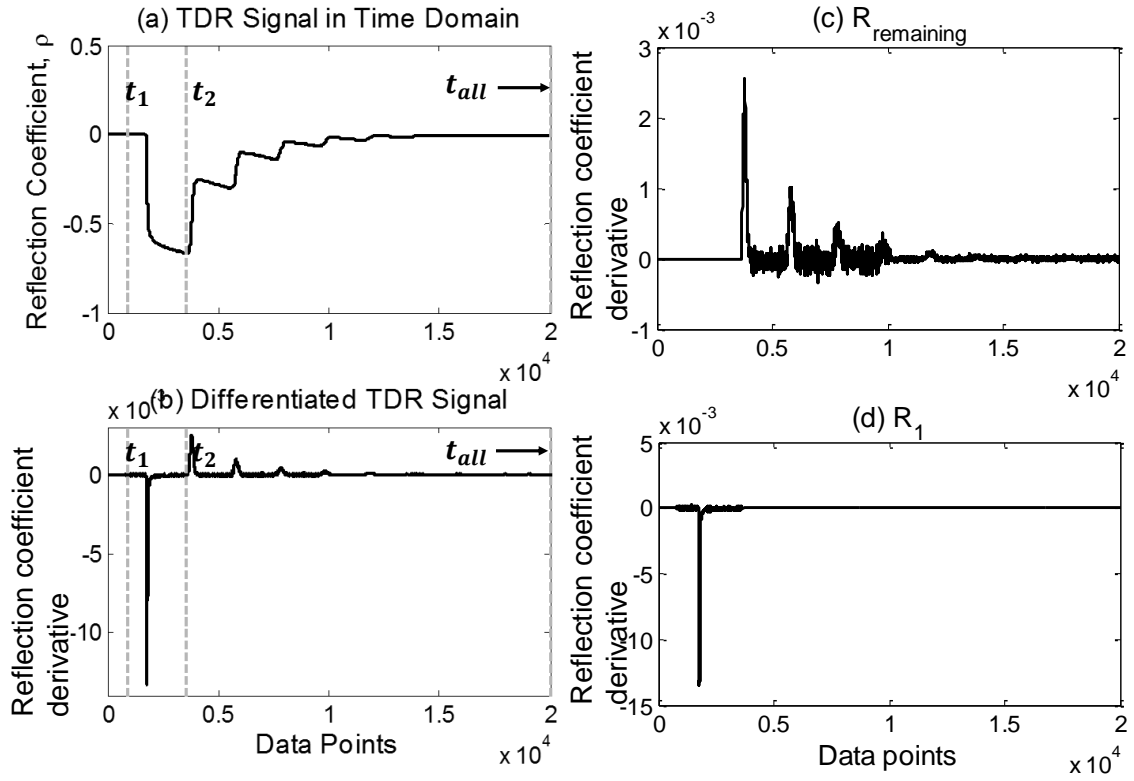


圖 12 RRA 訊號處理示意圖（以清水為例）：(a) TDR 階躍式波形 (b)微分(a)後之脈衝訊號；(c) 截取之 $R_{\text{remaining}}$ ；(d) 截取之 $R_1$ 。

## 5.2. 數值模擬探討

本研究首先利用數值模擬驗證 RRA 方法之可行性，利用模擬 TDR 訊號進行參數探討。數值模擬選定之系統參數與實驗配置相似，以供後續實驗數據與數值結果作為對照組。本研究擬定一個三段傳輸線系統模型，包括一個 42 m 長之  $50\ \Omega$  同軸纜線、一個 0.1 m  $50\ \Omega$  阻抗匹配之感測器探頭以及一個 0.17 m 且  $Z_p = 95\ \Omega$  之同軸感測段。

本研究選定八種不同介電頻散 (dielectric dispersion) 及導電度特徵之待測材料，針對 RRA 進行綜合數值探討。此八種待測材料分別為蒸餾水(distilled water)、自來水(tap water)、丙酮(acetone)、空氣(air)、甲醇(methanol)、乙醇(ethanol)、異丙醇(isopropanol)以及正丁醇(butanol)。虛擬之 TDR 波形模擬利用前述 Lin and Tang (2007) 提出之 TDR 波傳模擬波譜法，由終端阻抗 (terminal impedance) 至源頭阻抗 (source impedance) 以遞歸方式算出傳輸線系統中各段之特徵阻抗。模擬待測材料複介電頻譜時，本研究選擇 Cole and Cole (1941) 提出的 Cole-cole 函數作為介電鬆弛模型 (dielectric relaxation model) 來定義該材料之介電行為，其理論複介電度為

$$\varepsilon^*(f) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{dc} - \varepsilon_\infty}{1 + (jf/f_{rel})^{1-\beta}} - \left( \frac{j\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \right) \quad (32)$$

其中  $\varepsilon_{dc}$  為材料穩態時的介電特性， $\varepsilon_\infty$  為頻率無限大時的介電特性， $f_{rel}$  則為極化鬆弛頻率(relaxation frequency)， $\beta$  為鬆弛時間的分布參數， $\sigma$  為導電度， $\varepsilon_0$  為真空下之介電度。各待測材料之 Cole-cole 函數參數以及其簡稱列在表 1。傳輸線與感測器探頭之複介電度在全頻譜中皆取 1，並假設其沒有任何頻散現象。

在訊號處理章節中所提到的兩項需要標定的系統參數，分別為感測段長度(L)、感測器頂端與感測段之特徵阻抗比 ( $Z_{ch}/Z_{p1}$ )。感測段長度可直接由實際量測且在數值模擬中設定為 0.17m。後者  $Z_{ch}/Z_{p1}$  中的特徵阻抗可由同軸感測器斷面量測，從 Elmore and Heald (1985) 提出之公式計算

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (33)$$

其中  $\mu_0$  為真空磁導率， $D$  為外導體之內徑而  $d$  為內導體之外徑。本研究中標定實驗用感測器發現  $Z_{ch}$  和  $Z_{p1}$  分別為  $50\ \Omega$  以及  $95\ \Omega$ ，因此數模中對應之  $Z_{ch}/Z_{p1}$  等於 0.5263。

模擬之 TDR 訊號如圖 13 所示，顯示之時域波形約為感測器探頭前 1 m 至收錄時間  $2 \times 10^{-7}$  秒處，可發現所有待測材料之訊號已達到穩態。表 1 前四項待測材料為低頻散材料（圖 13a）而後四種材料皆為高頻散材料（圖 13b）。

表 1 RRA 中待測材料之 Cole-cole 函數

待測材料	簡稱	$\epsilon_{dc}$	$\epsilon_{\infty}$	$f_{rel}$ (GHz)	$\sigma_{dc}$ ( $\mu S/cm$ )	$\beta$
Distilled water	DIS	80.20	4.22	17.4	0	0.0125
Tap Water	TAP	78.54	4.22	17	300	0.0125
Acetone	ACE	21.20	1.90	47.65	0	0
Air	AIR	1.00	1.00	-	0	0
Methanol	MTH	33.64	5.70	3.002	0	0
Ethanol	ETH	25.50	4.25	0.782	0	0
Isopropanol	IPA	19.34	2.48	0.448	0	0
Butanol	BUT	17.70	3.30	0.274	0	0

資料來源：Friel and Or (1999), Skierucha and Wilczek (2010), Hasted (1973), Sato and Buchner (2003).

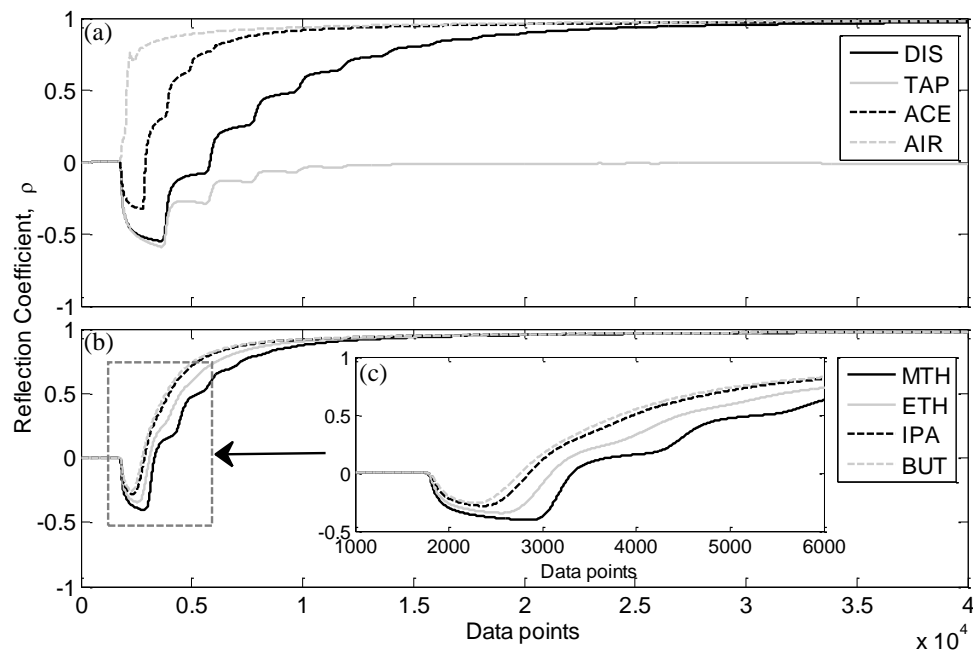


圖 13 表 1 中待測材料之 TDR 模擬訊號。(a)低頻散材料 (b)高頻散材料（醇類） (c)(b)中訊號放大示意圖

### 5.2.1. 最佳化函數與初始值給定

在分析程式上，使用 MATLAB 進程式撰寫，最佳化採用其內建之單純型搜尋法(Simplex search method, Nelder and Mead (1965))求解公式( 34 )，如前所述，在此式中僅量測材料之介電常數 $\varepsilon^*(f)$ 未知，則在每個頻率下之介電常數可令其為

$$\varepsilon_i^*(f) = a_i + j * b_i \quad (34)$$

其中， $\varepsilon_i^*(f)$ 是在頻率 $f_i$ 下的複介電度， $f_i = (i - 1) \cdot \Delta f$ ， $\Delta f$ 為頻率解析度， $a_i$ 為頻率 $f_i$ 下複介電度的實部， $b_i$ 為頻率 $f_i$ 下複介電度的虛部，在進行此最佳化求解中，求解頻率範圍在 10 MHz–1 GHz 間，而其目標函數(cost function)定義如下：

$$Error_{\{\varepsilon_i^*\}} = |RRA_i^{theo} - RRA_i^{mea}|^2 \quad (35)$$

其中，下標  $i$  表示頻率 $f_i$ 下之值， $RRA_i^{theo}$ 為初始值或最佳化時根據公式 ( 18 ) 或( 31 )計算之理論 RRA 頻譜比， $RRA_i^{mea}$ 為實際波形之 RRA 頻譜比。

初始值給定在最佳化函數中扮演重要角色，尤其是在目標函數結構中存在局部極小值 (local minimum) 時，而給定之初始值剛好過於偏離真值，導致最佳化過程中其收斂路徑(optimization path)極易落入極小值而收斂至錯誤答案。為了探討最佳化分析在 RRA 方法中之穩定性與一致性，本研究針對兩種 RRA 方法分別在複介電度之實部與虛部領域中觀察其目標函數值結構形態。利用自來水之複介電頻譜分別代入公式 ( 18 )及( 31 )，探討其 RRA 頻譜比在頻率為 10 MHz 與 1 GHz 時的目標函數結構，其結果如圖 14 所示。由圖 14a、c 可見，在 10 MHz 低頻條件下，對於 RRA 兩種方法完全沒有局部極小值出現，其目標函數結構之全局極小值 (global minimum) 剛好對應真值 (在圖中以"x"標識)。然而隨著頻率域升高至 1 GHz 時，由圖 14b、d 觀察出局部極小值隨之增加，形成前述不利於最佳化正確收斂之目標函數結構。隨著頻率提高，給定之初始值稍微偏離真值將極易造成目標函數收斂錯誤，而測得錯誤之複介電頻譜。

縱然如此，基於在低頻時不存在局部極小值這一點非常有利於 RRA 頻譜比之反演，本研究提出一疊代初始值(iterated initial guess)手段，利用在低頻反演之複介電度作為下一個頻率之初始值，確保隨著高頻增加而給定之初始值盡量靠近真值。應用此手段，在低頻反演時所給定之初始值可任意給定 $\varepsilon_{ini}^*$  (包含實部與虛部)，再利用複介電頻譜一般不會有極點之特性，確保高頻段複介電度反演獲得正確數值。此方法降低了局部極小值存在而造成反演錯誤之可能性，

可避免使用更為複雜的全局最佳化分析，提供了較不依賴初始值的最佳化反演環境予 RRA 分析方法。

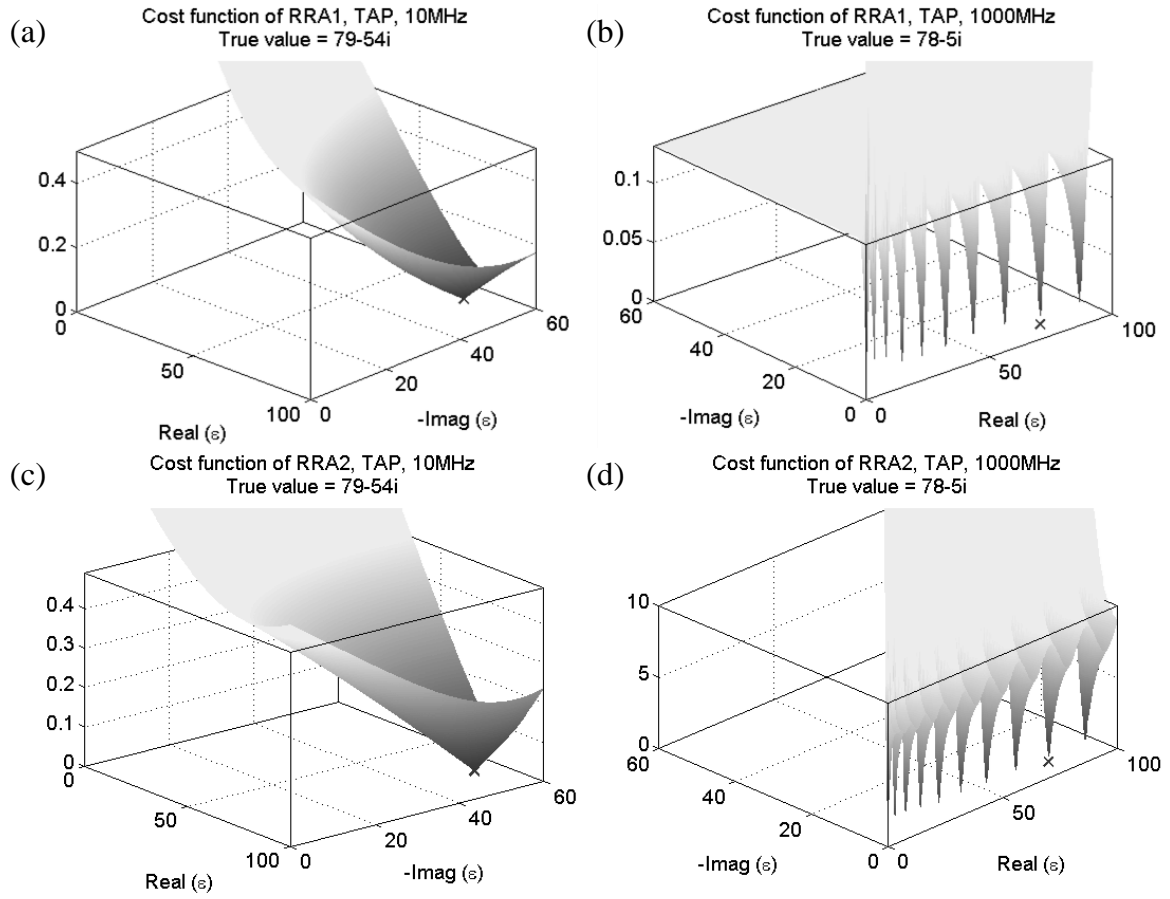


圖 14 理論 RRA 頻譜比之目標函數結構 (a) RRA 1, 10 MHz (b) RRA1, 1GHz (c) RRA2, 10MHz (d) RRA2, 1GHz。

### 5.2.2. RRA 1 數值模擬驗證

八種待測材料之模擬訊號經過 RRA1 分析方法處理後，利用前述最佳化分析搭配疊代初始值方法，在頻率範圍 10 MHz – 1 GHz 之間求解。圖 15 至圖 22 顯示所有待測材料之複介電頻譜反演結果，發現所有材料在特定頻率段中能正確量測出複介電度真值（以實線標識）。對於所有材料之複介電度頻譜，其實部與虛部在高於 100 MHz 頻率段後都能正確反演，發現類似相位速度分析法中有效頻率下限之現象。複介電頻譜之有效下限基本上因  $R_1$  訊號斬截限制了可運作波長（workable wavelength,  $\lambda_{\text{workable}}$ ）。有效頻率之下限由較短之訊號長度決定，因 TDR 訊號在感測段內由前向波與反向波組成，其最大波長為感測器長度之兩倍。所求之複介電頻譜有效下限可由下式求得

$$\lambda_{\text{workable}} = 2 \times L \quad (36)$$

$$f_{\text{lower}} = V_{\text{RRA}}(f)/\lambda_{\text{workable}} = \frac{c}{2L \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (37)$$

其中  $L$  為感測段長度， $c$  為光速， $\epsilon'$  與  $\epsilon''$  分別為複介電度之實部(real part)與等值虛部(equivalent dielectric permittivity)。

疊代初始值方法證實能有效降低最佳化分析對初始值給定之依賴，所有待測材料之理論頻譜比都能因此對應到所量測 RRA1 頻譜比。此現象可由圖 15 至圖 22 的 c、d 子圖觀察到，局部極小值在高頻段之影響也因此而消失。針對圖 19 至圖 22 醇類之複介電頻譜在高頻段出現錯估現象，主要因為醇類在 TDR 有效頻率段皆為高介電耗損(highly dispersive)材料，使得部分高頻資訊在訊號截取時消失，在 500-600 MHz 左右開始有量測誤差。

RRA 方法 1 之可靠度由數值模擬證實，雖然 RRA 方法仍有一定限制，RRA 仍能直接透過 TDR 時域訊號且在簡易系統參數標定後，求得待測物質之複介電頻譜（包含實部與虛部資訊）。

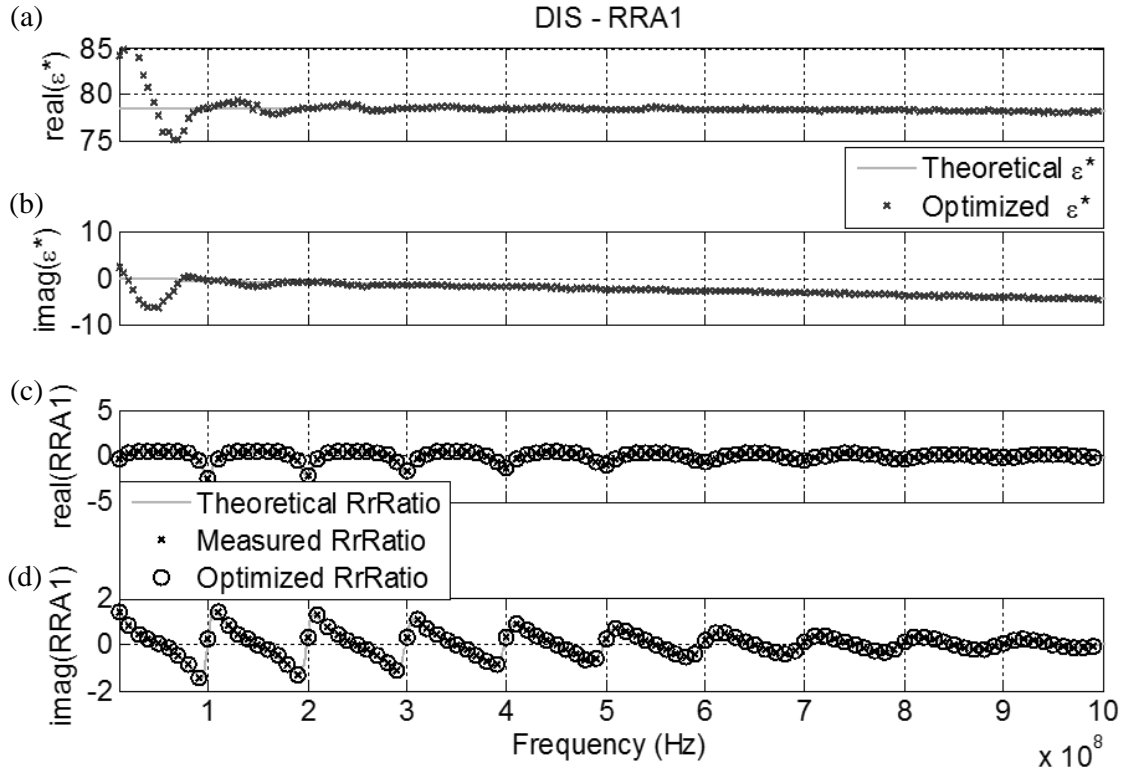


圖 15 RRA1 於蒸餾水之模擬訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

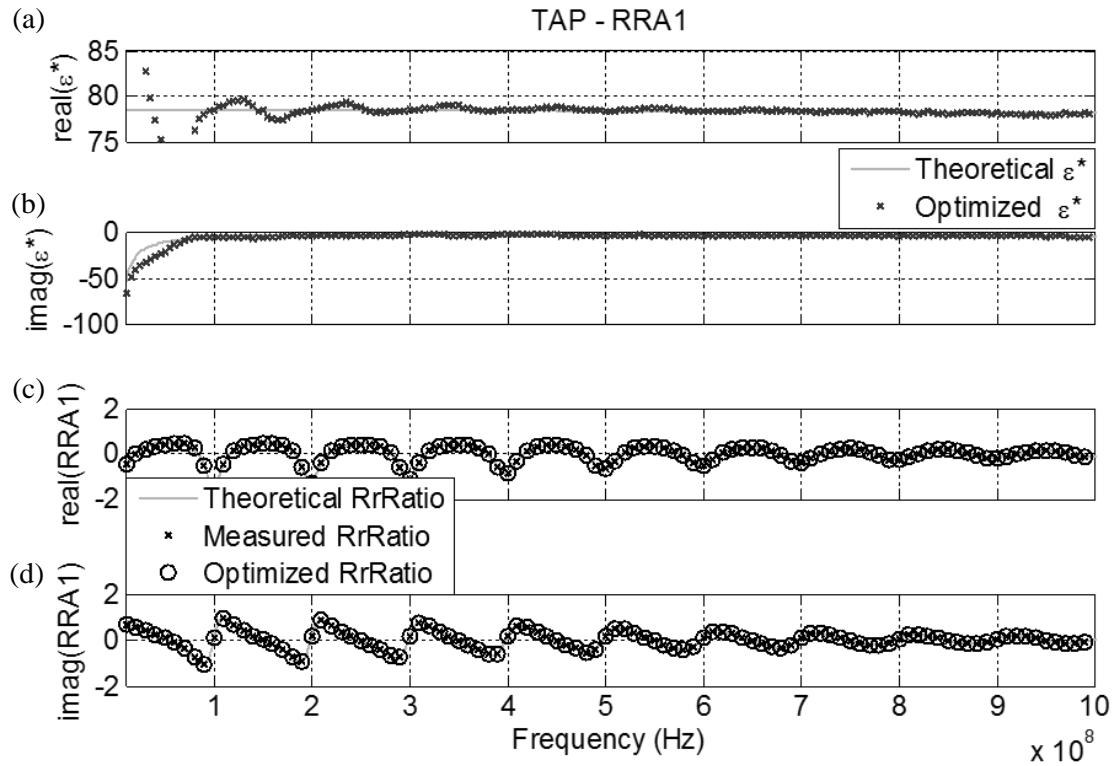


圖 16 RRA1 於自來水之模擬訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

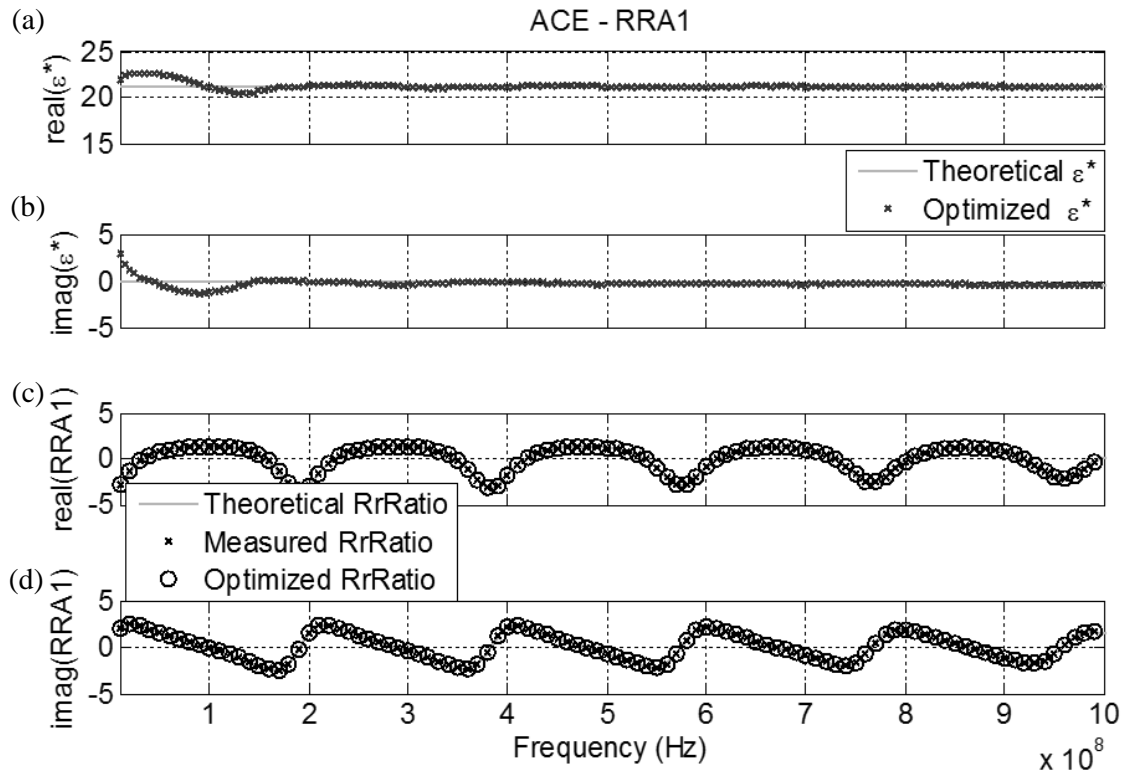


圖 17 RRA1 於丙酮之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

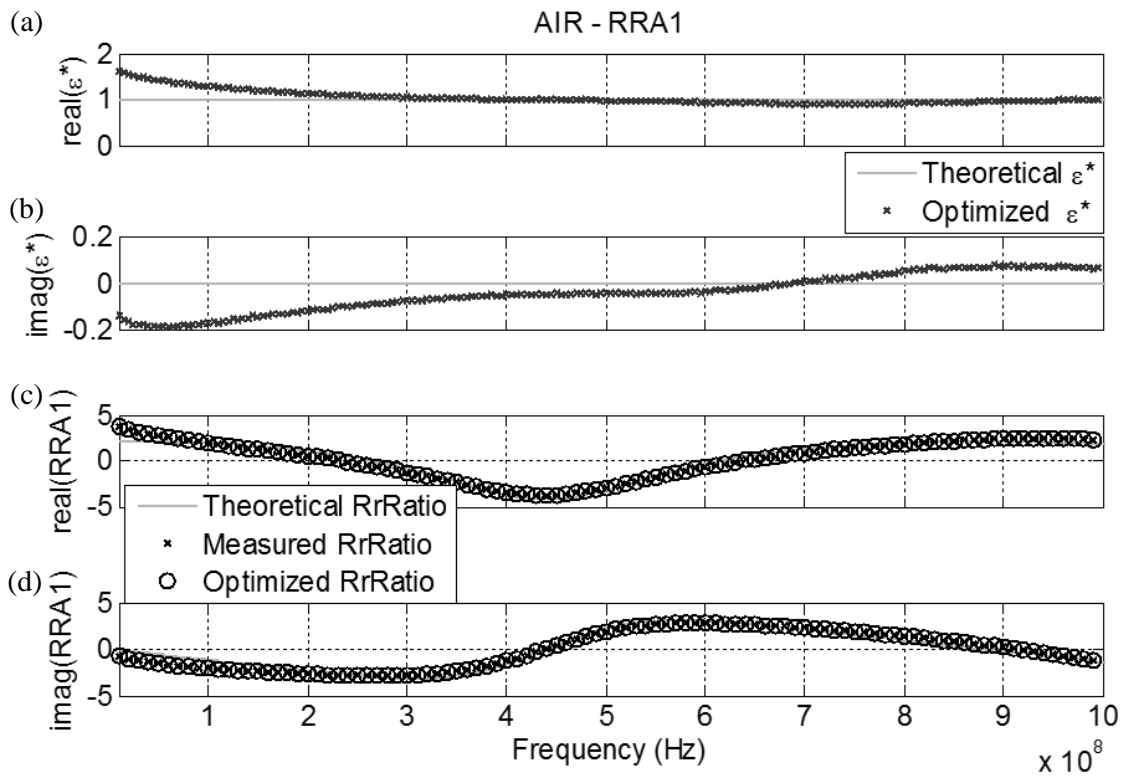


圖 18 RRA1 於空氣之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。



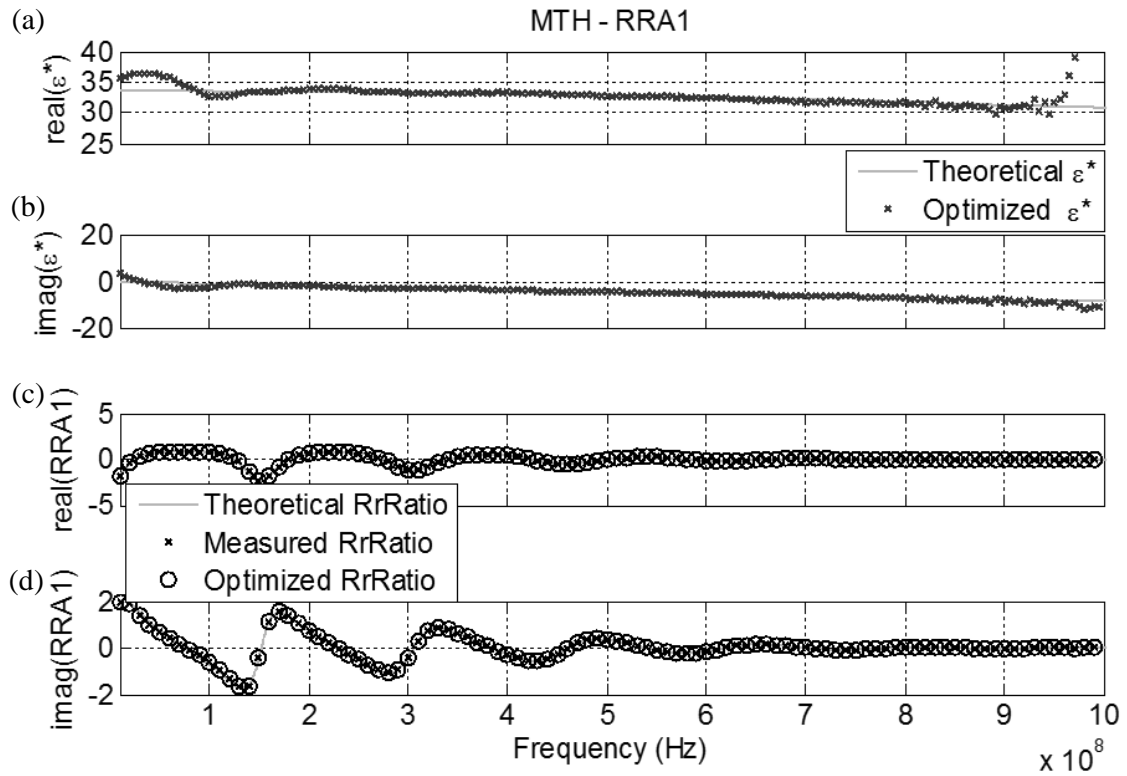


圖 19 RRA1 於甲醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

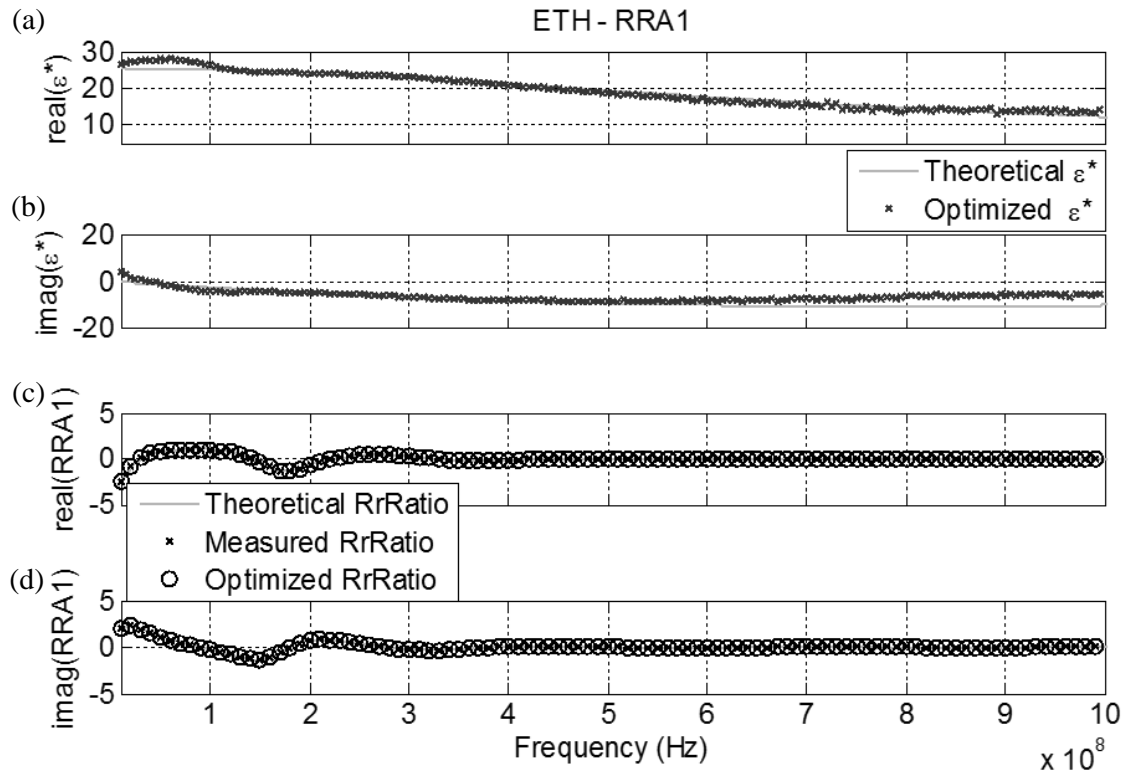


圖 20 RRA1 於乙醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

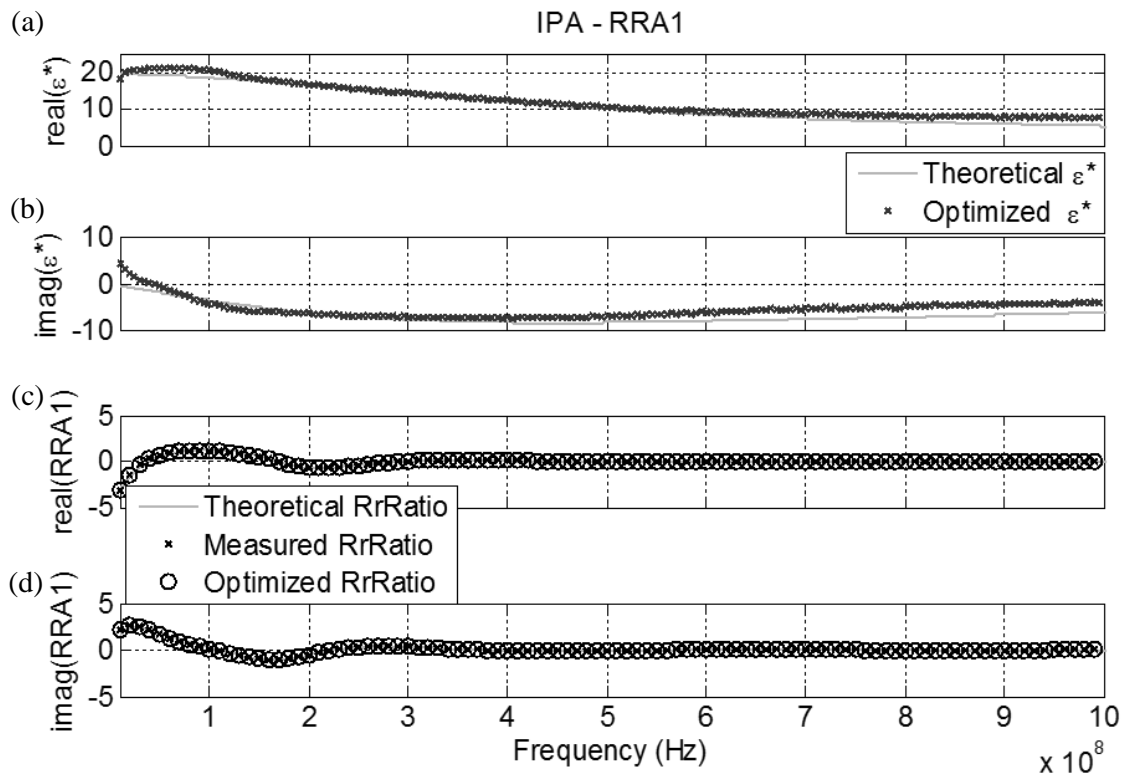


圖 21 RRA1 於異丙醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

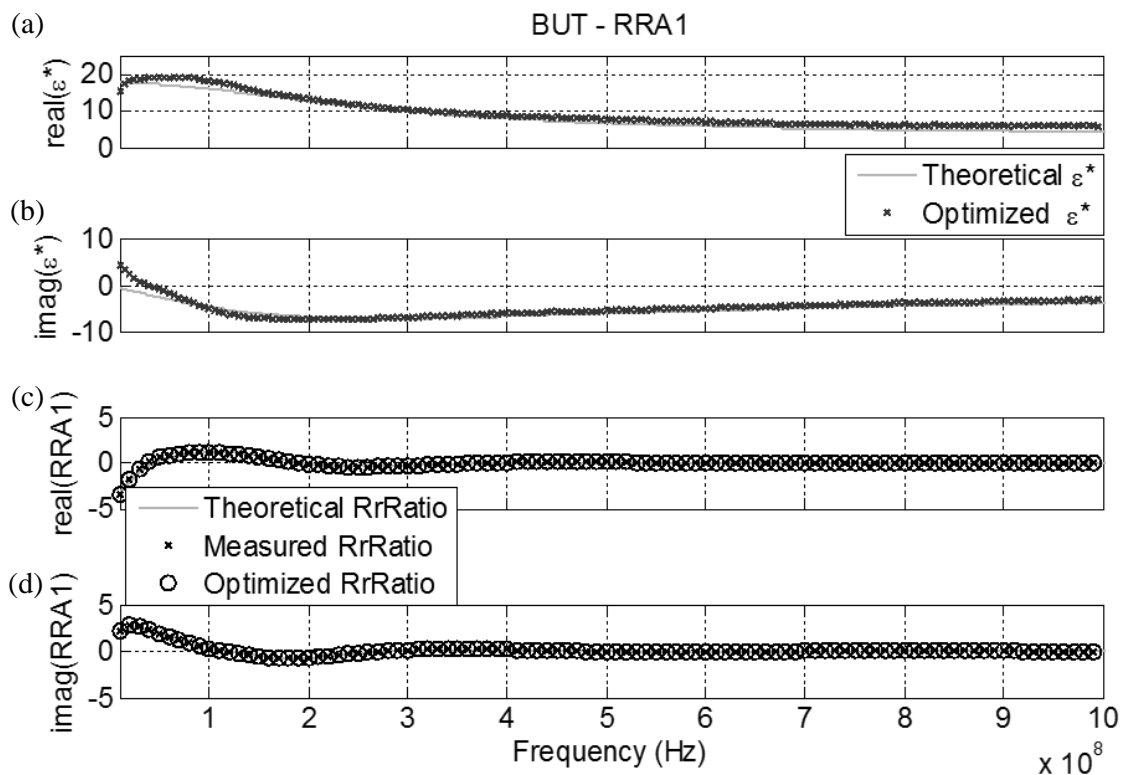


圖 22 RRA1 於正丁醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

### 5.2.3. RRA 2 數值模擬驗證

八種待測材料之模擬訊號再次使用 RRA2 分析方法處理，同樣利用最佳化分析搭配疊代初始值方法，在頻率範圍 10 MHz–1 GHz 之間求得複介電頻譜。所有待測材料之複介電頻譜 RRA2 反演結果如圖 23 至圖 30 所示，發現所有材料在特定頻率段中能正確量測出複介電度真值(以實線標識)。類似於 RRA1，所有材料之複介電度頻譜之實部與虛部在高於 100 MHz 頻率段後都能正確反演，其主因如前述之有效波長相關。

RRA2 頻譜比在高頻時數值對比較 RRA1 大，因此可輕易觀察到在圖 27 到圖 30 的醇類材料中的 c、d 子圖，當反演之複介電頻譜錯誤時，往往因為其測得 RRA2 頻譜比已經與理論值不符，顯示高頻訊息可能因高介電耗損而喪失，使得部分高頻資訊在訊號截取時消失，在 500-600 MHz 左右開始有量測誤差。

RRA2 頻譜比係一個可作為確認複介電頻譜資料之重要指標。即使在高頻時 RRA2 之表現似乎不佳，卻因疊代初始值方法進一步延長了其有效頻率之上限。疊代初始值方法證實能有效降低最佳化分析對初始值給定之依賴，所有待測材料之理論頻譜比都能因此對應到所量測 RRA2 頻譜比。

反演過程中，最佳化分析之表現可通過觀察最佳化後置頻譜比(optimized ratio)是否吻合量測值(measured ratio)，兩種 RRA 分析方法之目標函數結構搭配疊代初始值方法使得最佳化分析反演到準確頻譜比以及複介電頻譜。再觀察頻譜比之量測值與理論值，可判斷複介電頻譜錯誤之原因是否為特定頻率段資訊消失或敏感度降低。

通過數值模擬驗證 RRA 兩種對於量測複介電頻譜之可行性暨可靠度後，接下來使用通過室內試驗擷取之實際 TDR 波形進行 RRA 分析。

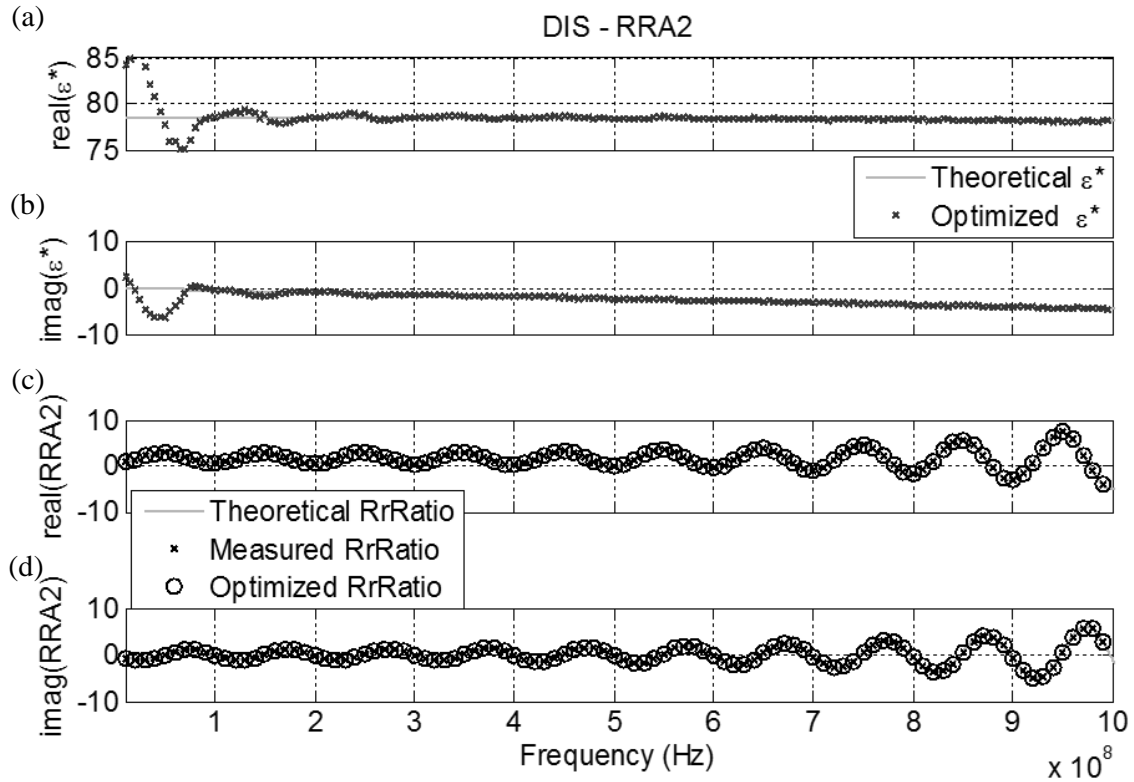


圖 23 RRA2 於蒸餾水之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

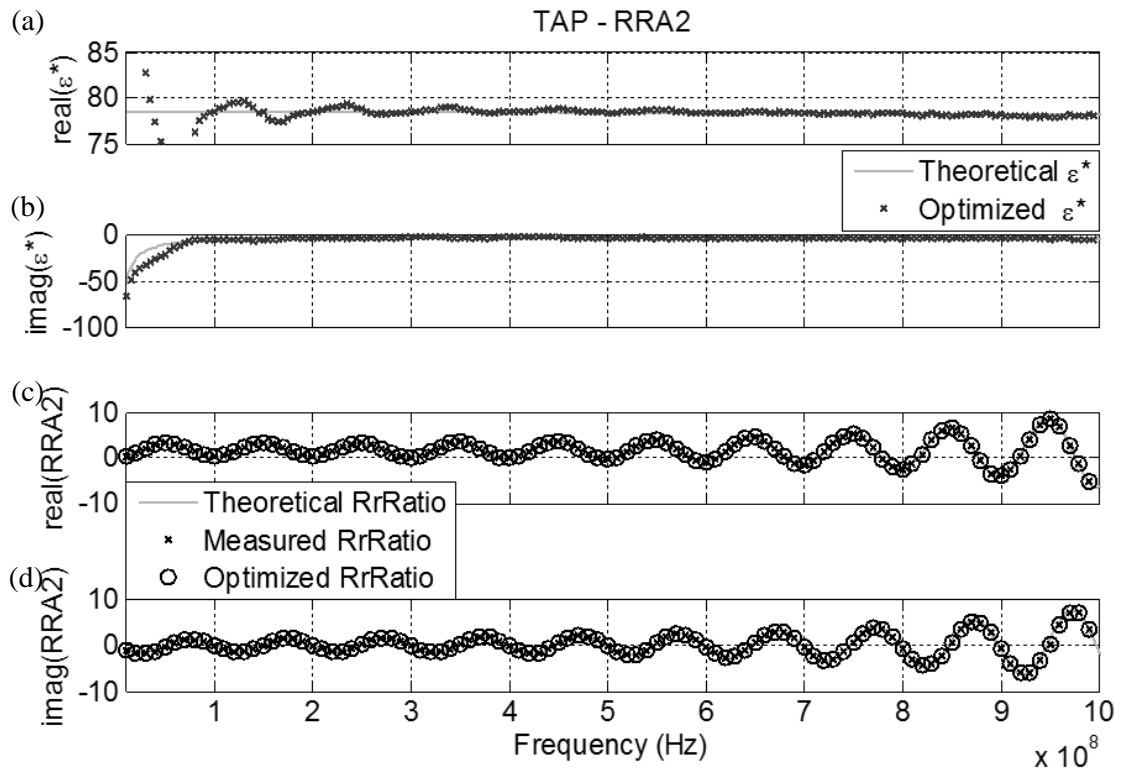


圖 24 RRA2 於自來水之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

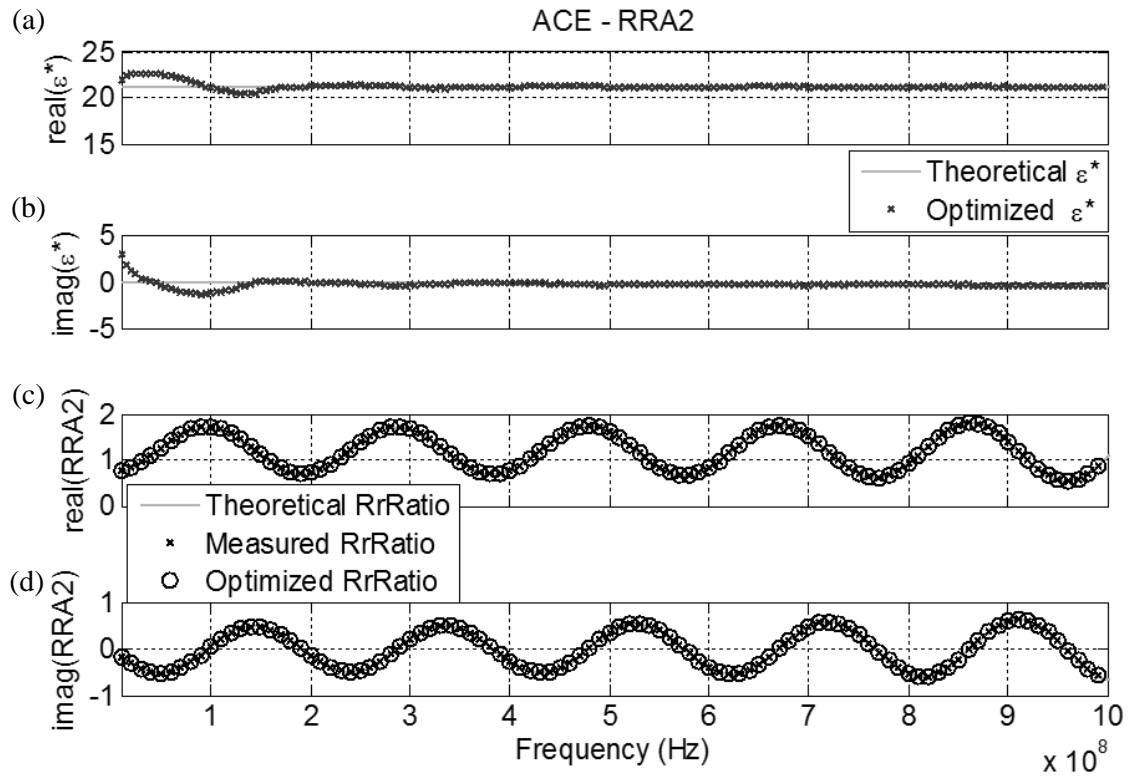


圖 25 RRA2 於丙酮之模擬訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

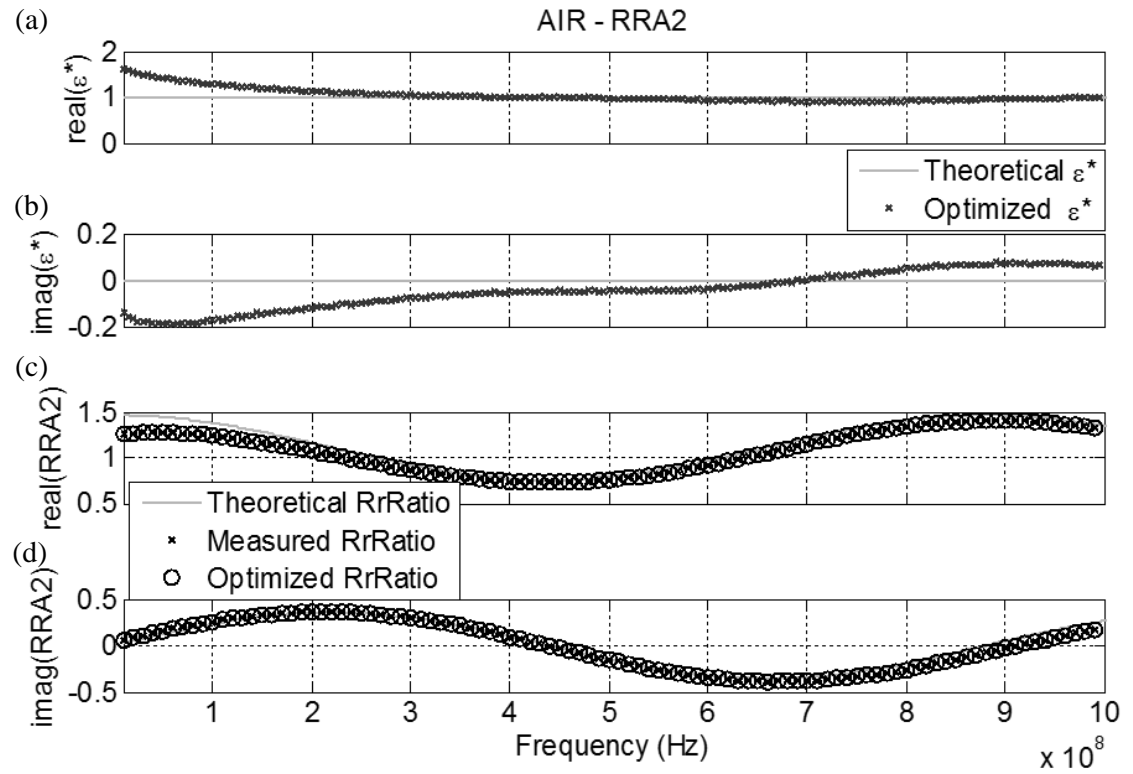


圖 26 RRA2 於空氣之模擬訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

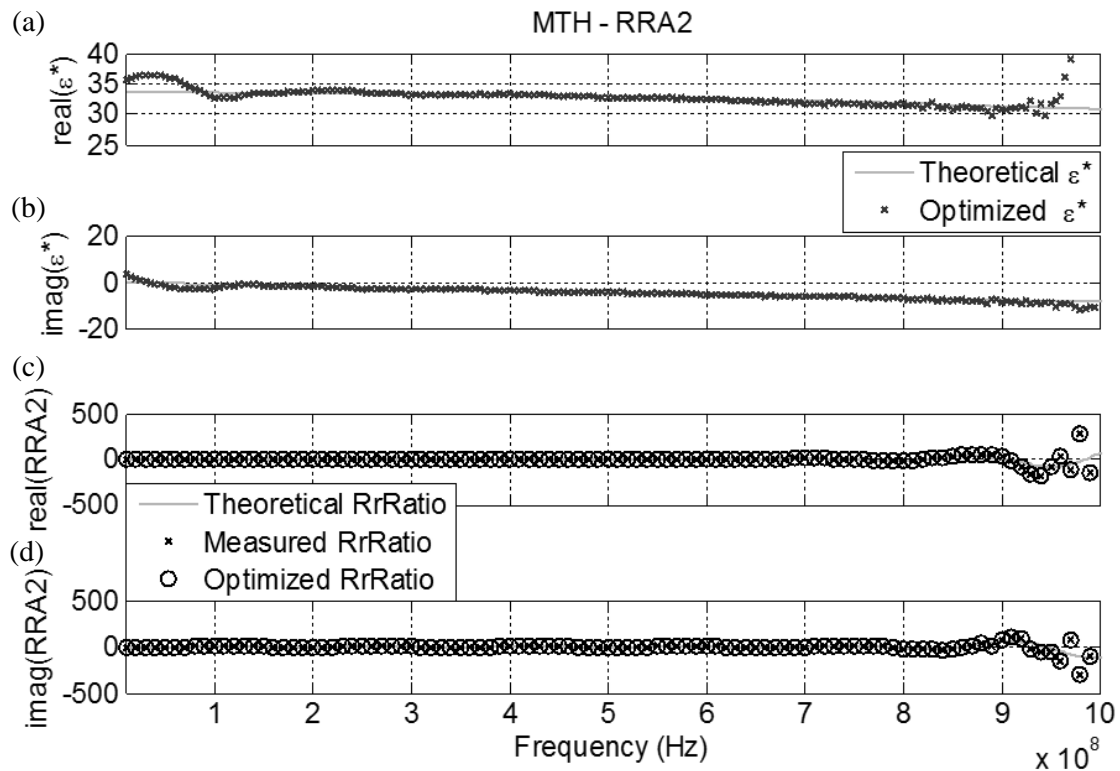


圖 27 RRA2 於甲醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

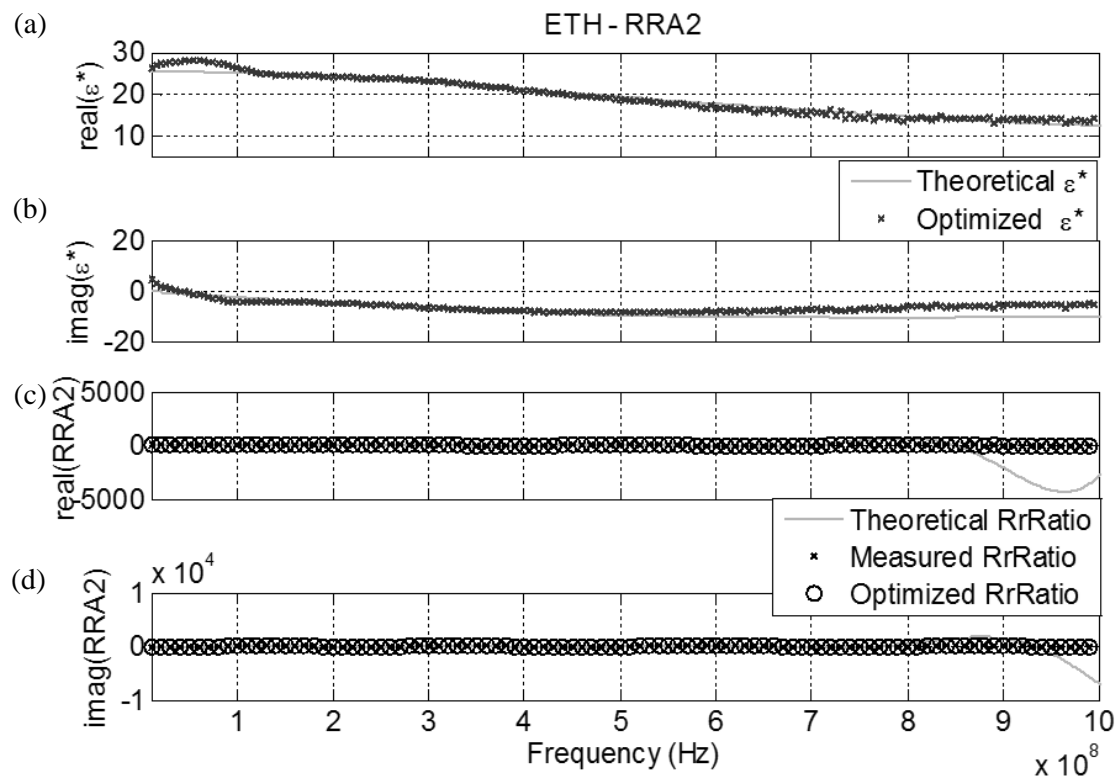


圖 28 RRA2 於乙醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

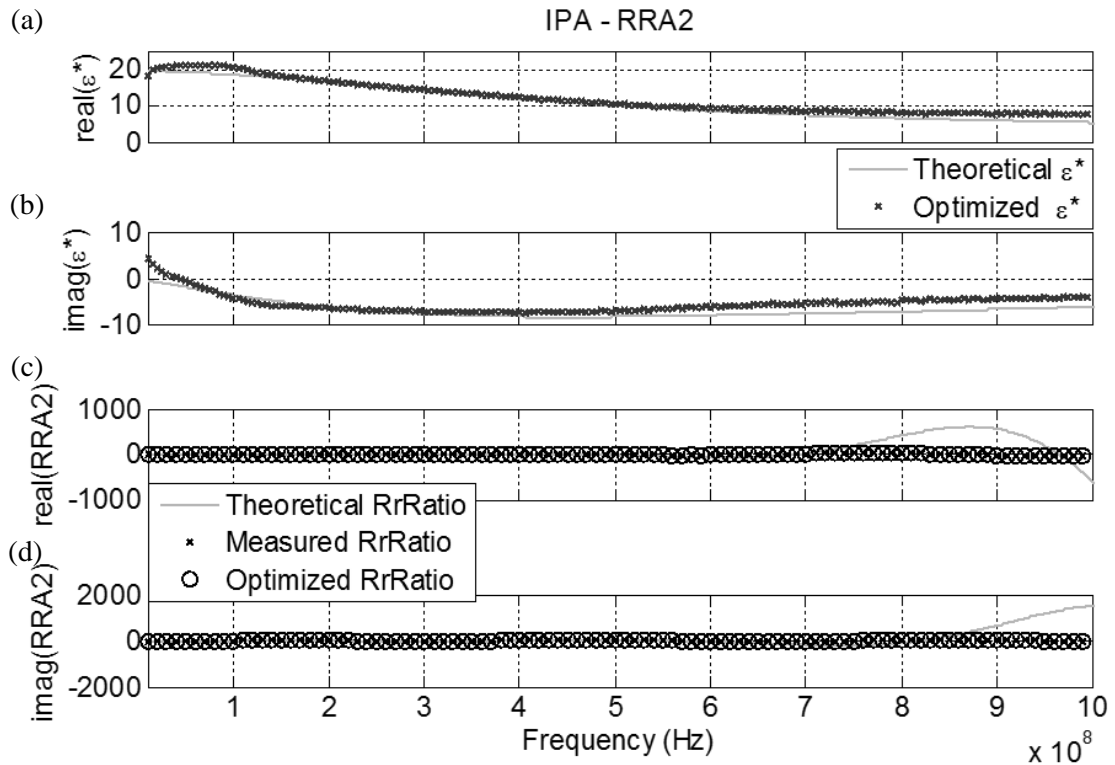


圖 29 RRA2 於異丙醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

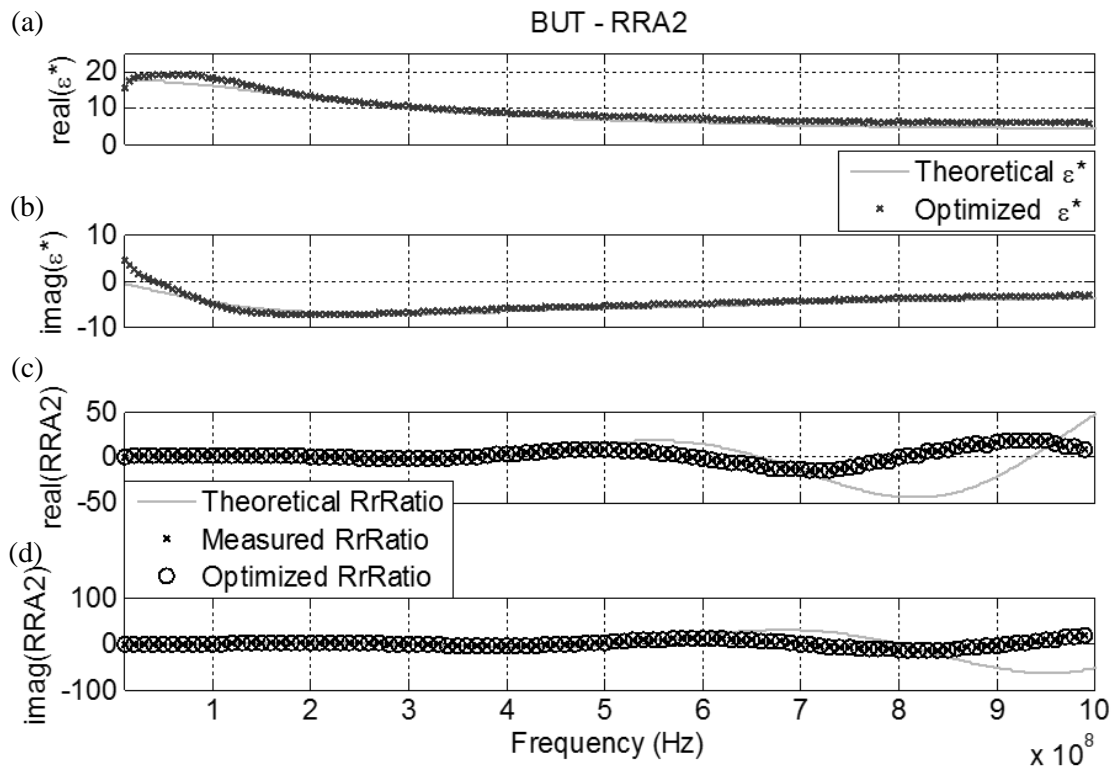


圖 30 RRA2 於正丁醇之模擬訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

### 5.3. 室內試驗驗證

#### 5.3.1. 室內試驗量測系統配置

本研究提出之 RRA 分析方法進一步使用室內試驗波形初步驗證其在現地之適用性。除了數值模擬的八種待測材料，室內試驗因應現場量測可能遭遇之污染物環境，規劃了兩種輕非水相液體（Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL）以及兩種重非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL）。

TDR 複介電頻譜室內試驗量測系統包含一台寬頻 TDR 時域反射儀（頻寬為 3GHz）、一個 N 至 BNC 轉接頭、一個 42 m 長之  $50\ \Omega$  同軸纜線、一個 0.1 m  $50\ \Omega$  阻抗匹配之感測器探頭以及一個 0.17 m 且  $Z_p = 95\ \Omega$  之同軸感測段。所擷取 TDR 訊號之取樣間距為 5 ps 且在室內控溫  $24^\circ\text{C}(\pm 0.4^\circ\text{C})$  的環境下進行。此室內量測系統之感測器針對液態材質設計，採同軸形式且在其外罩開孔方便待測材料流通，其實體及剖面如圖 31 所示。因室內試驗進行時會接觸到具揮發性和毒性物質，量測待測材料之複介電頻譜時皆在抽氣室環境下進行避免操作人員吸入有毒物質，如圖 32 所示。

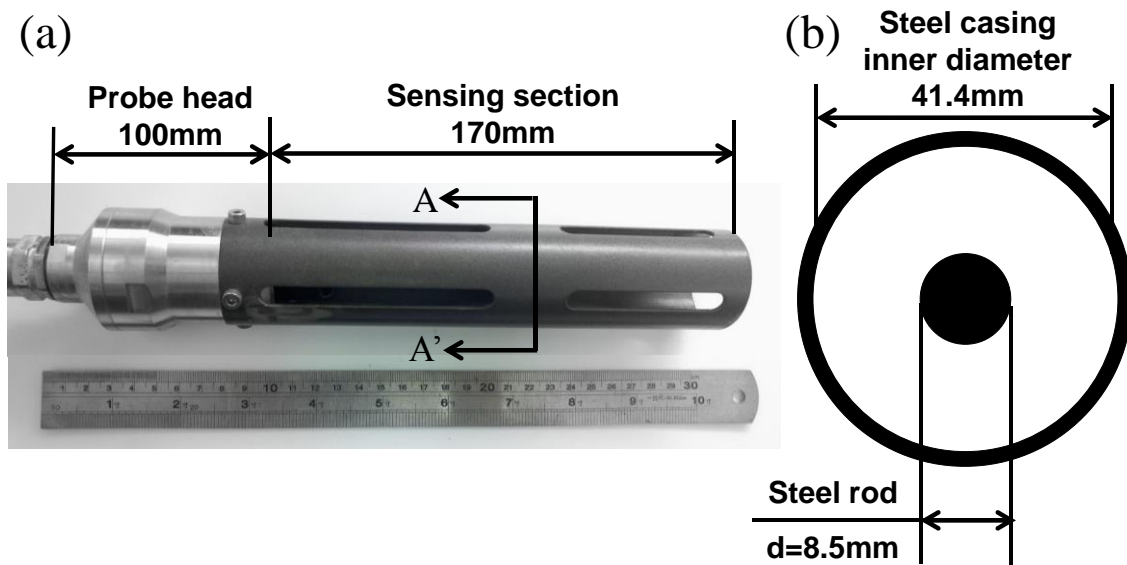


圖 31 (a) TDR 阻抗匹配同軸感測器 (b) A-A'斷面示意圖



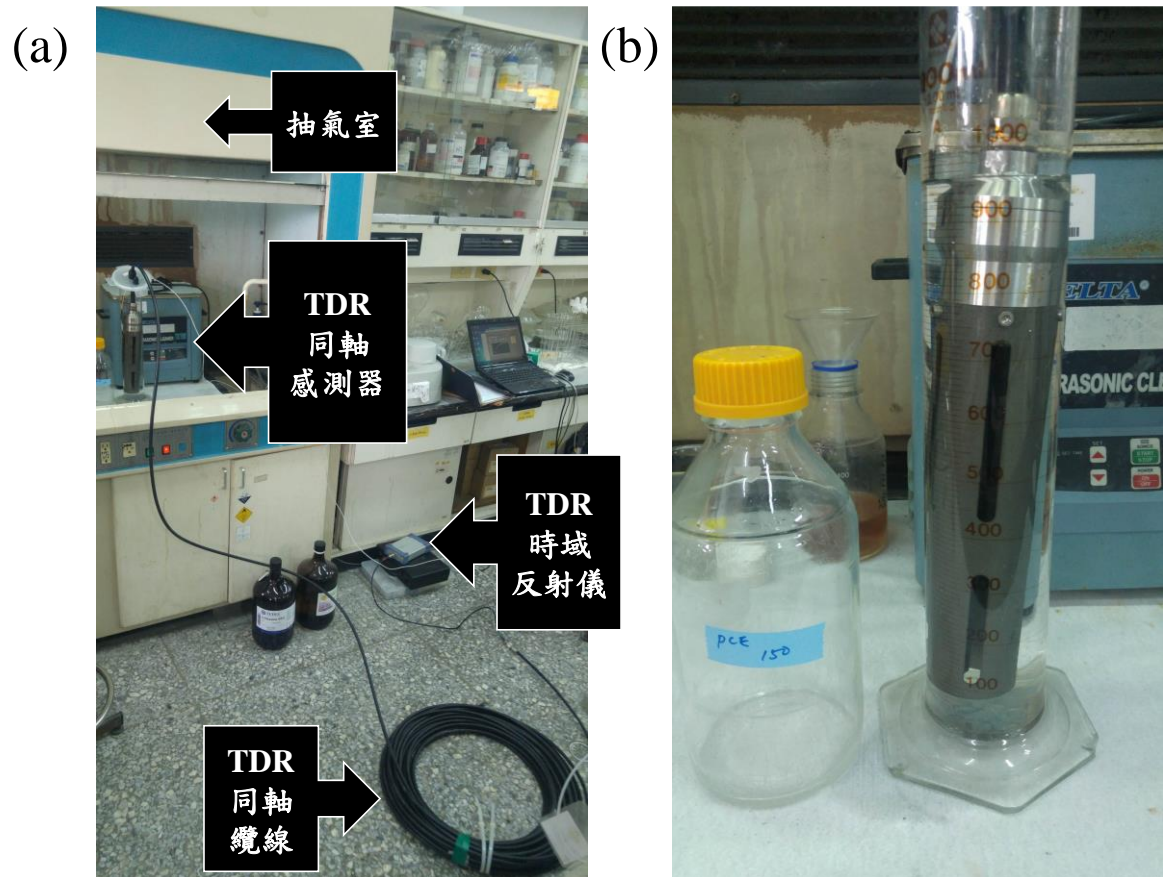


圖 32 (a) 室內試驗量測系統配置 (b) 同軸感測器置入待測材料中

### 5.3.2. 八種待測材料

根據前述實驗配置，本研究擷取了用以對照數值模擬規劃的八種材料之 TDR 時域訊號，其中涵蓋了空氣、清水、醇類以及酮類溶液。該八種待測材料中，前四項為低頻散材料，分別為蒸餾水(distilled water)、自來水(tap water)、丙酮(acetone)、空氣(air)；後四種材料皆為高頻散之醇類，即甲醇(methanol)、乙醇(ethanol)、異丙醇(isopropanol)以及正丁醇(butanol)。所擷取之 TDR 實驗波形如圖 33 所示，低頻散材料與高頻散材料之 TDR 實驗波形分別顯示在圖 33a、b。實驗時域訊號為了呈現簡潔，所顯示之時域波形約為感測器探頭前 1 m 至收錄時間  $2 \times 10^{-7}$  秒處。擷取實驗波形時為了壓抑環境雜訊，擷取之訊號為 12 筆波形疊加之結果。初步觀察擷取之時域波形有部分材料與模擬訊號之穩態值不完全相等，主因為該寬頻 TDR 時域反射儀在擷取波形之一致性不佳，然而並不影響 RRA 分析方法。

實驗首先利用自來水進行感測器長度標定，因其複介電頻譜與溫度效應修正公式廣為應用，在 24°C 自來水中標定之有效感測器長度為 171.60 mm。感測器長度也能直接測量，但精度可能不足以應付高精度之 RRA 複介電頻譜，本研究因此採用一已知複介電頻譜之材料進行系統參數標定。

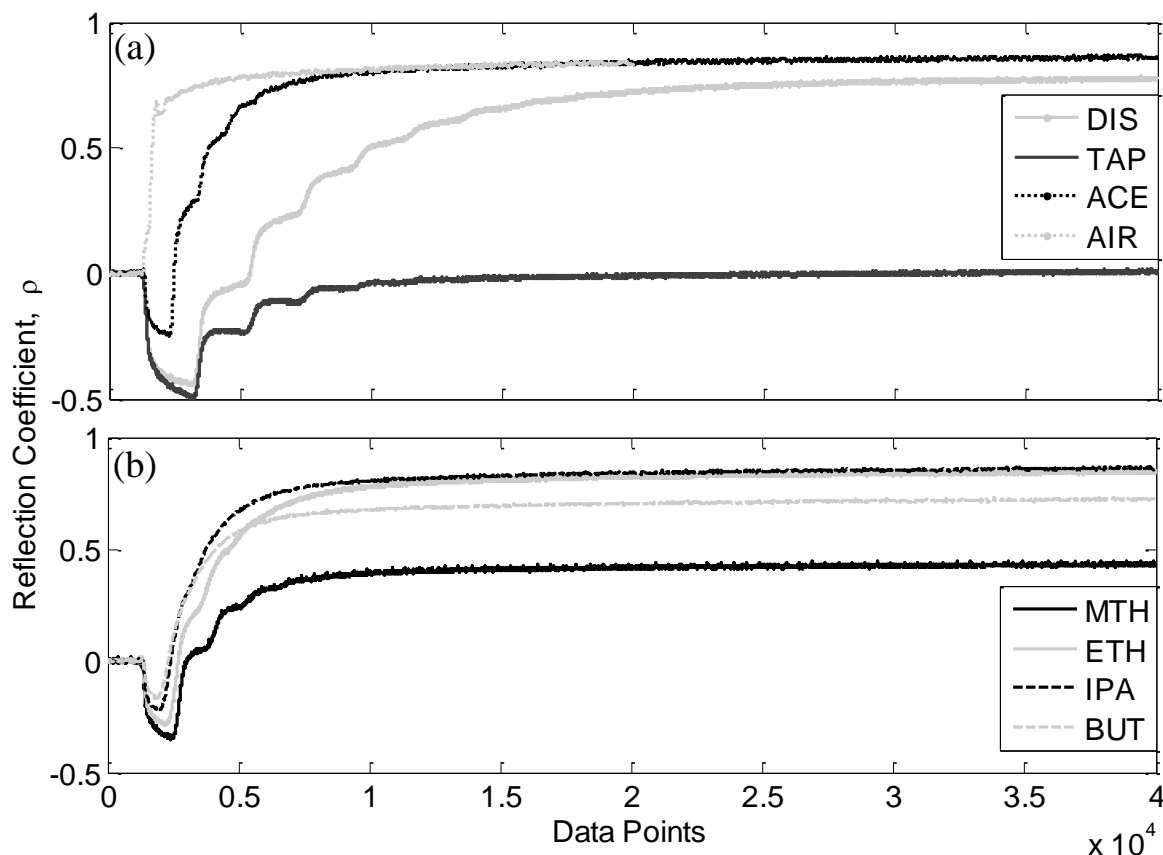


圖 33 表 1 中待測材料之 TDR 實驗訊號。(a)低頻散材料 (b)高頻散材料

### 5.3.2.1. RRA 1 實驗波形驗證

八種待測材料之實驗波形經過 RRA1 分析方法處理後，利用前述最佳化分析搭配疊代初始值方法，在頻率範圍 10 MHz – 1 GHz 之間求得複介電頻譜。圖 34 至圖 41 顯示所有待測材料之複介電頻譜反演結果，發現所有材料在特定頻率段中能正確量測出複介電度真值（以實線標識）。類似於模擬訊號，在實驗訊號中可發現實部與虛部之複介電頻譜在低於 100 MHz 頻率段會有些微錯誤，主要因  $R_1$  訊號斬截限制了可運作波長（workable wavelength）。在高於 100 MHz 後因環境雜訊的存在，且 RRA 訊號處理過程中並無採用任何雜訊濾波或頻率域濾波手段，導致反演之複介電頻譜出現了微幅之振盪。縱然如此，所有材料在有效頻率段之誤差百分比皆落在 2% 誤差百分比以內，屬於可接受之範圍。有效頻率段之下限可代入反演之複介電度與感測器長度進入公式 (36)、(37) 內，即可計算出對應之下限。

丙酮與空氣之介電耗損效應以及導電度效應在 TDR 有效頻率段(10 MHz – 1 GHz)內最小，二者之複介電頻譜相對穩定與數值震盪幅度極小，顯示訊號斬截(signal truncation)與漏磁(leakage)效應非常小。自來水與蒸餾水之有效頻率上限相較於模擬訊號較低，可能因環境雜訊以及前段長傳輸線所致之物理性濾波，導致高頻資料之消失。對於四種醇類材料，因其介電耗損程度較高（其中乙醇與異丙醇較高），使得在 TDR 頻率段內之複介電度變化較大且  $R_1$  訊號之斬截影響較大，導致複介電頻譜在 600 MHz 以後陸續出現錯誤數值。此現象可通過提升訊號之訊雜比，無論是通過波形疊加，雜訊濾波，或者在更低雜訊環境中擷取實驗波形。

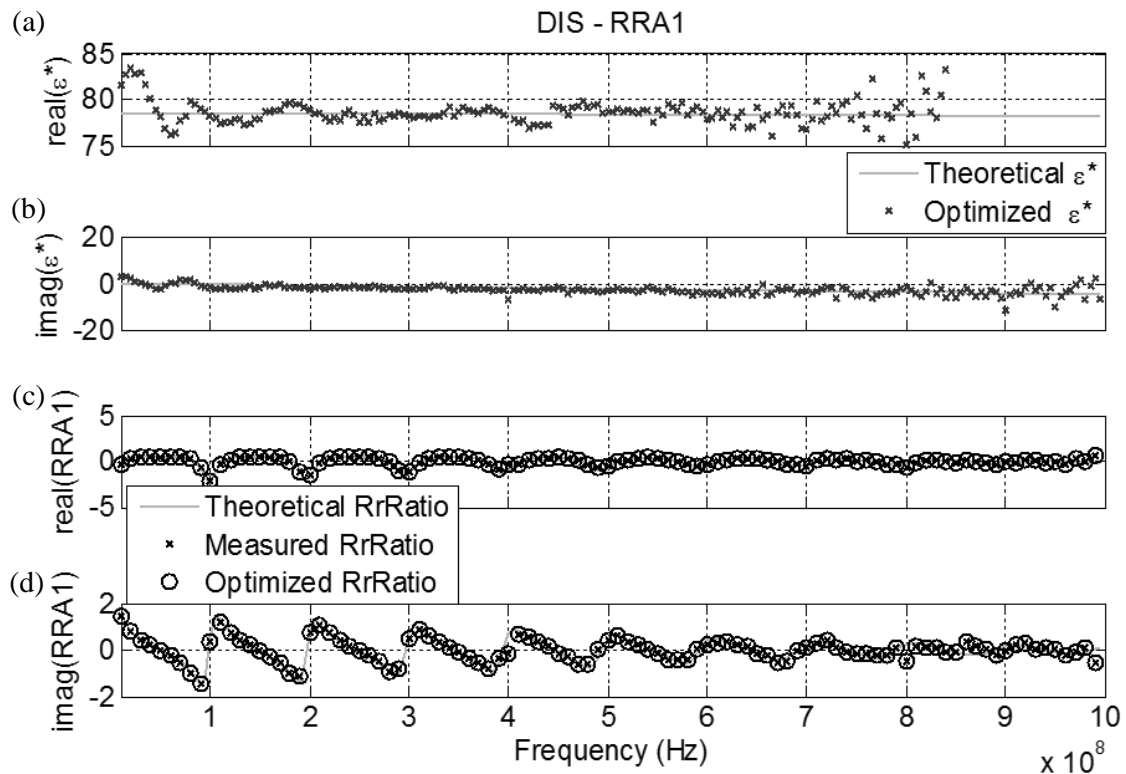


圖 34 RRA1 於蒸餾水之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

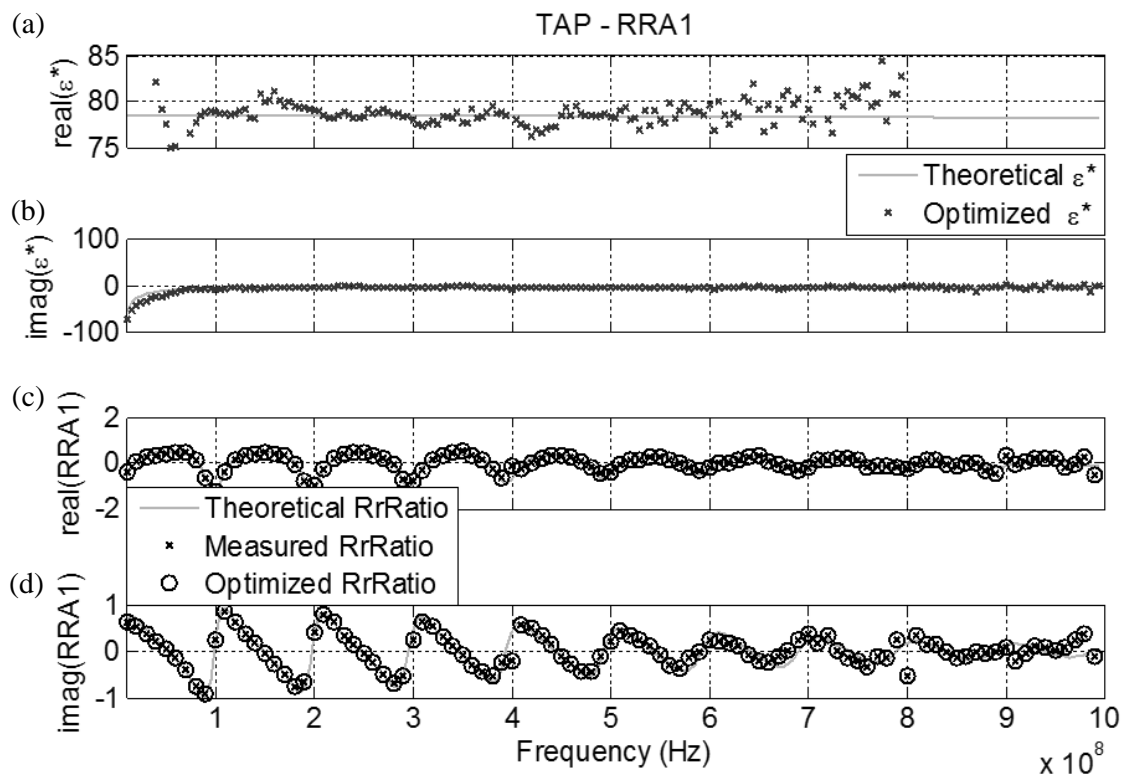


圖 35 RRA1 於自來水之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

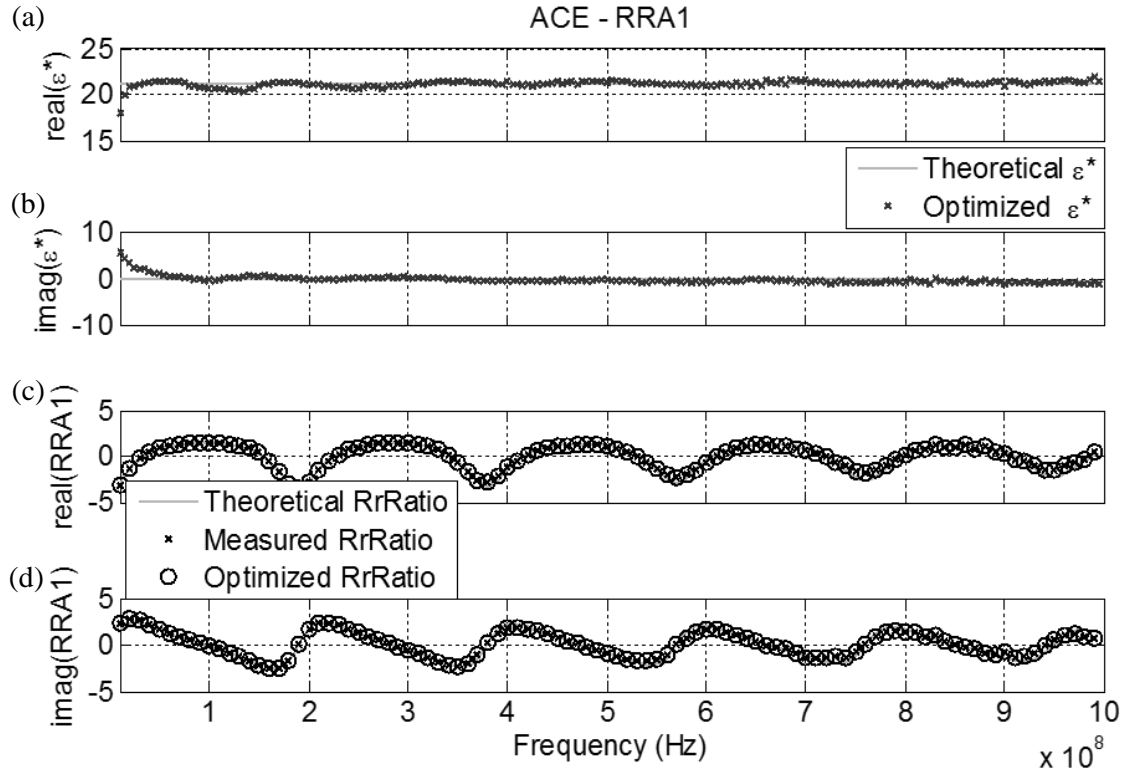


圖 36 RRA1 於丙酮之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

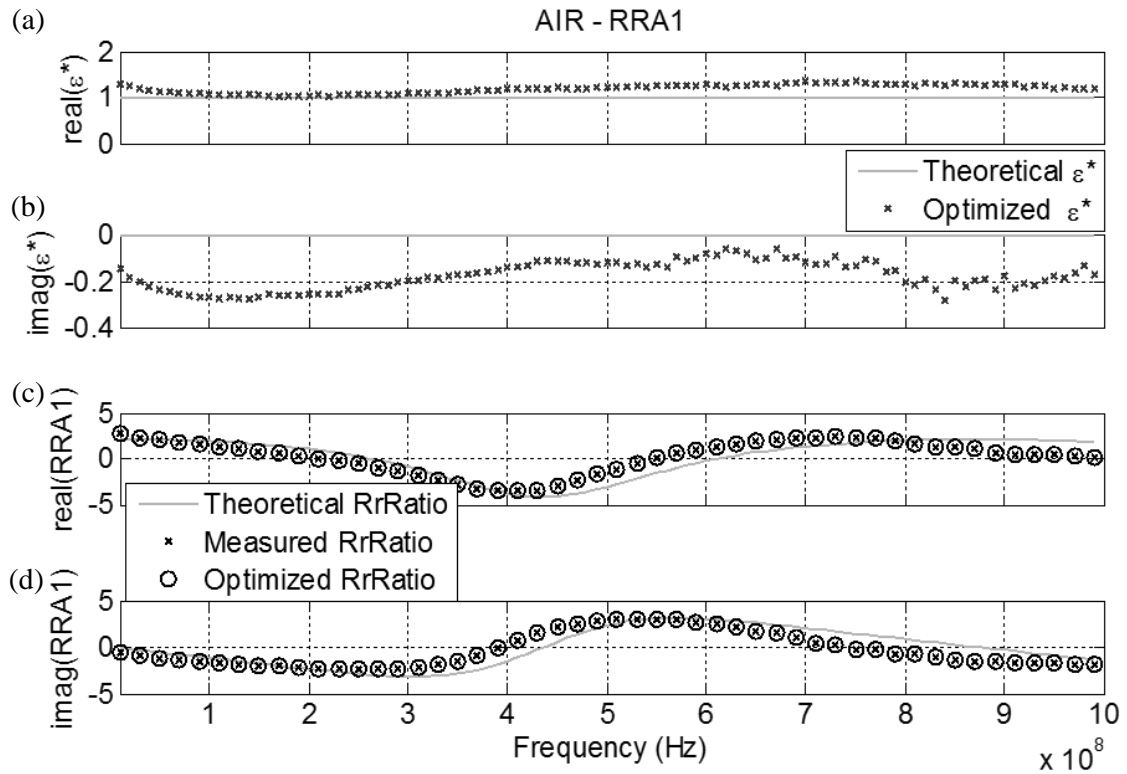


圖 37 RRA1 於空氣之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

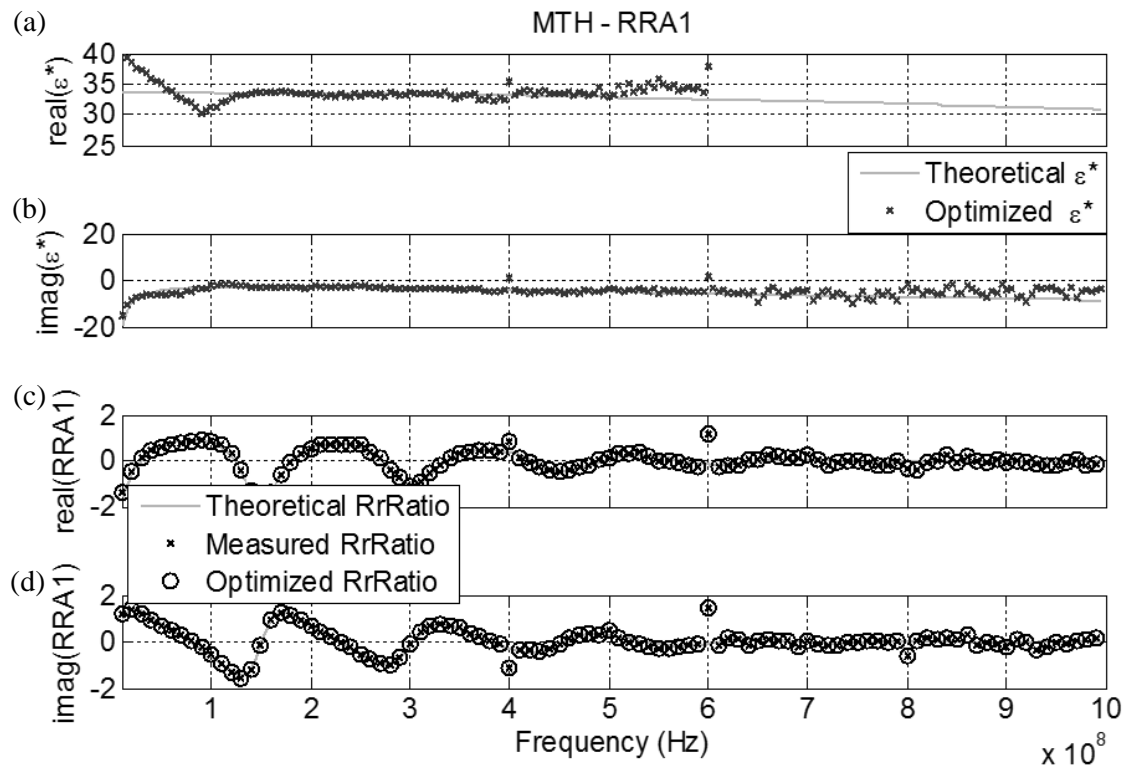


圖 38 RRA1 於甲醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

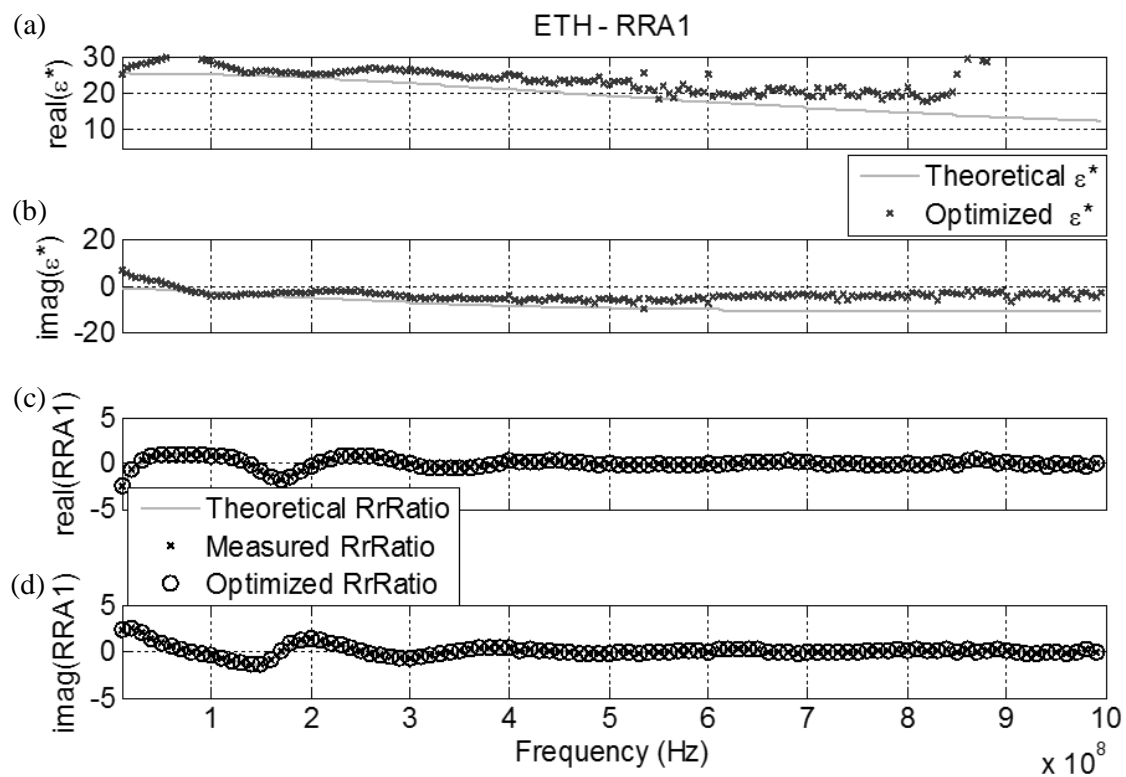


圖 39 RRA1 於乙醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

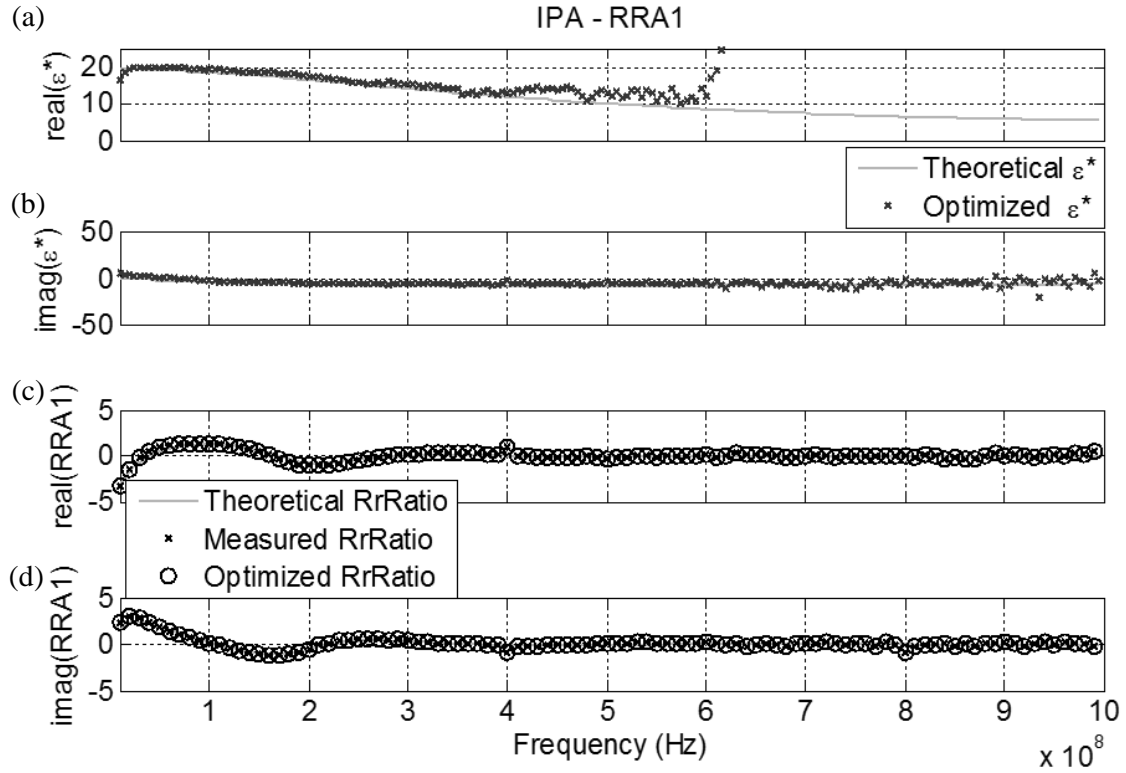


圖 40 RRA1 於異丙醇之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

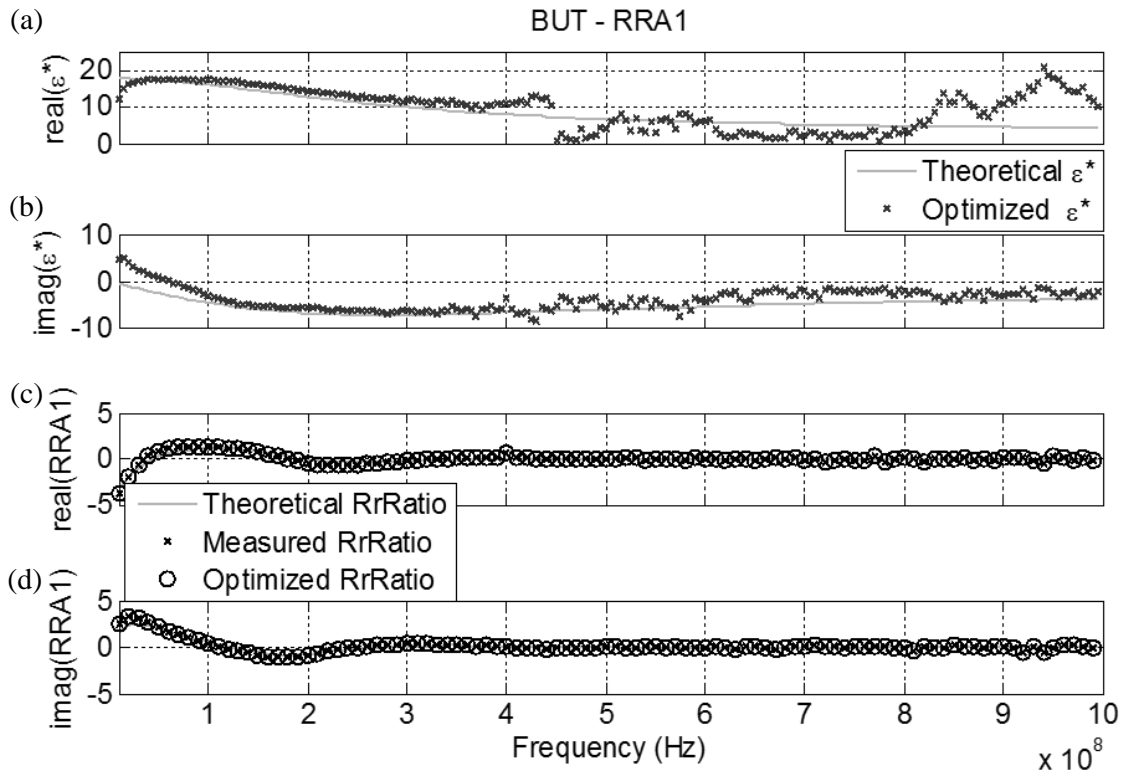


圖 41 RRA1 於正丁醇之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA1 頻譜比之實部; (d) RRA1 頻譜比之虛部。

### 5.3.2.2. RRA 2 實驗波形驗證

相同之實驗波形經過 RRA2 分析方法處理後，同樣利用前述最佳化分析搭配疊代初始值方法在頻率範圍 10 MHz – 1 GHz 之間反演複介電頻譜。各待測材料之複介電頻譜反演結果圖呈現在圖 42 至圖 49，所有材料在其對應之有效頻率段內與實際理論值之誤差百分比落在 2% 誤差百分比，且複介電頻譜中之數值振盪原因如前述之環境雜訊造成。

RRA2 相較於 RRA1 之表現在低頻散材料中幾乎相等，在高介電耗損的醇類材料中其有效頻率段上限則略微下降了數百 MHz。RRA2 頻譜比在高頻時之數值急劇升高，相較低頻增加了幾個數量級，可作為觀察在實驗波形中斬截效應之良好指標。低介電耗損材料，如丙酮、自來水等，其複介電頻譜在 TDR 頻率段內都能正確反演，顯示其訊號斬截或漏磁現象不嚴重。然而在高介電耗損之醇類中，可輕易從所量測之 RRA2 頻譜比開始偏離理論值的頻率段，對應在複介電頻譜數值錯開之處，凸顯出漏磁效應在此發揮之影響，導致在高頻時敏感度大幅降低。RRA1 因在高頻時其頻譜比趨近於零，再搭配疊代初始值方法使得反演後複介電頻譜之有效上限大幅提高，後續可再針對此現象進行進一步之數值模擬探索。

以實驗數據比對模擬資料結果，發現二者間之吻合度高，證明本研究所提出之 RRA 分析方法能有效由 TDR 時域訊號中萃取出複介電頻譜資訊，並通過簡易系統標定即可達到標的。基於此 RRA 表現，本研究針對有機污染物中 LNAPL 和 DNAPL 之 TDR 時域波形進行 RRA 複介電頻譜反演。



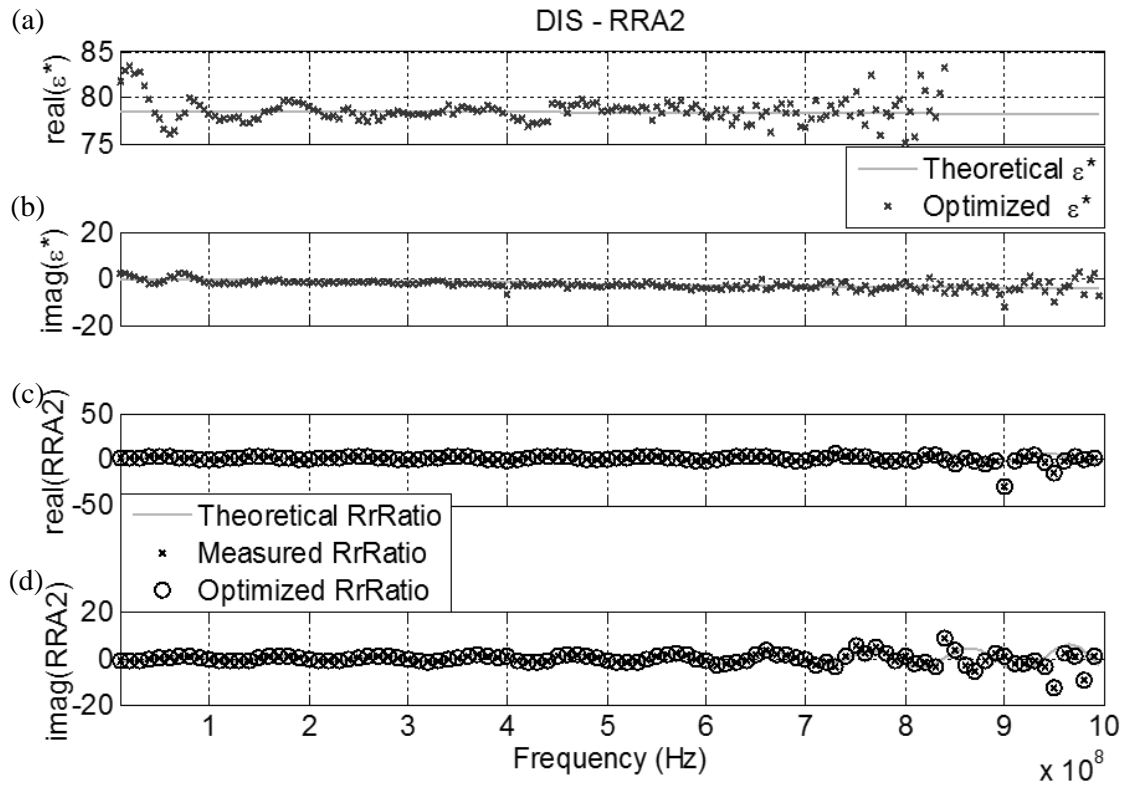


圖 42 RRA2 於蒸餾水之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

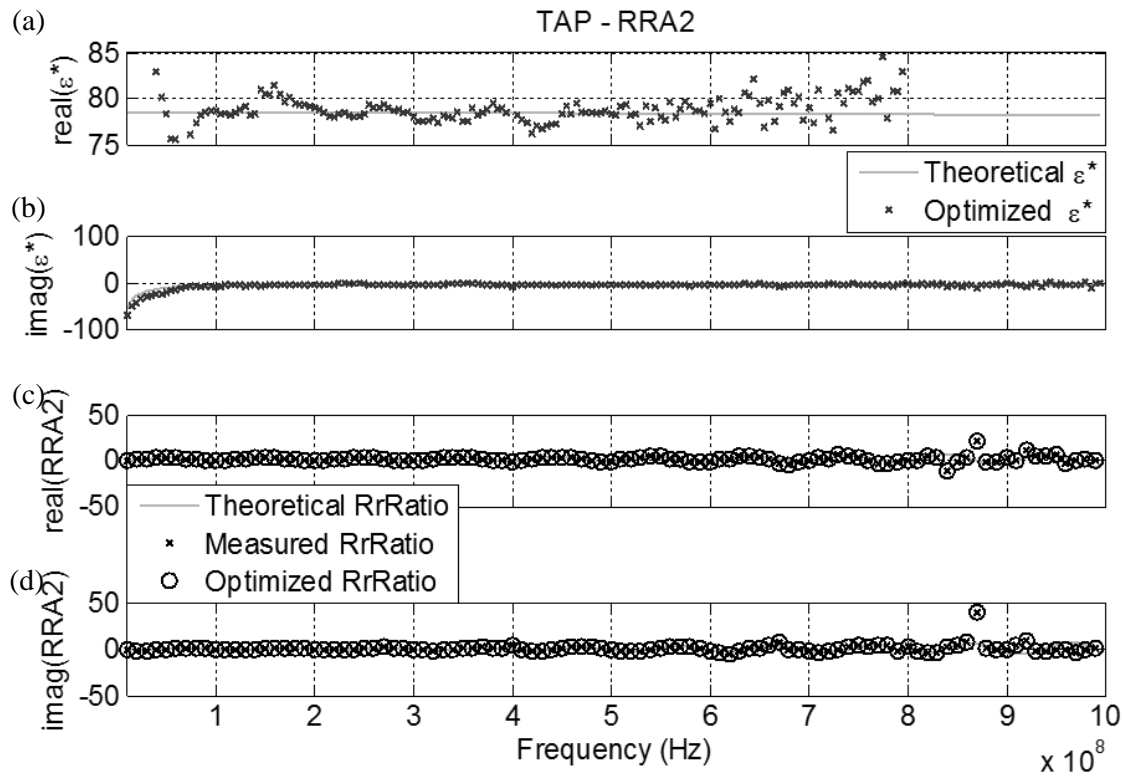


圖 43 RRA2 於自來水之實驗訊號: (a)  $\varepsilon^*(f)$  實部; (b)  $\varepsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

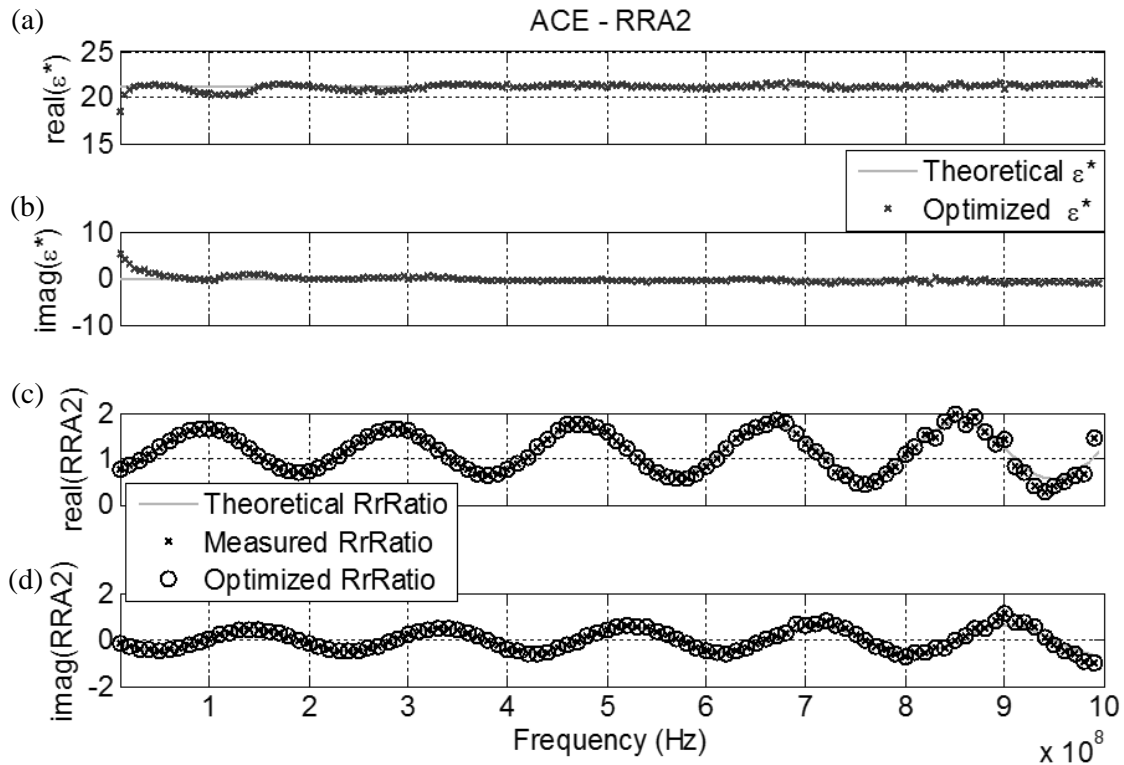


圖 44 RRA2 於丙酮之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

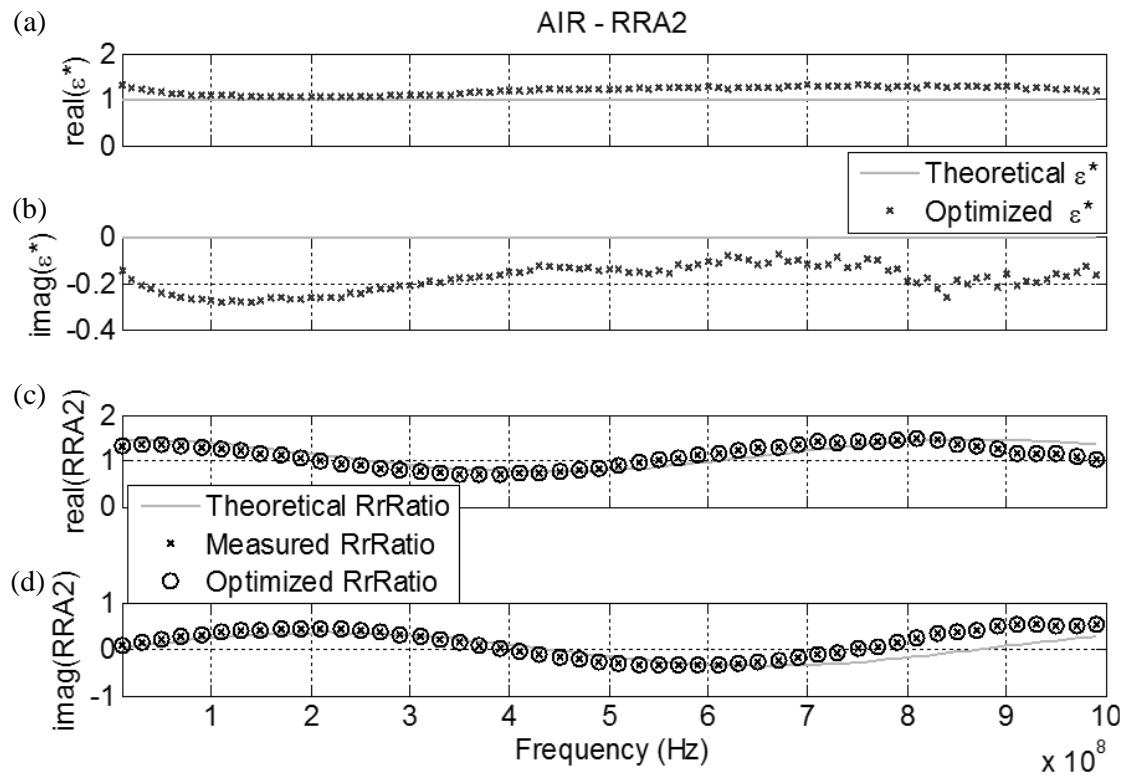


圖 45 RRA2 於空氣之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

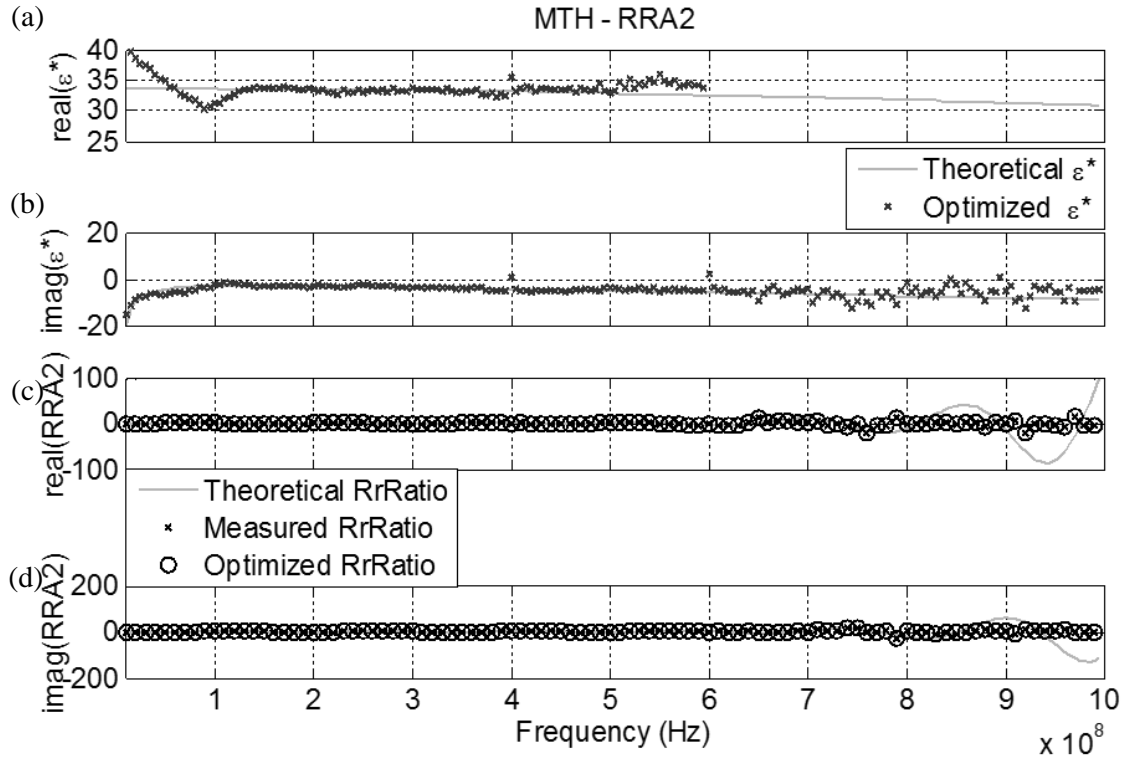


圖 46 RRA2 於甲醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

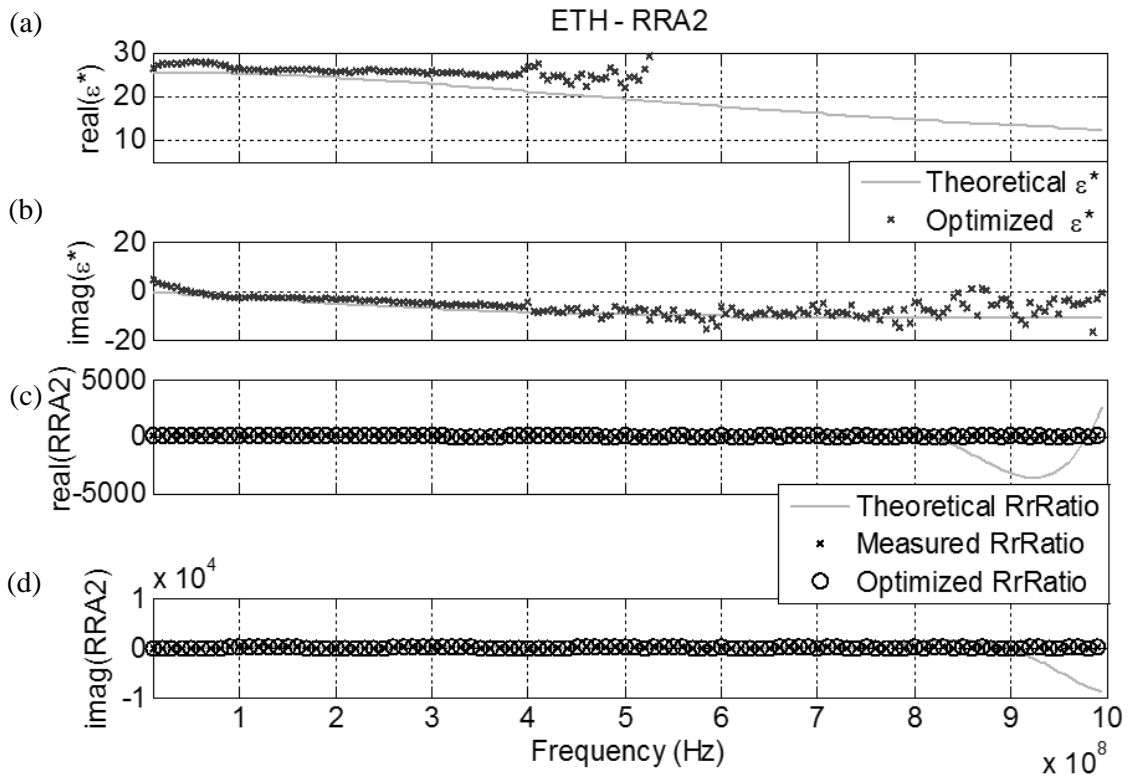


圖 47 RRA2 於乙醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

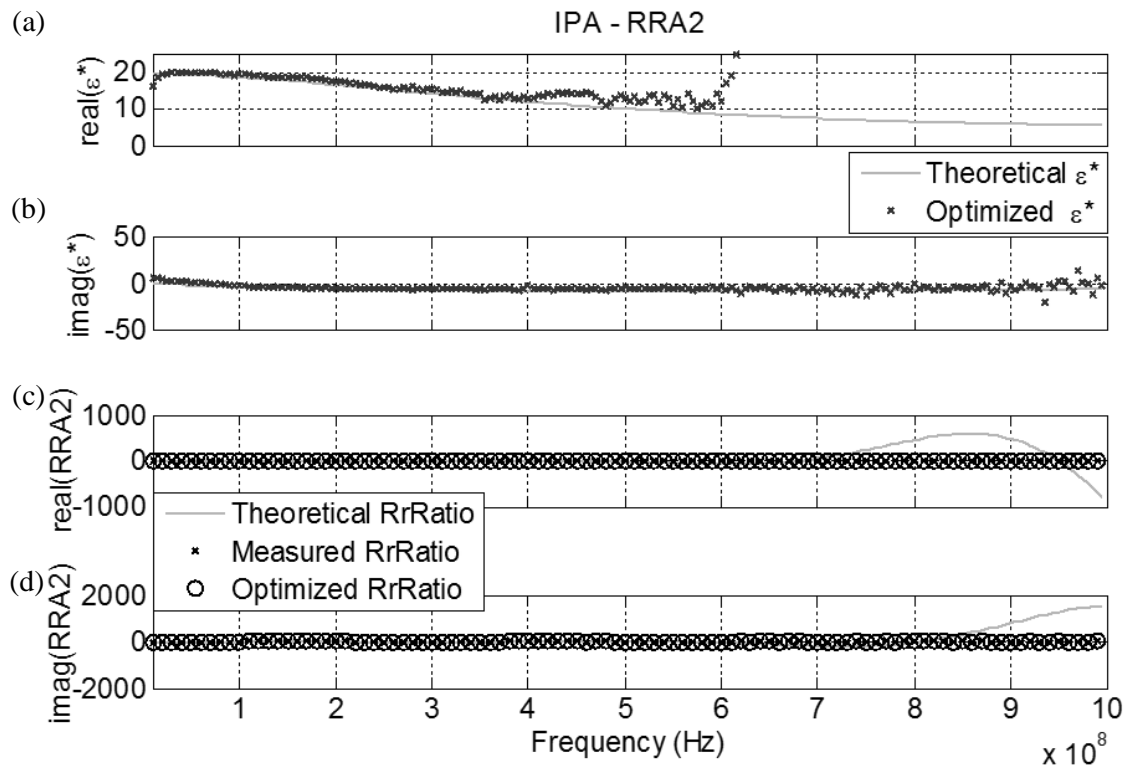


圖 48 RRA2 於異丙醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

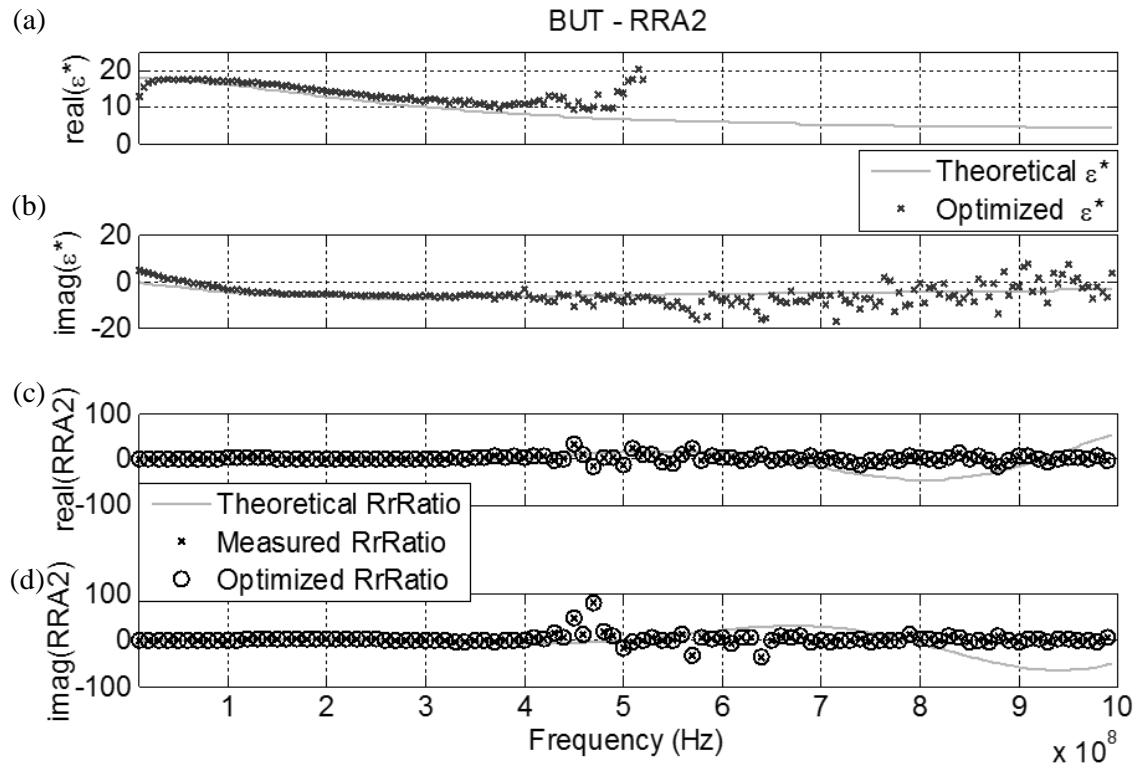


圖 49 RRA2 於正丁醇之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部; (c) RRA2 頻譜比之實部; (d) RRA2 頻譜比之虛部。

### 5.3.3. 有機汙染物 - 輕非水相液體 LNAPL

本研究規劃了兩種輕非水相液體 (Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL)，分別為 92 無鉛汽油以及柴油。此二 LNAPL 皆購自台灣中油之新鮮油品，使用同樣之實驗配置進行 TDR 訊號擷取。由圖 50 可見，92 無鉛汽油與柴油之時域訊號在前段幾乎重疊，在第二次反射訊號以後直到穩態值才略為分開，實際以導電度計量測其導電度皆為  $0\mu\text{S}/\text{cm}$ ，並無太大差異。採用 RRA2 分析方法搭配疊代初始值方法進行最佳化分析後獲得複介電頻譜之實部與虛部分別顯示在圖 51a、b 中。在實部方面有約為 0.1 介電度差別且趨勢略微相同，而虛部介電頻譜則在 350-400 MHz 之間有微幅差異。套疊二者各 6 筆實測資料後發現各筆資料在該處皆有重疊且趨勢相同，應為 92 無鉛汽油與柴油之實際介電行為。

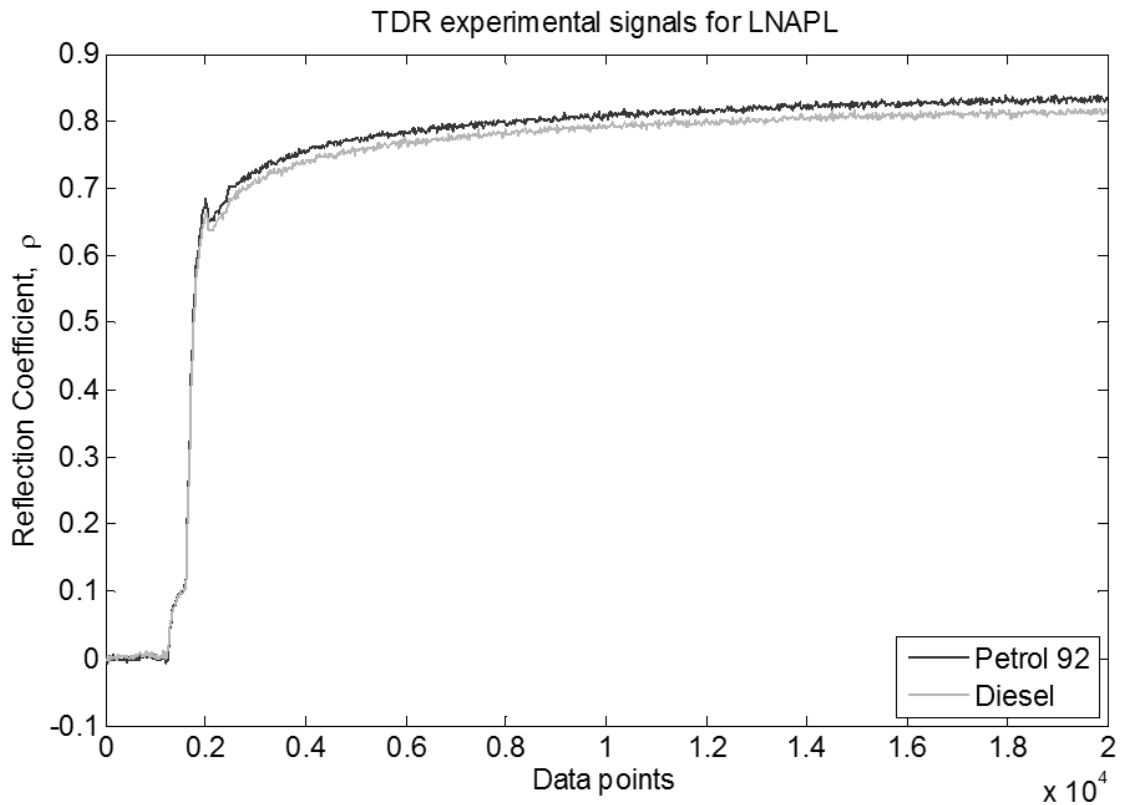


圖 50 LNAPL 之 TDR 實驗訊號。

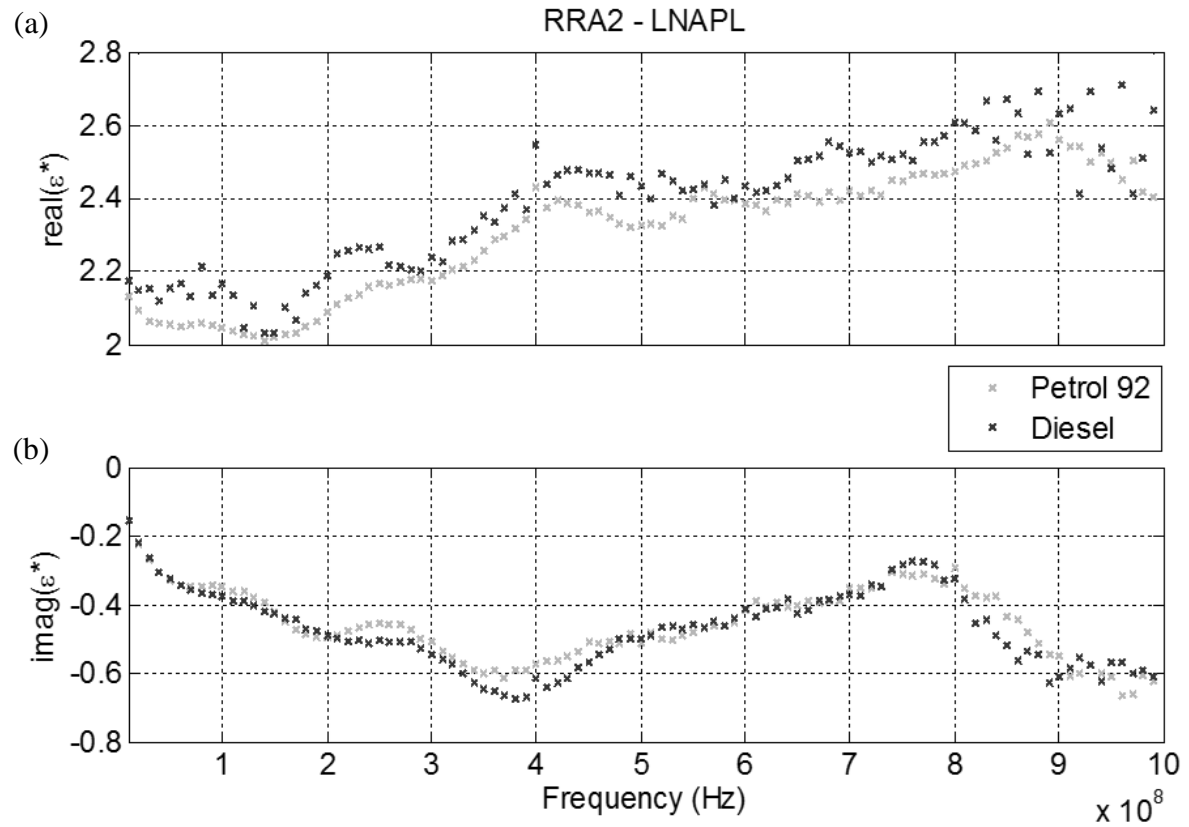


圖 51 RRA2 於 LNAPL 之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$ 實部; (b)  $\epsilon^*(f)$ 虛部。

#### 5.3.4. 有機污染物 - 重非水相液體 DNAPL

本研究規劃了兩種重非水相液體 (Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL)，分別為三氯乙烯 (Trichloroethylene, TCE) 以及四氯乙烯 (Perchloroethylene 或者 Tetrachloroethylene)，PCE)。因此二材料為國內常見之 DNAPL 有機污染物，為了預備現地試驗而選擇其作為室內試驗參考數據。這兩種物質之純相(pure phase)物質不易取得，本研究取其在飽和溶液內作為複介電頻譜探測目標。行政院環境保護署公告之『地下水（第二類）污染管制標準』為 TCE、PCE 濃度皆不可超過 0.05mg/L (1 mg/L=1 ppm)。本研究因此規劃之 TCE 濃度為 0.05 ppm、5ppm、1000ppm (TCE 飽和溶液)，而 PCE 之濃度則為 0.05 ppm、5ppm、150ppm (PCE 飽和溶液)。

圖 52 為 TCE 之 TDR 時域訊號，可見在低濃度時之時域波形幾乎重疊，在高濃度之飽和溶液才出現較明顯之變化。同樣以 RRA2 分析方法搭配疊代初始值方法進行最佳化分析，求得其複介電頻譜如圖 53 所示。隨著 TCE 溶液濃度升高，複介電頻譜實部並無太顯著之差異，只有微幅上升。複介電頻譜虛部則可發覺隨著濃度增加其高頻介電耗損程度增加，受導電度影響之低頻段也跟著增加（圖中負值即為等值介電耗損程度增加）。

PCE 之 TDR 實驗波形如圖 54 所示，與 TCE 之情況類似，低濃度時時域波形幾乎重疊直到高濃度飽和溶液才出現變化。以 RRA2 分析 PCE 時域訊號取得圖 55 之複介電頻譜，一樣可觀察到其實部並無太顯著之差異，也是微幅上升。複介電頻譜虛部顯示隨濃度增加其高頻介電耗損程度略微增加，受導電度影響之低頻段也跟著增加（影響頻率段約為 200 MHz 以下）。比對 TCE 和 PCE 二者之複介電頻譜，PCE 虛部之介電耗損在低濃度時已較 TCE 低。

本研究後續規劃有機污染物在飽和土壤中之反應，藉以了解有機污染物在地下水環境中之電學特徵。

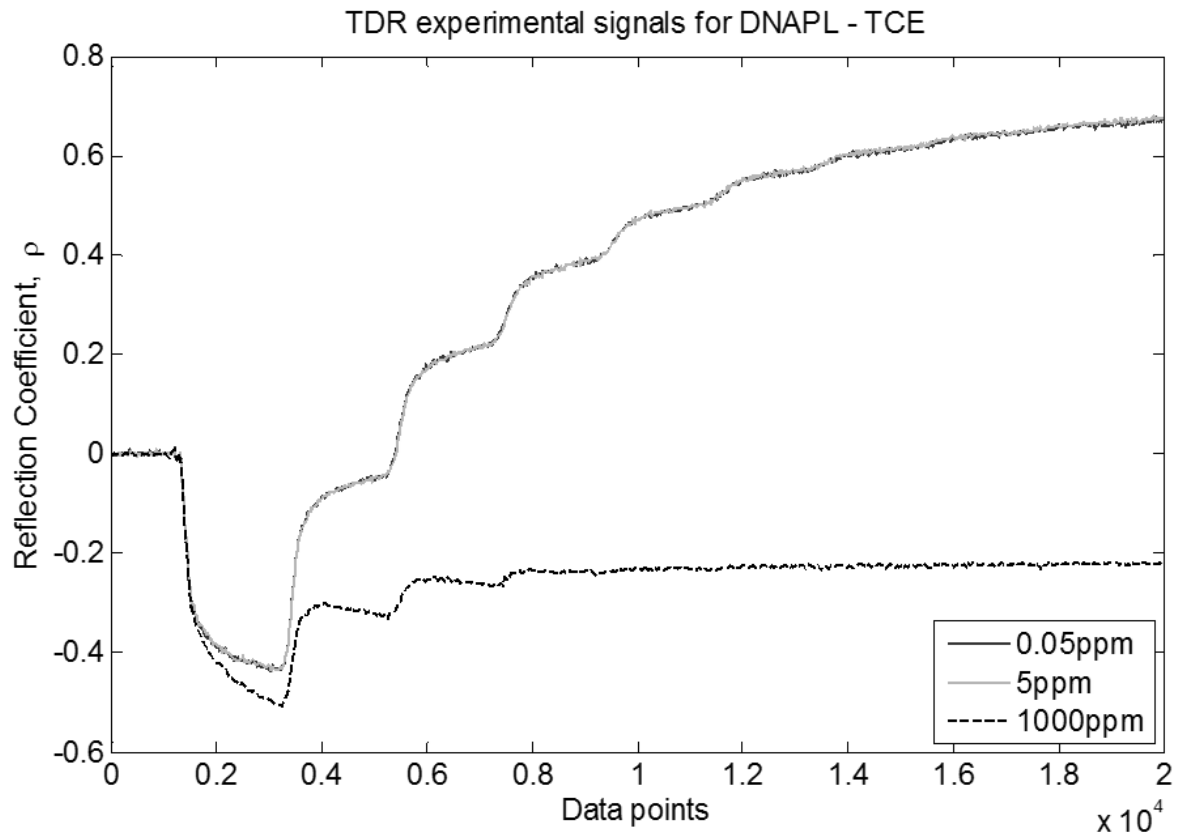


圖 52 DNAPL – TCE 之 TDR 實驗訊號。

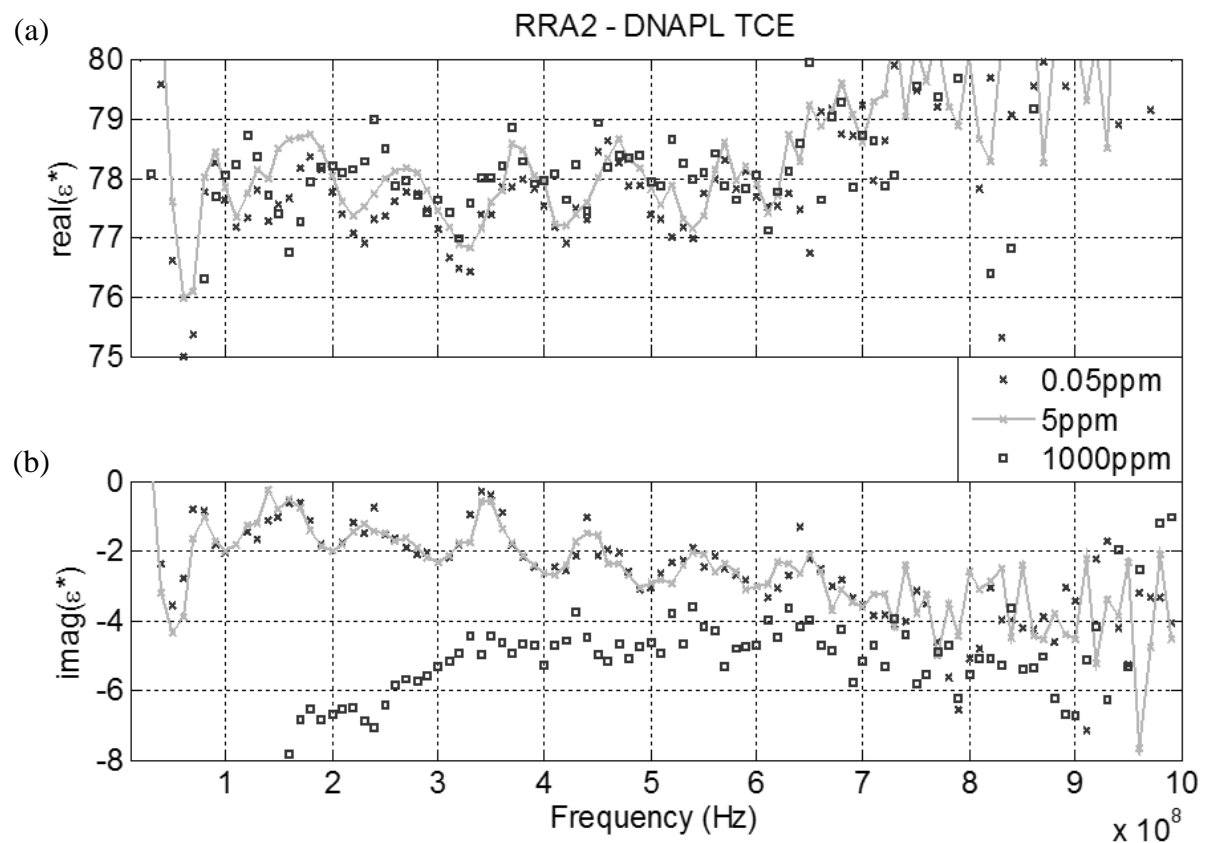


圖 53 RRA2 於高濃度 TCE 溶液之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部。



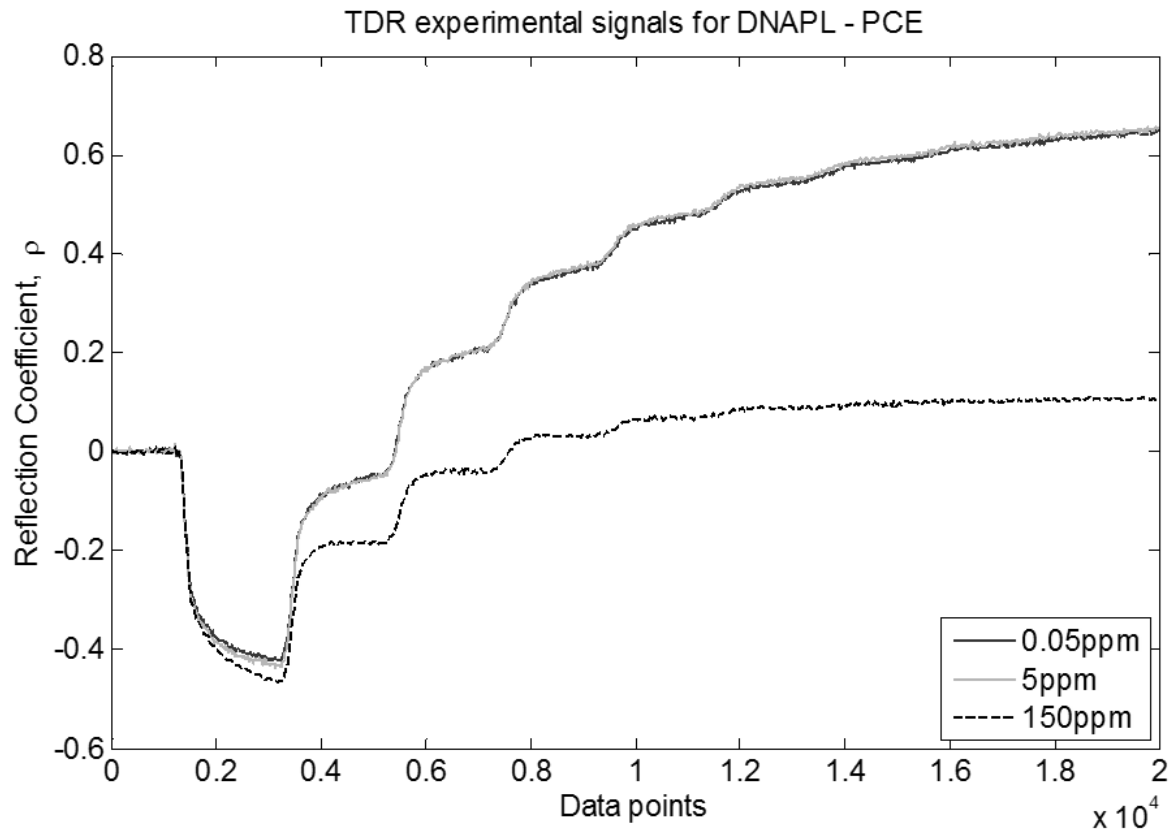
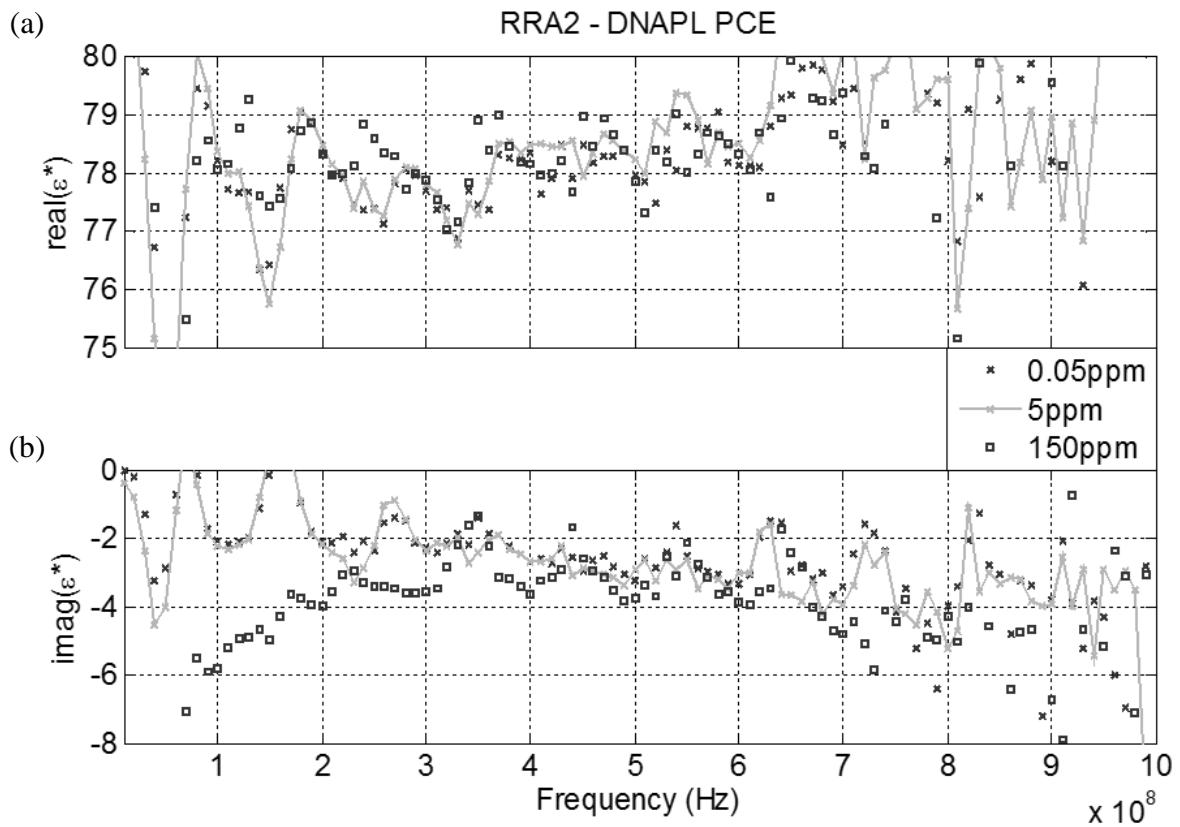


圖 54 DNAPL - PCE 之 TDR 實驗訊號。

圖 55 RRA2 於高濃度 PCE 溶液之實驗訊號: (a)  $\epsilon^*(f)$  實部; (b)  $\epsilon^*(f)$  虛部。

### 5.3.5. 室內土壤試驗量測系統配置

了解相對單純之純相溶液與有機污染物飽和溶液的介電行為後，本研究進一步探討非污染與污染土壤之介電頻譜。然因前述試驗配置在貫入土中時較為困難，本研究將原有同軸式感測器改為適用在土壤夯模上之改良同軸感測器，可預先在夯實模具中備妥土壤試體後，再釘入感測器內導體與作為外導體之夯實模具形成一個改良版之土壤同軸感測器。此配置可同時控制土壤密度、體積與確保感應範圍局限在該夯實模具中。

此土壤同軸感測器與前述試驗配置相仿，包含一台寬頻 TDR 時域反射儀（頻寬為 3GHz）、一個 N 至 BNC 轉接頭。量測系統主要差異在於傳輸線更改為 10m 長之  $93\ \Omega$  同軸纜線、兩段分別長 75mm 與 37mm 之阻抗匹配感測器探頭、一段長 116.5mm 且  $Z_p = 152\ \Omega$  之土壤同軸感測段。該感測段之內導體為一直徑 8.5mm 長 144.5mm 之不銹鋼探針，外導體則為直徑 101.5mm 之金屬夯實模具，其實體及剖面如圖 56 所示。所擷取 TDR 訊號之取樣間距為 5 ps 且在室內控溫  $25^\circ\text{C}(\pm 0.2^\circ\text{C})$  的環境下進行，實際操作過程如圖 57 中所示，先在夯實模具中備妥土壤試體，再插入內導體與放置上端金屬探頭量測該土壤之介電頻譜。此土壤同軸感測器設計能良好的控制土壤試體密度與體積，並可避免在量測過程中土壤含水量因蒸散效應而有劇烈變化。

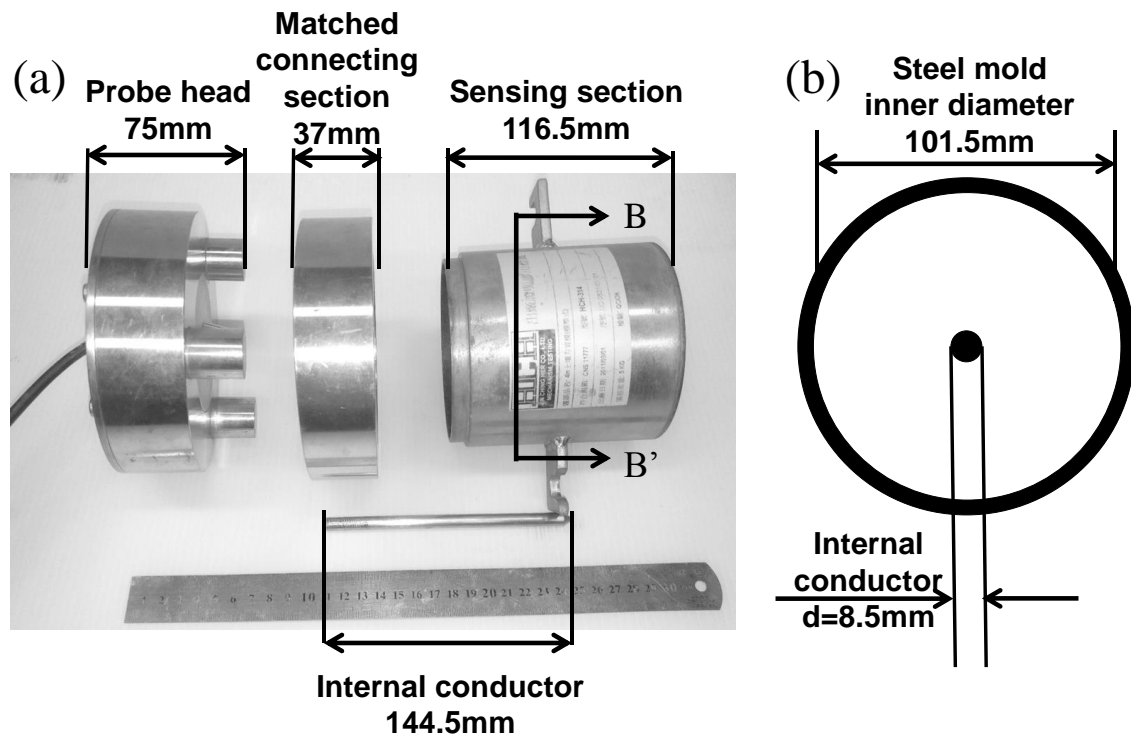


圖 56 (a) TDR 土壤同軸感測器 (b) B-B'斷面示意圖

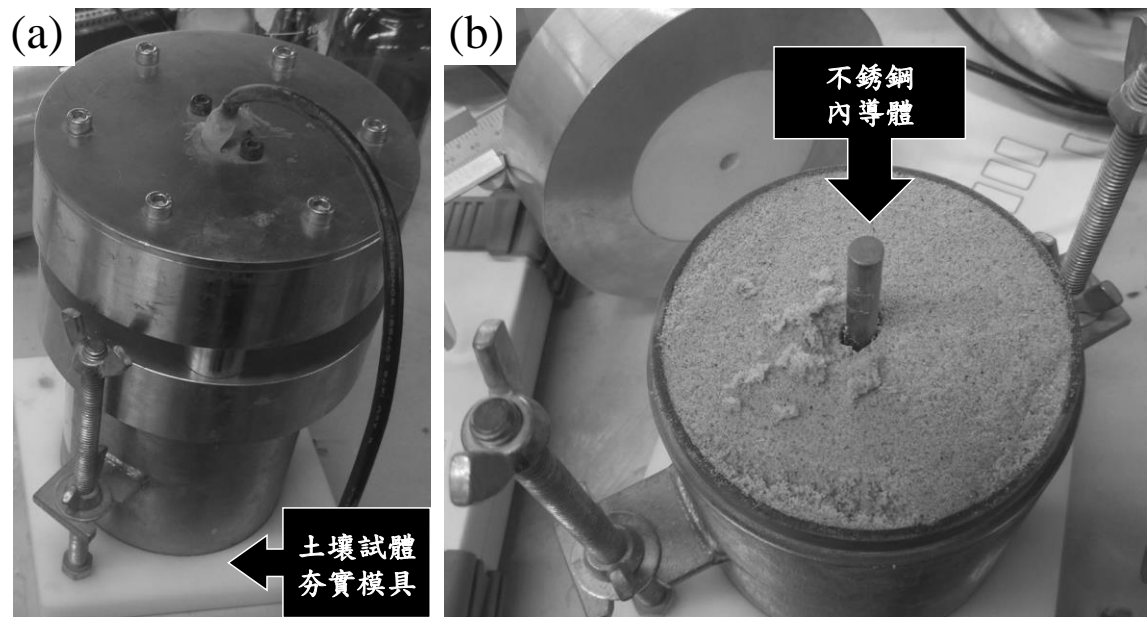


圖 57 室內土壤試驗量測系統配置 (a)土壤同軸感測器量測示意圖 (b)在備妥之土壤試體中插入內導體準備量測

### 5.3.6. 污染與非污染土壤

掌握相對單純之純相溶液與有機污染物飽和溶液的介電行為後，本研究進一步將有機污染物加入土壤中，探討有機污染物與土壤混合後之綜合介電頻譜。本研究採用之有機污染物為柴油，其為常見之輕非水相液體，可能出現在受污染之加油站或機場周遭。行政院環境保護署公告之『土壤污染管制標準』為總石油碳氫化合物（Total petroleum hydrocarbons, TPH）之管制標準值為 1000 mg/kg。本研究因而規劃了三種土壤含水量狀況下，分別與 0mg/kg 以及 1000mg/kg 的柴油混合之重模土壤，藉以觀察其綜合介電頻譜。為維持污染土壤混合後之均勻度且考量達到飽和度之難易度，採用通過 100 號篩（粒徑小於 0.15mm）之細砂（顆粒比重  $G_s=2.7$ ）作為試驗土壤。

因有機污染物在土壤內之綜合介電行為在實驗進行前仍屬未知，本研究採用三種土壤含水量模擬現地可能出現之情形，即完全乾燥土壤(飽和度=0%)、非飽和土壤、飽和土壤(飽和度 $\approx 100\%$ )。實驗中盡量控制其乾密度介於 1.4 至 1.6g/cm<sup>3</sup>之間，以避免前述乾密度對介電頻譜之影響。土壤與污染物拌合順序為先調配該土壤之含水量，再加入對應之柴油濃度攪拌。實驗中測得之重量含水量、飽和度、濕密度、乾密度、孔隙比等土壤物理參數皆列在表 2 中。

表 2 污染與非污染土壤之物理參數

土壤 編號	柴油濃度 (mg/kg)	重量 含水量 w (%)	飽和度 Sr (%)	濕密度 $\rho_{bulk}$ (g/cm <sup>3</sup> )	乾密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	孔隙比 e
1	0	0.00	0.00	1.4540	1.4540	0.8570
2	1000	0.00	0.00	1.4823	1.4823	0.8215
3	0	10.50	30.71	1.5515	1.4041	0.9230
4	1000	10.10	30.09	1.5594	1.4164	0.9063
5	0	31.00	99.88	1.9244	1.4690	0.8380
6	1000	32.00	96.84	1.8835	1.4269	0.8922

由前述非污染土壤中可發現，若乾密度差異小，則其對於土壤介電頻譜之影響可忽略而無需進行修正。上表中之乾密度皆介於 1.4 至 1.5g/cm<sup>3</sup>之間，量測之介電頻譜皆未針對乾密度進行正規化修正。以上六種土壤經 TDR 量測系統擷取之實驗訊號如圖 58 所示，除了飽和細砂以外，實際上直接由時間域 TDR 波形不易分辨出感測端暫態波形(transient)差別，但可由穩態(steady state)波形判斷含柴油之污染土壤之導電度相較乾淨土壤高。

圖 59、圖 60、圖 61 分別為完全乾燥(土壤 1、2)、非飽和(土壤 3、4)、飽和細砂(土壤 5、6)使用 RRA 分析之複介電頻譜結果。該三圖之(a)小圖中標上之虛線為利用公式(37)推估之受感測器長度影響之有效頻率段，協助判斷高頻較為可信之區域。另外(c)小圖中的”O”與”X”重合度良好，代表 RRA 在最佳化過程中數值穩定性良好且都收斂到相對正確之複介電頻譜組合。

比較三圖之(b)小圖，即各土壤介電頻譜之虛部皆可發現含柴油污染土壤相較於乾淨土壤在 800-900MHz 有特徵分岔現象。在乾燥細砂中有效頻率段因感測器長度和該土壤本身介電常數較小導致其較短，所幸 800MHz 仍處於有效頻率段內，且觀察到污染土壤在虛部在該處較高（此處虛部負數越大則介電損失現象較明顯），主要因柴油在此乾燥土壤中主導介電損失現象，並無水份影響。為確認此現象，圖 51 中顯示柴油在純相狀態下量測之介電頻譜也在 800-900MHz 時，其虛部有突然增加的現象，顯示該頻段可能為其特徵頻段。含有水份之污染土壤中，水分子（介電常數為 81）主導該土壤之介電行為，圖 60(b)與圖 61(b)在 800MHz 處反而出現介電損耗降低的現象，推估為水份與柴油之綜合介電行為，柴油的存在降低了水份在該處之介電損耗。

實驗中三組含水量可見，污染土壤量測之介電頻譜實部在中低頻段（約為 300-500MHz）相較乾淨土壤低，推估為柴油對孔隙水導電度之影響，反應在介電頻譜之低頻段。柴油( $\epsilon' = 2.5$ )介電常數相較水( $\epsilon' = 81$ )非常低，再加上其導電度為  $0\mu\text{S}/\text{cm}$ ，其微少存在也會降低土壤整體介電頻譜實部較，尤其以含水量高（如飽和土壤）之污染土壤差異較為顯著。然而，單憑污染土壤的獨立量測應難以判斷該電學特徵，實際應用上應同時量測無污染土壤之介電頻譜進行交叉比對。另因污染之飽和土壤為三相孔隙介質（土顆粒、水份、污染物），其介電頻譜應較為容易辨認該電學特徵，但前提是得排除土壤種類、乾密度之影響，可通過量測該區乾淨土壤作為背景值再行特徵研判。

針對本研究室內試驗結果與發現，尋找兩個適合之場址進行現地試驗以驗證此量測技術之可行性。現地試驗一個部分是針對未污染場址，測試在土壤中之使用性以及量測的準確性，而另一部分針對有機污染物污染的場址進行，比較受有機物污染之場址的訊號差異，並與室內試驗之結果進行比對，以規劃未來針對有機污染物調查之模型建立與分析工作。

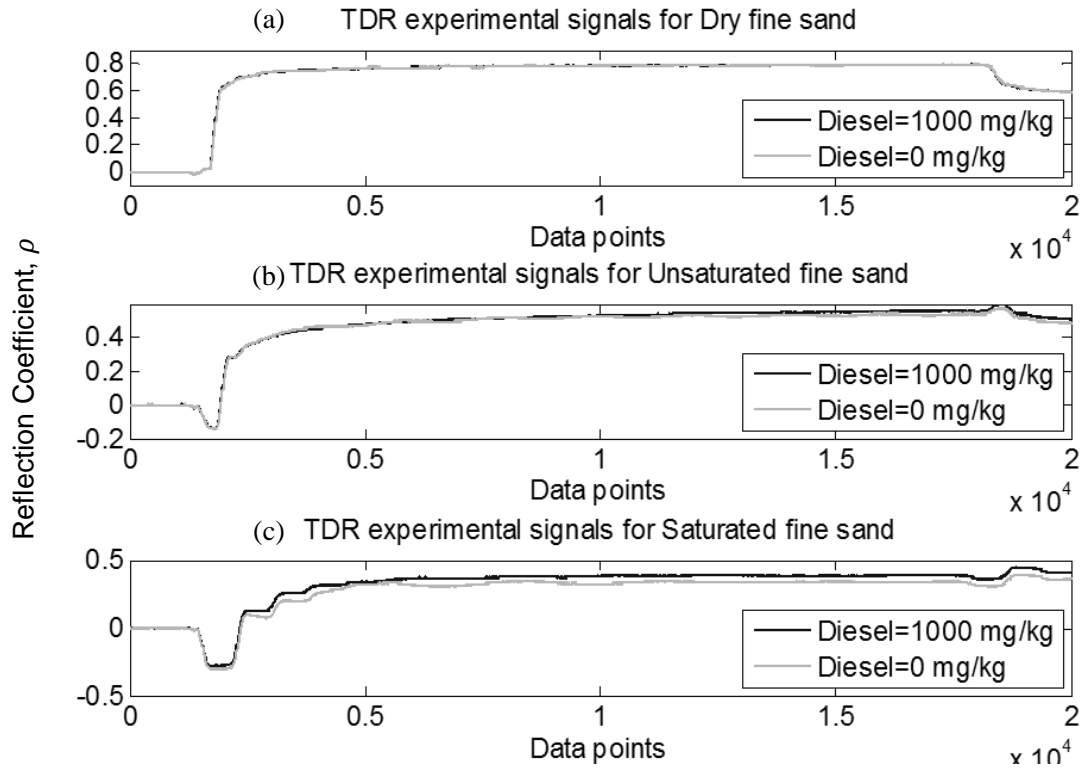


圖 58 污染與非污染土壤之 TDR 實驗訊號:(a)完全乾燥細砂; (b)非飽和細砂; (c)飽和細砂。

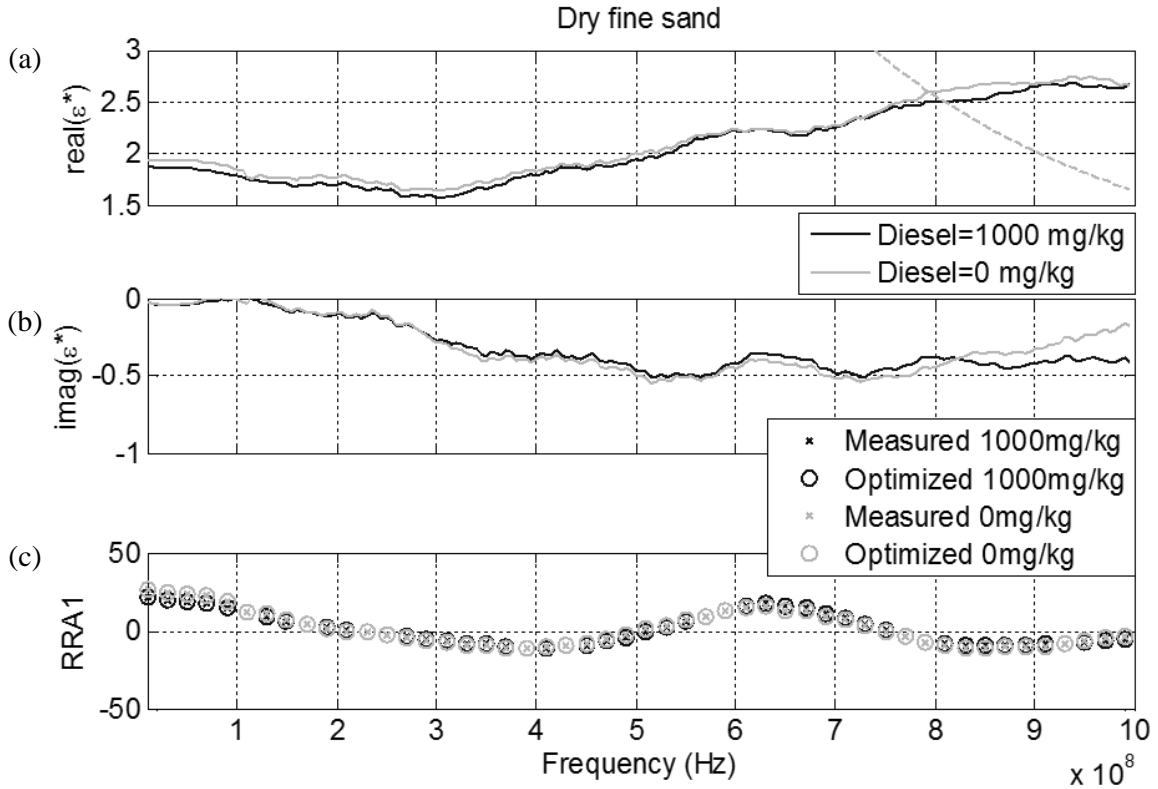


圖 59 完全乾燥細砂 (污染與非污染) : (a)  $\epsilon^*(f)$ 實部; (b)  $\epsilon^*(f)$ 虛部; (c) MRA1 頻譜比。

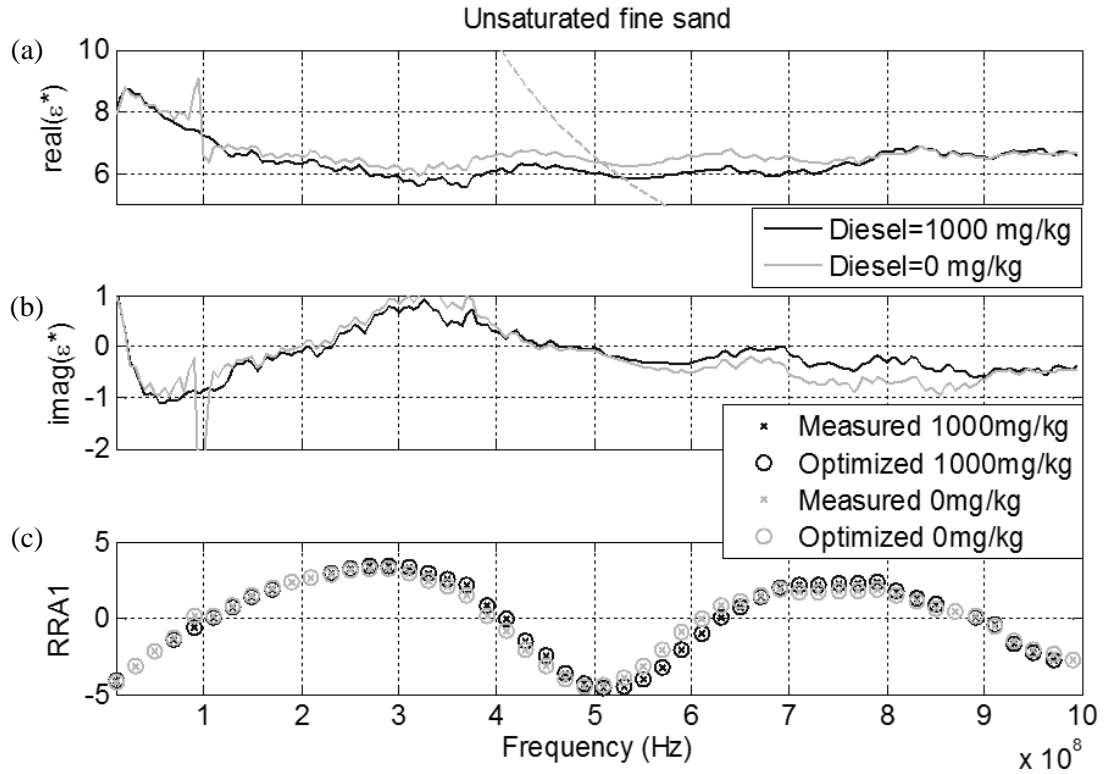


圖 60 非飽和細砂（污染與非污染）：(a)  $\epsilon^*(f)$ 實部；(b)  $\epsilon^*(f)$ 虛部；(c) MRA1 頻譜比。

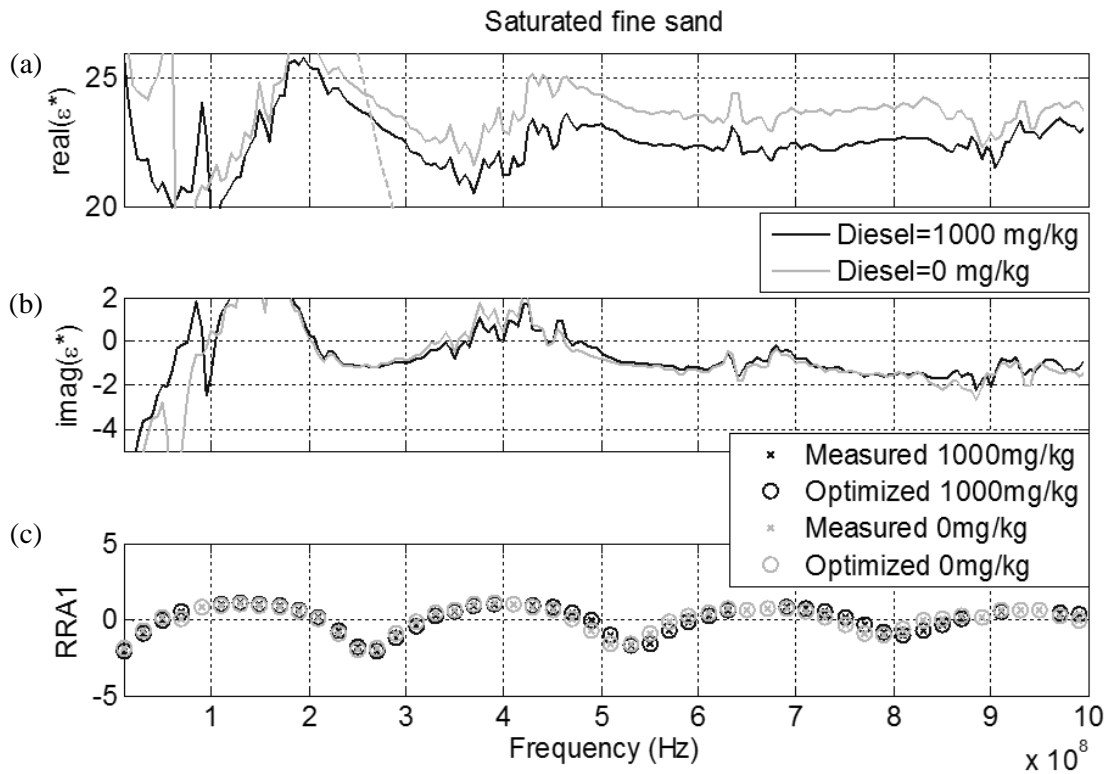


圖 61 飽和細砂（污染與非污染）：(a)  $\epsilon^*(f)$ 實部；(b)  $\epsilon^*(f)$ 虛部；(c) MRA1 頻譜比。

## 5.4. 現地介電頻譜量測試驗

### 5.4.1. 現地介電頻譜量測系統配置

本研究在室內試驗探討 RRA 介電頻譜量測技術之可行性與靈敏度後，將此量測技術延伸至現地試驗以驗證其實用性。現地之測試工作分兩部分進行，其一針對未汙染場址，測試在土壤中之實用性以及量測的準確性，其二選定一有機汙染物汙染場址，比較受有機物汙染之場址的訊號差異，並與室內試驗之結果進行比對。

現地量測室內試驗採用之溶液同軸感測器與土壤同軸感測器在現地試驗中適合不同場址應用，前者適合用於觀測井中監測存在於土壤與地下水環境之汙染物，後者可搭配不銹鋼釘以貫入現地表層土壤進行土壤汙染量測。本研究選定場址皆為量測表層土壤之介電頻譜，因此擬用土壤同軸感測器探頭搭配四根長約 245mm 之不銹鋼釘作為感測段之內外導體。現地施作情形如圖 62 所示，圖 62 (a)為利用夾具固定不銹鋼釘之位置，以膠錘敲入土壤後再將夾具移開，如圖 62 (b)所示。待確認不銹鋼釘位置水平且穩固後，再如圖 62(c)將土壤同軸感測器探頭置於不銹鋼釘頂端，確保內外導體接觸緊密即可進行現地土壤介電頻譜量測。

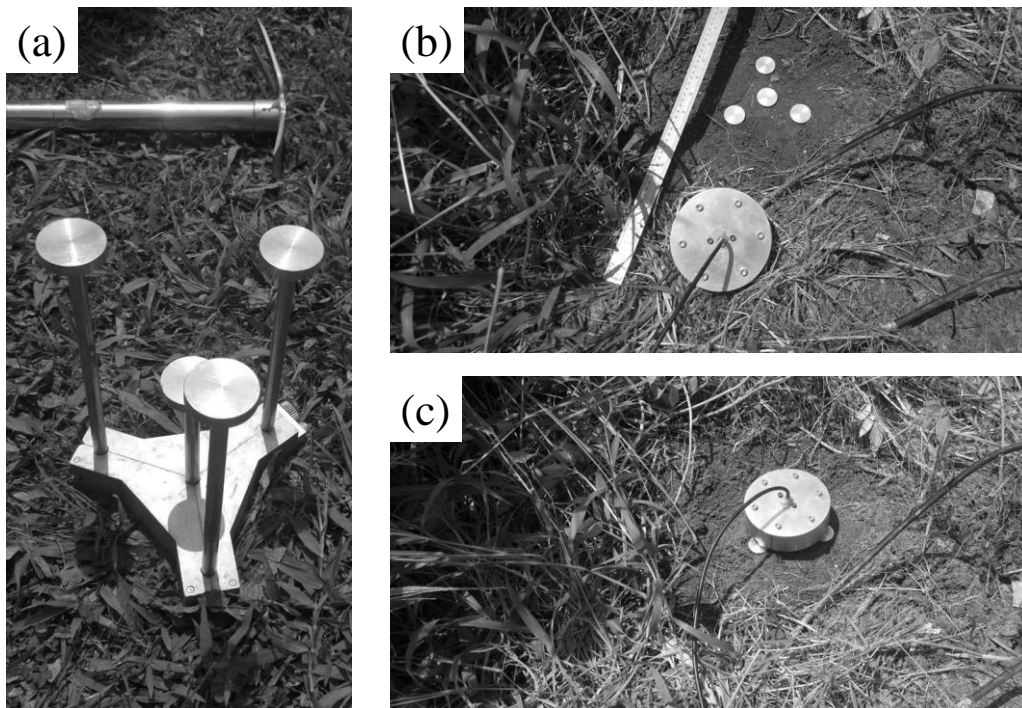


圖 62 現地土壤同軸感測器：(a) 以夾具固定不銹鋼釘位置 (b)敲入不銹鋼釘後確認位置水平(c) 土壤同軸感測器探頭置於不銹鋼釘進行量測。



除了感測段因現地狀況改良以外，量測系統中之擷取系統與室內試驗配置相仿，包含一台寬頻 TDR 時域反射儀（頻寬為 3GHz）、一個 N 至 BNC 轉接頭，一個 N 至 BNC 轉接頭、一 10m 長之 93  $\Omega$  同軸纜線、一長 75mm 之阻抗匹配感測器探頭。該不銹鋼釘感測段利用金屬夾具進行定位，確保該段之幾何阻抗維持在  $Z_p = 152 \Omega$  左右。所擷取 TDR 訊號之取樣間距為 5 ps 且將記錄現地土壤溫度以衡量溫度效應之影響。

#### 5.4.2. 未污染場址

為測試本研究提出之 RRA 在現地土壤中之實用性以及量測的準確性，本研究選定彰化縣某國小進行現地土壤介電頻譜量測初步測試。在無污染物存在的情況下，量測之介電頻譜可反映該土壤之體積含水量，再藉由重量含水量、濕密度之量測即可推估其乾密度、孔隙率。在未污染之現地施作情形如圖 63(a)所示，利用前述現地介電頻譜量測系統(圖 63(b))測得現地土壤之 TDR 訊號。本研究分別於 2017 年 4 月 6 日、7 月 13 日、9 月 19 日前往現地量測不同時期之土壤 TDR 波形，如圖 64(a)所示。由 TDR 原始波形可觀察到 0406 之導電度較高，使得其穩態值相較後期所量測波形較低，同時反映在圖 64(c)之虛部介電頻譜，其介電度虛部在低頻段因導電度影響而較大。由三筆不同時期所量測之結果可發現，相對單純之未污染土壤在複介電頻譜上無特殊之電學特徵，其趨勢之一致性良好。對其介電頻譜影響較大之因子為土壤含水量，其次為土壤密度，而導電度一般上只影響低頻段（約 100MHz 以下）。

套用公式(12)之 Topp's equation, 可由介電頻譜中推估土壤之體積含水量。為了避免在低頻段受到導電度影響，本研究採用該三筆資料在 700MHz 頻段之介電度，推估其體積含水量依時間順序分別為 27.96%、35.58%、29.52%。採集現場土樣回實驗室烘乾，所測得重量含水量分別為 22.37%、27.60%、23.32%。藉由體積含水量與重量含水量換算，推估該土壤之乾密度在不同時期依序分別為 1.25g/cm<sup>3</sup>、1.29 g/cm<sup>3</sup>、1.27 g/cm<sup>3</sup>。

掌握未污染土壤之介電行為後，下一步針對有機汙染物汙染的場址進行，比較受有機物汙染之場址的訊號差異，並與室內試驗之結果進行比對。

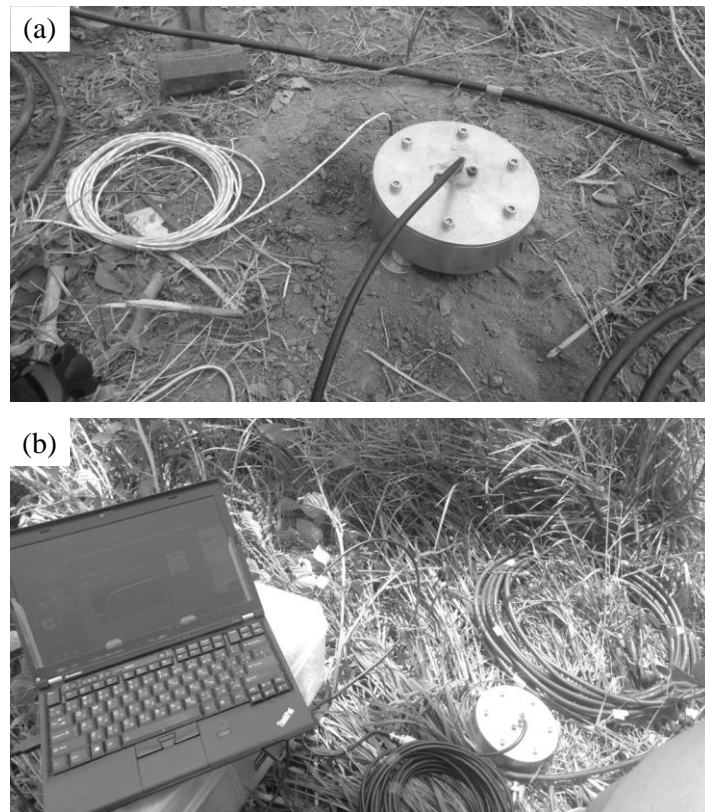


圖 63 未污染場址:(a)現場照片 (b)現地介電頻譜量測系統

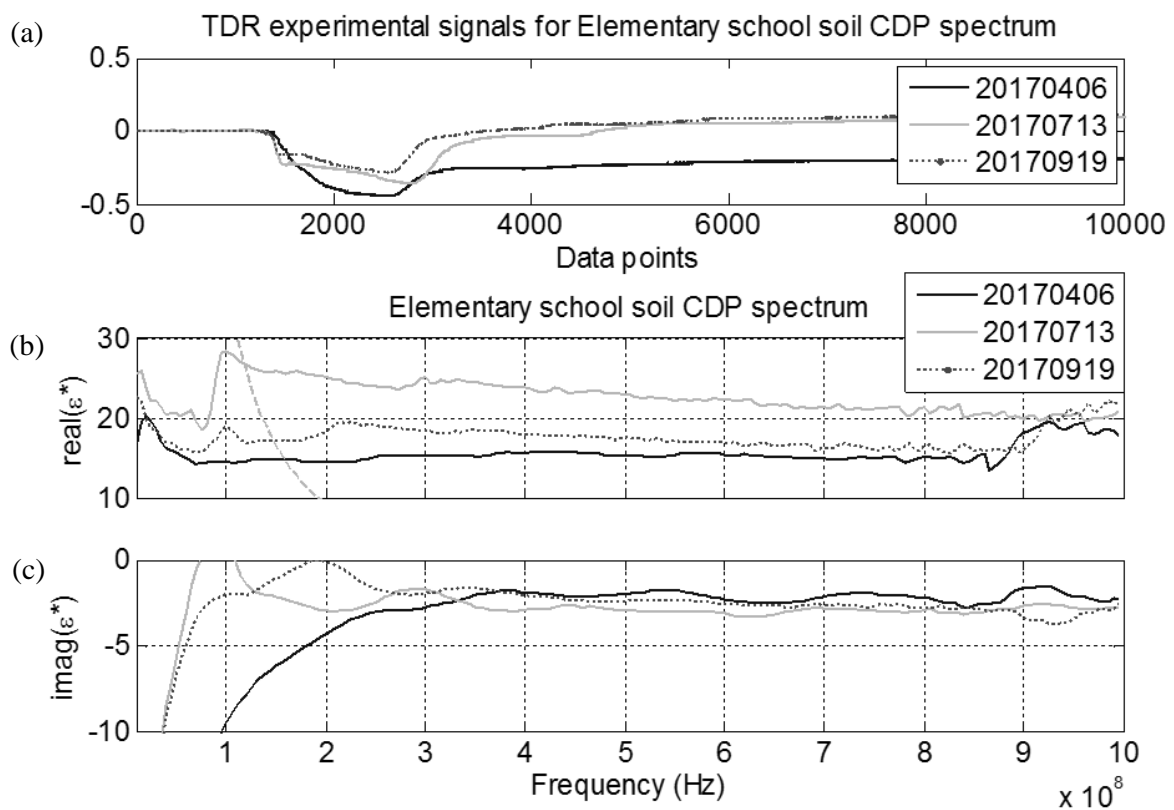


圖 64 未污染場址介電頻譜量測結果:(a)現場 TDR 訊號; (b) $\epsilon^*(f)$ 實部; (c) $\epsilon^*(f)$ 虛部。

### 5.4.3. 有機污染物污染場址

本研究選定之有機污染物污染的場址位於新竹市某地下汽油儲存槽，其主要污染物為 92 無鉛汽油。現場污染整治工作於 2017 年 10 月間持續進行，將受 92 無鉛汽油污染之土壤進行開挖曝曬，以促進有機污染物揮發消散。現場之總石油碳氫化合物 (Total petroleum hydrocarbons, TPH) 濃度約為 3000~5000 mg/kg，已超過其管制標準值(1000 mg/kg)。現場照片如圖 65(a)所示，研判之污染範圍已大部分進行開挖。本研究為有效比較該污染場址之介電頻譜變化，選定現場一鄰近之無污染區域進行背景值量測(如圖 66(a))，利用圖 65(b)之現地介電頻譜量測系統收錄現場資料。另再隨機選定兩處尚未開挖之污染土壤，圖 66(b)、(c)分別為選定污染土壤地點之現地試驗照片。

現場收錄之三筆 TDR 波形如圖 67(a)所示，現地土壤溫度分別為 22.4°C、23.1°C 與 22.7°C，溫度差異在  $\pm 0.35^\circ\text{C}$  以內。經本研究所提之 RRA 介電頻譜分析方法處理後，現地土壤之複介電頻譜量測結果以實部與虛部介電度分別顯示於圖 67(b)、(c)中。為協助判斷有效頻率段，因感測器長度所影響之有效頻率段下限( $f_{lower}$ )在圖 67(b)中的實部介電頻譜以虛線表示。圖 67(a) 中觀察其短時之穩態反應可已可推估污染土壤之導電度較背景值低，但單憑時域訊號推估未能排除土壤含水量與土壤礦物質之影響，可藉由 RRA 測得之複介電頻譜反應協助解讀。觀察三者之複合介電頻譜，可發現因現地土壤均勻度相對穩定，三者之複介電度實部在低頻段大部分重合，研判現場乾密度差異不大（皆在地表施測），且土壤含水量也相當接近。

比對兩筆污染土壤與背景值之介電頻譜虛部，可發現污染土壤皆在 800-900MHz 之間也出現了異於背景值之數值降低，只是兩者的降幅可能因污染物濃度差異而不一樣。回顧圖 51 中之 92 無鉛汽油與柴油之介電行為相似，在純相狀態下之介電頻譜在 800-900MHz 時，其虛部也有突然增加的現象，顯示該頻段可能為其特徵頻段。比對室內試驗結果，受柴油污染之較乾燥土壤在其虛部介電頻譜中也有類似的情形。現場施作地點為土壤表層，長時間曝露在太陽下之土壤淺層含水量也相對低，因此 92 無鉛汽油在相對乾燥土壤中呈現較明顯之介電損耗。另外，室內試驗採用之污染土壤 TPH 濃度為 1000 mg/kg，較現地試驗測得之 TPH 濃度低，因此在現地試驗於汽油之特徵頻率段(800-900 MHz)測得較明顯之介電度異常（如圖 67(c)圈示之介電反應），符合由室內試驗結果推估之預期特徵頻段反應。

經室內試驗與現地測試驗證，本研究所提出之土壤污染現地寬頻電性量測技術證實有可行性、實用性與適用性。此方法只需簡易系統參數標定，使其具

備現地應用性。在現地污染場址利用背景值作為基準，來比對疑似污染區域土壤之介電頻譜通過此現地試驗證實為一有效方法，在相對均勻之土壤條件下施作可有效研判污染物之電學特徵。若現地施測環境變異性顯著而導致土壤之乾密度、含水量有顯著差異時，RRA 分析法須考慮密度之影響並以現地密度實驗為輔，利用乾密度、含水量對介電頻譜正規化再行判斷。但對於特徵頻段判讀之影響較不明顯，應只為複介電度實部之數值修正。

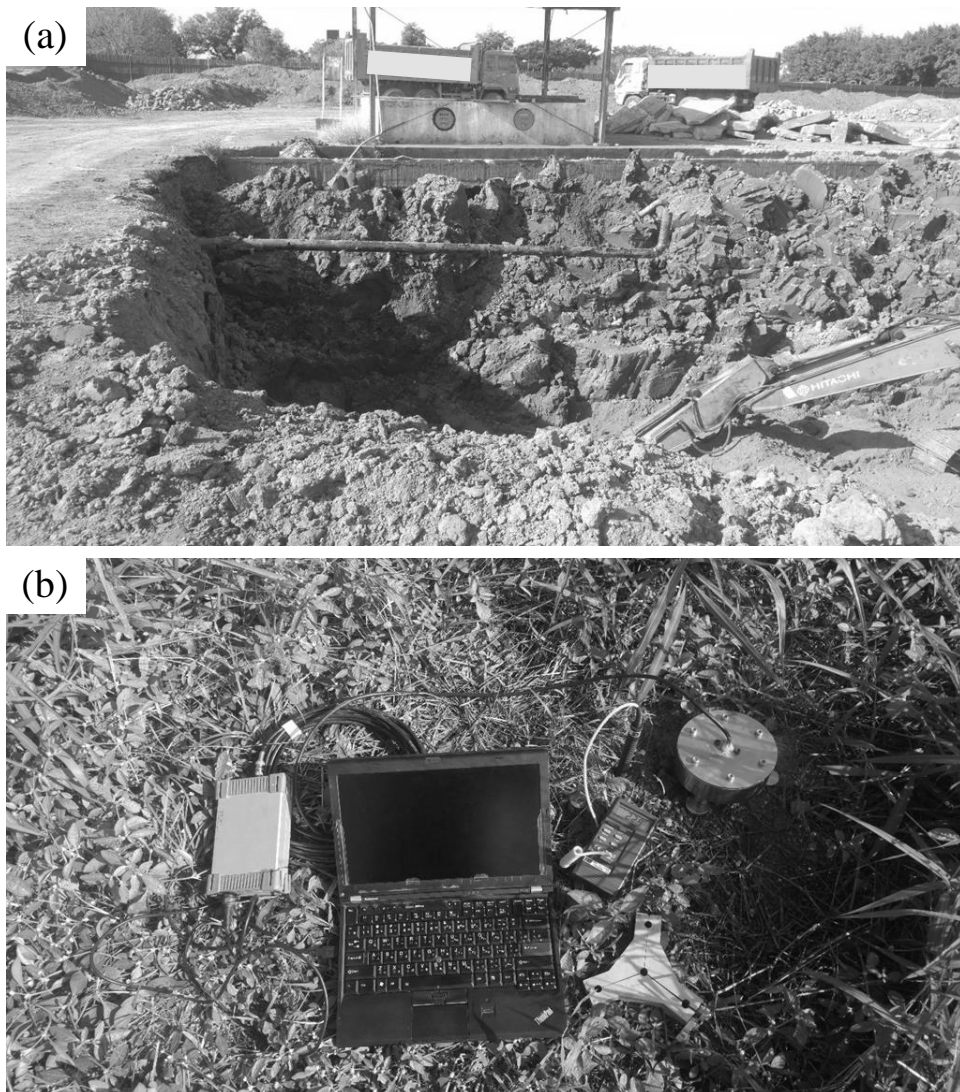


圖 65 有機污染物（92 無鉛汽油）污染場址:(a)現場照片 (b)現地介電頻譜量測系統

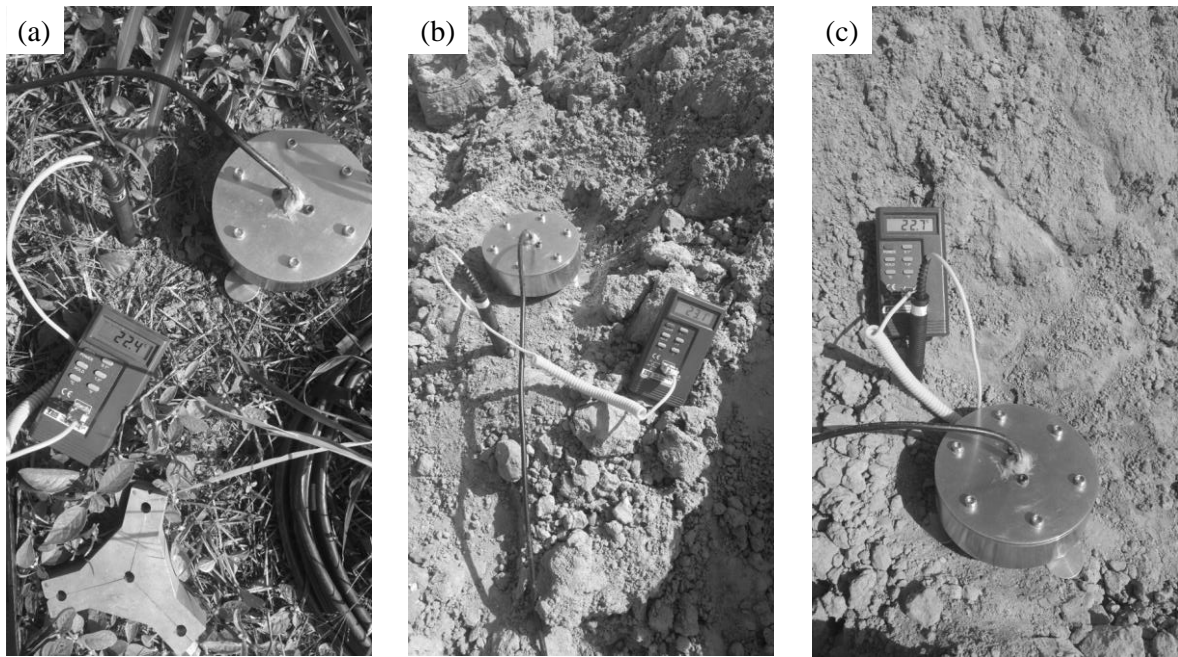


圖 66 現地土壤量測示意圖：(a)鄰近非污染土壤之背景值；(b)污染土壤 1；(c)污染土壤 2。

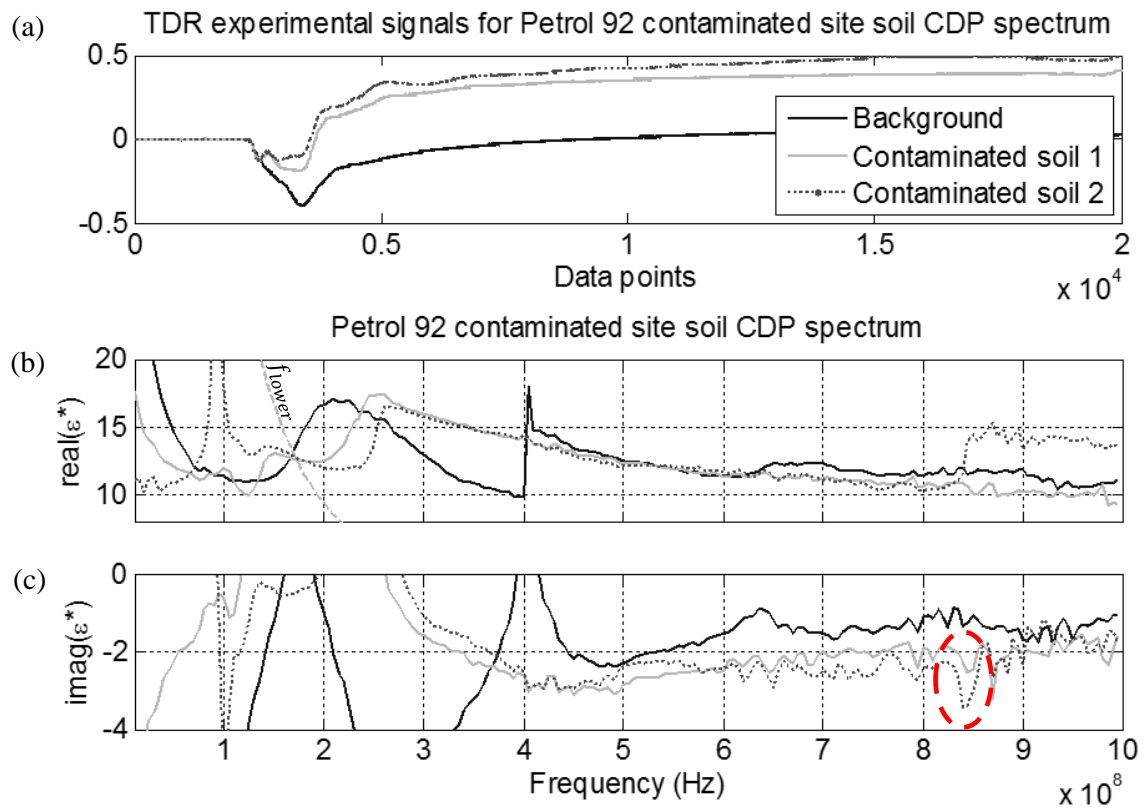


圖 67 污染場址介電頻譜量測結果：(a)現場 TDR 訊號；(b) $\epsilon^*(f)$ 實部；(c) $\epsilon^*(f)$ 虛部。



## 5.5. 結論與建議

### 5.5.1. 結論

本研究的主要貢獻是提出創新的 TDR 多重反射訊號分析 (RRA) 方法，可獲得 10 MHz–1 GHz 的全電學性質（實部與虛部），應該是材料電學性質量測很大的突破。其理論架構經由數值模擬和室內試驗驗證其可行性與穩定性，通過八種具不同介電耗損（dielectric loss）與導電度耗損(conductivity loss)程度之待測物質測試 RRA。該八種待測材料中，其中四項為低頻散材料，分別為蒸餾水(distilled water)、自來水(tap water)、丙酮(acetone)、空氣(air)；另四種材料皆為高頻散之醇類，即甲醇(methanol)、乙醇(ethanol)、異丙醇(isopropanol)以及正丁醇(butanol)。RRA 涵蓋所有出現於感測段後之多重反射訊號，透過最佳化分析搭配疊代初始值方法，在頻率範圍 10 MHz – 1 GHz 之間測得待測材料之複介電頻譜 (Complex dielectric permittivity spectrum, CDP spectrum)。RRA 之兩種方法透過數值模擬評估其優劣，發現 RRA1 之有效頻率段在特定介質中大於 RRA2，也可利用 RRA2 在高頻時之數值差異來協助判斷訊號截斷對複介電頻譜之影響。數值模擬和室內試驗測得之複介電頻譜皆能有效頻率段內符合理論值，雜訊或訊號處理造成之誤差為 2% 以內。

因應最佳化分析可能遭遇局部極小值(local minimum)之狀況，本研究提出一疊代初始值(iterated initial guess)手段，利用在低頻反演之複介電度作為下一個頻率之初始值，確保隨著高頻增加而給定之初始值盡量靠近真值。應用此手段，在低頻反演時所給定之初始值可任意給定  $\epsilon_{ini}^*$ （包含實部與虛部），再利用複介電頻譜一般不會有極點之特性，確保高頻段複介電度反演獲得正確數值。此方法降低了局部極小值存在而造成反演錯誤之可能性，可避免使用更為複雜的全局最佳化分析，提供了較不依賴初始值的最佳化反演環境予 RRA 分析方法。

本研究初步針對現地常見之有機污染物進行室內試驗量測其複介電頻譜，分別對兩種輕非水相液體（Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL）以及兩種重非水相液體（Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL）。LNAPL 中之柴油和 92 無鉛汽油測試結果符合文獻中常見之數值，而不同濃度下之 DNAPL 則在複介電頻譜實部無實際變化，可通過其虛部觀察其介電耗損差異。了解相對單純之純相溶液與有機污染物飽和溶液的介電行為後，本研究進一步在室內試驗探討非污染與污染土壤之介電頻譜。在三種不同飽和度下，利用柴油混合細砂形成污染土壤並量測其介電頻譜，發現其在 800-900MHz 之介電頻譜虛部出現其特有之電學特徵，可作為後續現地試驗量測參考依據。

藉由室內試驗驗證 RRA 之可行性後，本研究選定兩個現地場址應用及評估 RRA 在現地試驗之適用性。現地之測試工作分兩部分進行，其一針對未污染場址，測試在土壤中之實用性以及量測的準確性，其二選定一有機污染物污染場址，比較受有機物污染之場址的訊號差異，並與室內試驗之結果進行比對。通過觀察未污染場址中土壤之介電行為，協助探討現地土壤受到導電度、土壤含水量、乾密度的影響下，對於複介電頻譜之影響。掌握未污染土壤之介電行為後，本研究選定一 92 無鉛污染之場址來驗證說研發之寬頻電性量測技術，以現地未污染土壤作為背景值，比對由污染土壤所測得之介電頻譜，出現類似室內試驗中之電學特徵。通過此現地試驗證實為一有效方法，在相對均勻之土壤條件下施作可有效研判污染物之電學特徵。

綜合上述，本研究所提出之 RRA 多重反射訊號分析方法經室內試驗與現地測試驗證，應用於現地土壤污染介電頻譜量測證實有可行性、實用性與適用性。此方法只需簡易系統參數標定，使其具備現地應用性，且於現地污染場址利用背景值作為基準，來比對疑似污染區域土壤之介電頻譜。但某些情況下量測結果可靠度較不佳（例如低介電度的污染物），針對這部分的問題，本研究將提出後續改進的方向。污染土壤的電學性質為污染調查極為重要的資訊，它提供了地球物理探測技術資料判釋的基準，且可以結合直接貫入試驗，作為現地調查與監測的利器。

### 5.5.2. 建議

本研究提出之 RRA 訊號分析方法在某些情況下量測結果可靠度較不佳（例如低介電度、高介電頻散之污染物），針對這部分的問題，後續改進方向可朝改進現有感測器，於感測段前加裝人工阻抗模組以產生一訊號穩定且無頻散現象之穩定 $R_1$ 。在高頻散材料中之有效頻率段常因介電耗損程度較高，使得在 TDR 頻率段內之複介電度變化較大且 $R_1$ 訊號之斬截影響較大，導致複介電頻譜有效頻寬縮減。可通過人為控制製造一訊號穩定且無頻散現象之穩定 $R_1$ ，搭配重新推導之 RRA 公式，有望延伸在介電耗損較高的醇類材料之有效頻率段。後續也可嘗試提升訊號之訊雜比，無論是通過波形疊加、雜訊濾波、在更低雜訊環境中擷取實驗波形，希望獲得更全面之複介電頻譜。

RRA 現地試驗目前主要針對汽柴油類有機污染物量測，後續可持續蒐集不同污染物在土壤中之介電頻譜，從而建立污染物寬頻電性資料庫。

後續建議可朝不同土壤類型場址中油品及 DNAPL 定量或半定量、以及空間解析發展

基於本量測系統只需內外導體接觸到待測土體，可延伸至與 CPT 貫入試驗之探測器結合，達到可應用於現地調查及監測的目的。

本研究應用了所發展的技術量測非飽和土壤與污染物的電學性質，獲得一些經驗與啟發，除了後續 TDR 介電頻譜量測技術的改良，可能需要結合低頻量測技術，例如阻抗譜法(impedance spectroscopy)、誘導極化法(induced polarization)，方能增加污染特性與濃度的分辨率。長期而言，現地污染探測需要更完善寬頻電學量測技術，結合基於中高頻波傳方法與低頻電路方法，研發適合實驗室與現地試驗之試體感測器及現地貫入式探測器以達到此目標。



## 参考文献

刘豪睿、能昌信、王聪、董路、刘玉强 (2010), 基于介电特性获取污染土壤中污染物含量的研究, 地球物理学进展, 25(6): 2184~2192。

陈彦、童玲、钟亮、刘余 (2008), 传输/反射法测量土壤介电, 仪器仪表学报, 19(4): 740~742。

Ajo-Franklin, J.B., Geller, J.T., Harris, J.M. (2006). A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs. *Journal of Applied Geophysics* 59 (3), 177–189.

Amegashie, F. Shang, J. Q., Yanful, E. K. (2006), “Using Complex Permittivity and Artificial Neural Networks to Identify and Classify Copper, Zinc, and Lead Contamination in Soil,” *Canadian Geotechnical Journal*, 43 (1): 100~109.

ASTM D 5730, 2011:Standard Guide for Site Characterization for Environmental Purposes With Emphasis on Soil, Rock, the Vadose Zone and Ground Water, Annual Book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Benson, A. and M. Stubben, 1995. Interval resistivities and very low frequency electromagnetic induction-an aid to detecting groundwater contamination in space and time: A case study. *Environ. Geosci.*, 2: 74-84.

Campanella, R.G. and Weemees, I. (1990), “Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies,” *Canadian Geotechnical Journal*, 27, 557–567.

Carcione, J.M., Seriani, G., Gei, D., 2003. Acoustic and electromagnetic properties of soils saturated with salt water and NAPL. *Journal of Applied Geophysics* 52 (4),177–191.

Cassidy, D., D. Werkema, W. Sauck, E. Atekwana, S. Rossbach and J. Duris, 2001. The effects of LNAPL biodegradation products on electrical conductivity measurements. *J. Environ. Eng. Geophy.*, 6: 47-52.

Cole, K. S., and Cole, R. H. (1941), “Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics,” *J. Chem. Phys.*, 9(4), p. 341.

Dobson, M.C., F. F. Ulaby, M.T. Hallikainen, and M.A. El-Rayes. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 23:35–46.

Elmore, W. C., and Heald, M. A. (1985). *Physics of waves*. Dover Publications.

Francisa, F. M. and Rinaldi, V. A. (2003), "Complex Dielectric Permittivity of Soil-Organic Mixtures (20 MHz~1.3 GHz)," *Journal of Environmental Engineering*, 129(4): 347~357.

Frolik, J. L., and Yagle, A. E. (1997), "Forward and inverse scattering for discrete layered lossy and absorbing media," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process.*, Vol. 44, No. 9, pp. 710–722.

Friel, R., and Or, D. (1999). Frequency analysis of time-domain reflectometry (TDR) with application to dielectric spectroscopy of soil constituents. *Geophysics*, 64(3), 707–718.  
<http://doi.org/10.1190/1.1444580>

Hasted, J. B. (1973). *Aqueous dielectric*. New York: Chapman and Hall.

Heimovaara, T. J. (1994). "Frequency Domain Analysis of Time Domain Reflectometry Waveforms: 2 A four-component complex dielectric mixing model for soils," *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 201-209.

Lee, J.H., Oh, M.H., Park, J., Lee, S.H., Ahn, K.H. (2003), "Dielectric dispersion characteristics of sand contaminated by heavy metal, landfill leachate and BTEX (02-104B)," *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 105, 83~102.

Lin, C.-P. (2003), "Frequency Domain versus Traveltime analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(3): 720-729.

Lin, C. P.; Tang, S. H. and Chung, C. C. 2006a, "Development of TDR penetrometer through theoretical and laboratory investigations: 1. Measurement of soil dielectric permittivity". *Geotech. Test. J.*, Vol. 29, No. 4, pp. 306-313.

Lin, C. P.; Tang, S. H. and Chung, C. C. 2006a, "Development of TDR penetrometer through theoretical and laboratory investigations: 1. Measurement of soil electrical conductivity". *Geotech. Test. J.*, Vol. 29, No. 4, pp. 314-321.

Lin, C.-P. and Tang, S.-H. (2007). "Comprehensive Wave Propagation Model to Improve TDR Interpretations for Geotechnical Applications," *Geotechnical Testing Journal*, 30(2), GTJ100012.

Lin, C.-P., Ngui, Y. J. and Lin, C.-H. (2017) "A novel TDR signal processing technique for measuring apparent dielectric spectrum," *Measurement Science and Technology*. IOP Publishing, 28(1), p. 15501. doi: 10.1088/1361-6501/28/1/015501.

Moroizumi, T., Sasaki, Y., 2008. Estimating the nonaqueous-phase liquid content in saturated sandy soil using amplitude domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* 72 (6), 1520–1526.

Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308–313. <http://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>

Persson, M. and Wraith, J. M., 2002, “Shaft-mounted time domain reflectometry probe for water content and electrical conductivity measurements”, *Vadose Zone J.*, V. 1, pp. 316-319.

Proponotarios, E. N., and Wing, O. (1967), “Analysis and intrinsic properties of the general non-uniform transmission lines,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 15, pp. 142–150.

Rowe, R. K., Shang, J. Q., Xie, Y. (2001), “Complex Permittivity Measurement System for Detecting Soil Contamination,” *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 498~506.

Saltasa, V., Vallianatosa, F., Soupiosa, P., Makris, J. P., Triandis, D. (2007), “Dielectric and Conductivity Measurements as Proxy Method to Monitor Contamination in Sandstone,” *Journal of Hazardous Materials*, 142(2): 520~525.

Sato, T., & Buchner, R. (2003). Dielectric relaxation spectroscopy of 2-propanol-water mixtures. *Journal of Chemical Physics*, 118(10), 4606–4613. <http://doi.org/10.1063/1.1543137>

Siddiqui, S.I. and Drnevich, V.P. (1995), "Use of Time Domain Reflectometry for the Determination of Water Content and Density of Soil," FHWA/IN/JHRP-95/9, Purdue University.

Skierucha, W., and Wilczek, A. (2010). A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz frequency range. *Sensors*, 10(4), 3314–3329. <http://doi.org/10.3390/s100403314>

Sneddon, K. W. Olhoeft, G. R., Powers, M. H., (2000), “Determining and Mapping DNAPL Saturation Values from Noninvasive GPR Measurements,” *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, Arlington, Virginia, 2000:293-302.

Snieder, R., Hubbard, S., Haney, M., Bawden, G., Hatchell, P., Reil, A. & Working, D.G.M., 2007. Advanced noninvasive geophysical monitoring techniques, *Ann. Rev. Earth planet. Sci.*, 35, 653–683.

Sogade, J.A., Scira-Scappuzzo, F., Vichabian, Y., Shi, W.Q., Rodi, W., Lesmes, D.P. & Morgan, F.D., 2006. Induced-polarization detection and mapping of contaminant plumes, *Geophysics*, 71(3), B75–B84.

Solimene R., Prisco, G. , and Soldovieri, F. (2008), “GPR Based Soil Electromagnetic Parameters Determination for Subsurface Imaging,” *Advances in Geosciences*, 19: 39~44.

Son, Y., Oh, M., Lee, S., 2009. Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz–10 MHz. *Environmental Geology* 58 (6), 1341–1348.

Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P. (1980), “Electromagnetic determination of soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry,” *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 3, pp. 574~582.

Vaz, C. M. P. and Hopmans, J. 1 W., 2001, “Simultaneous measurements of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe”, *Soil Sc. Soc. Am. J.*, V. 65, No. 1, pp. 4-12.