

跨孔透地雷達斷層掃描影像之解析度與精確度之研究

張竝瑜

嘉南藥理科技大學環境資源管理系

摘要

本研究透過電磁波傳輸模擬跨孔透地雷達訊號，並運用阻尼最小平方法與商業反演算程式分析斷層掃描資料，藉以比較不同方法之反演算影像解析度與準確程度。驗證模型則採用一簡單砂泥互層模型與美國 STVZ 之穩態(Steady-state)與暫態(Transient-state)之未飽和層地下水流動模型。結果顯示(1)在簡單砂泥互層模型中，以阻尼最小平方法反演算之影像與運程式 GeotomCG 準確度相當，均能顯示砂質地層中所夾之泥層存在。(2)在穩態與暫態模型模擬試驗中，比較兩種不同演算法，訊號衰減率反演算影像解析度均較波速反演算影像要差，顯示實際情況下，雷達波傳遞可能有額外之能量損失，因此須於反演算的過程中加以考量。(3)在暫態的試驗中，入滲試驗開始後第七日、以及第二十一日之反演算影像差值顯示，由於阻尼最小平方法採用了阻尼以保證反演算之順利進行，一定程度減少了反演算影像最高值與最低值間之誤差程度，解析度上要較 GeotomCG 來的差。但比較所得之衰減率變化，阻尼最小平方法所得之值卻較 GeotomCG 接近原模型之設定值，顯示以阻尼最小平方法所得之影像，要較 GeotomCG 能更接近模型原始設定值，但卻犧牲其解析度，為在解析度與準確度間得到平衡，必須依在測試阻尼值，以得到最佳之解析度與準確度組合。

前言

本研究透過電磁波傳輸模擬與掃描資料反演算分析，釐清造成透地雷達斷層掃描之解析度與精確性之主要因子，以協助未來研究者利用最有效之透地雷達斷層掃描，達成精確監測地層目標物(如地下污染物分布，未飽和層含水量分布，或裂隙排列走向等)之目的。由於根據先前研究之發現，一般商用之為透地雷達波速反演算開發之軟體，並不一定適用於訊號衰減率反演算之應用。因此本研究採用自行開發撰寫之反演算程式，並採用簡單砂泥互層、穩態(Steady-state)與暫態(Transient-state)之未飽和層地下水流動模型進行反演算，與目前之透地雷達掃描反演算程式所反演之影像進行分析比較，以了解如何改進反演算之解析度與精確度。本研究內容包含：

- (1) 透地雷達影像反演算程式之撰寫。
- (2) 透地雷達斷層掃描反演算程式之檢討比較及反演算方法對掃描影像之解析度探討。
- (3) 地層與地下水層物理狀況對透地雷達斷層掃描之誤差評估。

透地雷達斷層掃描(GPR Tomography)反演算(Inversion)原理

透地雷達斷層掃描方法(GPR Tomography)利用井間(Borehole-borehole)或地面-井間(Surface-borehole)等不同之雷達天線排列，收集不同排列方式與不同天線排列位置所得到之高密度雷達波訊號，經由反演算後推測介質中之物理性質分布狀況。

對透地雷達斷層掃描資料反演算方法，一般均將發射與接收天線井間之區域劃分為若干面積一致之小方格，假設雷達波由發射天線至接收天線行進的途徑可視為垂直波前之直線進行，每一組天線排列位置所收集到之雷達波訊號資料如傳遞時間或振幅衰減率可以以下式表示：(Sharma, 1997; Jackson & Tweeton, 1996):

$$t_i \text{ (or } \alpha_i) = \sum_{j=1}^M p_j d_{ij} \quad (2.1)$$

式 2.1 中， $t_i(\alpha_i)$ 為某一組天線組合之雷達波行進路線 i^{th} 所得到之雷達波傳遞總時間與總訊號衰減率， p_j 代表在某一方格 j^{th} 內之平均波速或訊號衰減率， d_{ij} 為此雷達波行進路線 i^{th} 在方格 j^{th} 內之行進距離，而 M 則代表在此雷達波行進路線上所經過之方格數目。

在此研究中我們比較自行開發以 matlab 語言撰寫之反演算程式，與使用 GeoTom 公司(Geotom,LLC, 1998)所發展之反演算程式 GeotomCG™ 計算地層中之波速與訊號衰減率分布之結果。GeotomCG™ 使用同時遞迴解算(simultaneous iterative reconstruction technique, SIRT) (Jackson & Tweeton, 1996)以及波行路線反推技術(ray tracing methods)計算並反推產生斷層影像。詳細之遞迴解算與波行路線反推技術內容可以參照 GeoTom 公司之技術手冊(Geotom,LLC, 1998)，前述提及之自行撰寫之 matlab 程式則詳見下節討論。

研究結果與討論

(1) 透地雷達影像反演算

一般反演算方法均採取波行路線反推(ray tracing methods)，或是簡單假設雷達電磁波為直線路徑，配合反演算(inversion algorithm)之解算，得到地層中物理性質之分佈狀況。然而因為路徑反推或是假設直線傳遞路徑均簡化了物理之實際可

能狀況，因此可能造成假像(Artifacts)生成。另外，不同之反演算方法，對於資料處理所產生之數值誤差也有所不同，加上商用反演算程式多由震測之反演程式修改而來，對透地雷達之訊號衰減率反演算並不較波速反演算有較好之結果。因此，為釐清演算法對影像解析度所造成之誤差，本研究根據先前研究之結果，撰寫直進路徑假設(straight-ray paths)之反演算程式，並與原來商用程式所得影像之組合作一比較，以分析比較不同反演算方法下之斷層影像解析度差異。由式 2.1 中可根據直進路徑假設建立模型矩陣(由式 2.1 中 p_j 組成)、路徑參數矩陣(d_{ij})，以及觀測值矩陣(t_i (or α_i))。根據式 2.1，可再將之改寫為一矩陣形式之目標式：

$$T(A) = DP \quad (2.1)$$

上式中， $T(A)$ 為量測所得之訊號波到達時間或訊號總衰減率所組成之向量陣列， D 為波前進路徑之幾何矩陣，而 P 則為所欲求得之模型向量陣列。本研究運用阻尼最小平方方法(Damped least square method)(Barrett et al., 1994; Paige and Saunders, 1982)，由直進路徑假設建立之路徑參數矩陣與觀測值矩陣反演算逆推模型矩陣。反演算之驗證與比較詳見下一節討論。

(2) 透地雷達斷層掃描反演算程式之檢討比較及反演算對穩態掃描影像之解析度探討

如上節所示，透地雷達可以因應目標物之不同，以及量測地點之條件限制，選擇不同之天線排列方式進行量測。本研究利用先前建立之簡單沙-黏土層模型，在電磁波傳遞路徑為直線之假設前提下，重組運用 MOG(Multiple-offset Gathers)方法，天線井間距為 2.25 米之天線排列所得之透地雷達訊號。再根據此一合成訊號資料，分別運用前述之 GeotomCG 與本研究所撰寫之 matlab 反演算程式進行反演算，最後將反演算之結果進行比較如圖一。圖一所示本研究所撰寫之程式在電磁波波速之反演算上之解析能力與 GeotomCG 相當，但在訊號衰減率之反演算上有較佳之解析能力，能正確顯示衰減率較高之黏土層分佈位置。

(3) 地層與暫態地下水層物理狀況對透地雷達斷層掃描之誤差分析。

本研究採用美國 STVZ 未飽和層模型之未飽和層入滲水文地質模擬結果，運用有限時域方法(FDTD)模擬合成真實雷達訊號傳遞，再分別以 GeotomCG 與阻尼最小平方方法反演算，形成斷層掃描影像，並與原來之地質模型比較，分析其解析度之差異。圖二顯示在入滲試驗開始後第七日、以及第二十一日之衰減率變化原始結果、GeotomCG 反演算與阻尼最小平方方法之斷層影像變化結果(比較於入滲試驗開始前之背景值)。由影像所示，由於阻尼最小平方方法採用了阻尼以保證反演算之順利進行，因此雖然影像大致與由 GeotomCG 所得之結果相同，但明顯的解析度較差。因為阻尼法為兼顧反演算之順利進行，減少了反演算影像最高值與最低值間之誤差程度。但比較所得之衰減率變化，阻尼最小平方方法所得之值較 GeotomCG 接近原模型之設定值，顯示以阻尼最小平方方法所得之影像，要較 GeotomCG 能更正確的得到反演算值，但卻犧牲其解析度，因此解析度上要較 GeotomCG 來的差。因此精確度與解析度在此一研究中必須一再測試以得到最佳之組合與影像。

結論

本研究透過一系列之地層中電磁波傳輸模擬與反演算模擬分析，釐清造成透地雷達斷層掃描之解析度與精確性之主要因子，並自行開發反演算之軟體程式以協助進行綜合分析與提昇影像技術之探討。研究結果顯示以阻尼最小平方方法反演算之影像與運程式 GeotomCG 解析度相當，均能顯示砂質地層中所夾之泥層存

在。比較兩種不同演算法，訊號衰減率反演算影像解析度均較波速反演算影像要差，顯示雷達波傳遞可能有額外之能量損失，因此須於反演算的過程中加以考量。而在暫態的試驗中，入滲試驗開始後第七日、以及第二十一日之反演算影像差值顯示，由於阻尼最小平方法採用了阻尼以保證反演算之順利進行，一定程度減少了反演算影像最高值與最低值間之誤差程度，解析度上要較 GeotomCG 來的差。但比較所得之衰減率變化，阻尼最小平方法所得之值卻較 GeotomCG 接近原模型之設定值，顯示以阻尼最小平方法所得之影像，要較 GeotomCG 能更接近模型原始設定值，但卻犧牲其解析度，為在解析度與準確度間得到平衡，必須依在測試阻尼值，以得到最佳之解析度與準確度組合。

參考書目

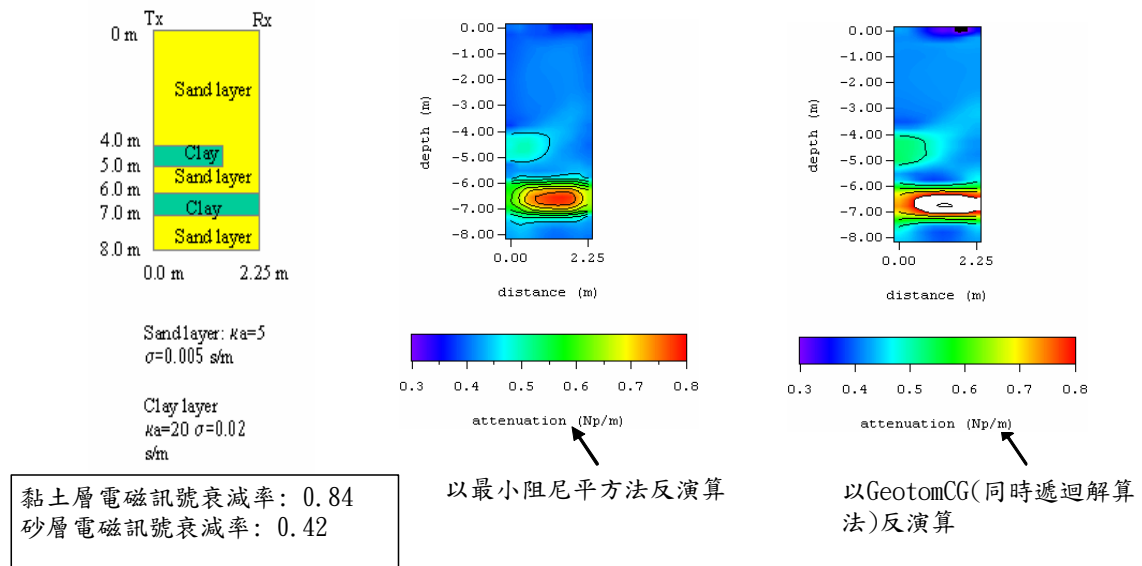
Barrett, R., Berry, M., and T. F. Chan, 1994, *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods*, SIAM, Philadelphia.

GeoTom, LLC., 1998, *User Manual for GeotomCG and GeoTom3D*, GeoTom, LLC., Apple valley, Minnesota.

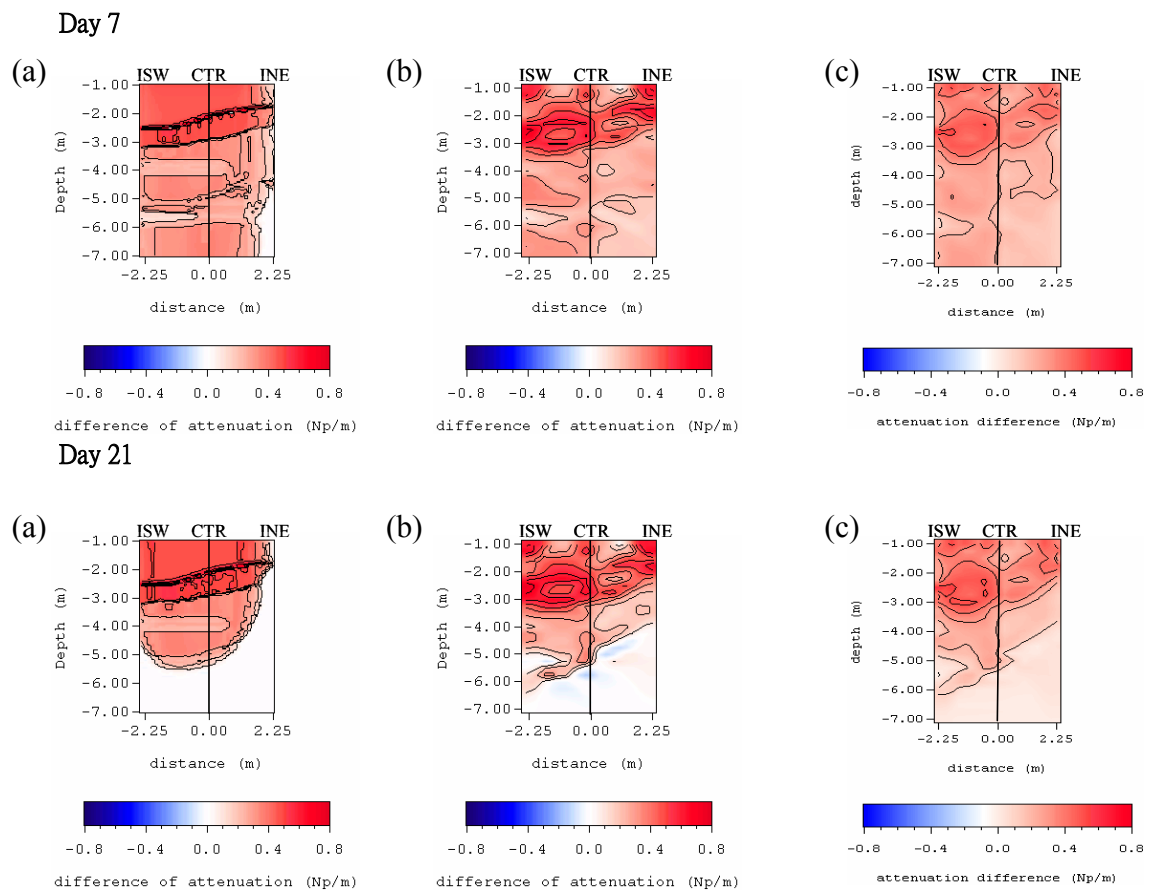
Jackson, M., J., Tweeton, D., R., 1996, 3DTOM: Three-dimensional geophysical tomography, Report of investigations 9617, Bureau of Mines, United States Department of the Interior., pp. 1-84.

Paige, C. C. and M. A. Saunders, 1982, "LSQR: An Algorithm for Sparse Linear Equations And Sparse Least Squares," *ACM Trans. Math. Soft.*, Vol.8, , pp.43-71.

Sharma, P. V., 1997, *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge university press, New York.



圖一、運用兩種簡單模型及直線波徑假設驗證不同反演算程式之訊號衰減率反演算結果



圖二、(a)未飽和層水文地質模擬結果，(b)運用有限時域方法(FDTD)模擬合成雷達訊號，再以 GeotomCG 反演算所得之影像，(c) 運用 FDTD 合成雷達訊號，再以阻尼最小平方反演算所得之影像結果