

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

透地雷達斷層掃描影像之解析度與精確度提升技術之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2116-M-041-001-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：嘉南藥理科技大學環境資源管理系

計畫主持人：張並瑜

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 95 年 10 月 18 日

摘要

透地雷達斷層掃描成像技術已被廣泛的用在飽和以及未飽和層的研究監測上。然而反演算的過程中，運用商用程式演算之影像往往一再有假像產生，以致影響其精確程度。為提升透地雷達掃描成像技術使之更能正確呈現地層物理狀況，本研究運用先前研究之成果，自行開發撰寫運用於透地雷達斷層掃描資料反演算之直進波反演算程式，並以簡單模型與暫態入滲模型進行驗證，並於後者模型中藉由有限差分時域演算程式模擬電磁波傳遞與透地雷達訊號反應，比較商用軟體與本研究開發之反演算程式，經反演算後之影像。以釐清誤差來源與系統物理之限制，並提升反演算之解析度與精確度。

Abstract

Cross Borehole Ground Penetrating Radar has been used extensively in both unsaturated and saturated zone researches. In this study, we try to develop a straight-ray inversion program. Simple models with intercalated sand and clay layers are used to verify the accuracy of the inverted images. The inverted images resolve layer structures better than the images inverted with the commercial code, GeotomCG. In addition, we use the transient infiltration model as well as the finite-difference time-domain modeling to simulate the response of the electromagnetic waves and synthesize the radar signals. The radar signals are then processed with both inversion codes, GeotomCG and the one we developed. The results are compared in order to identify a possible solution to promote the resolution and accuracy of the inverted images. Through the images inverted with our code show better agreement with the attenuation values in the input model. The damped least square algorithm loses resolution in the images. Therefore, One should try to figure out the best combination of the damped value in order to promote the resolution and accuracy of the inverted images.

研究成果內容

一、介紹

本研究計畫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。由於根據本研究之發現，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作一分析比較。本研究分析項目包含：

- (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。

二、研究原理與方法

2.1 透地雷達原理

透地雷達系統係透過一組雷達天線向地底目標物發射一個頻率在 10 MHz 至 1GHz 之間之電磁波脈衝，藉由偵測並處理電磁波在地下岩石或土壤內傳遞之反射與折射後所接收之電磁波波速與振幅，來了解地底之地質構造與岩石或土壤之物理或水文性質。Davis 與 Annan(1989)研究指出，對於一般之未飽和岩石與土壤，其電導率均在 10mS/m 以下。因此電磁波在地底之波速可以表示為：

$$v \approx \frac{c}{\sqrt{k_a}} \quad (2.1)$$

而電磁波的振幅衰減率則可以表示為

$$\alpha \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\sigma}{\sqrt{k_a}} \quad (2.2)$$

在式 2.1 中，參數 c 為真空中之光速，可以表示為：

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.3)$$

式 2.1 至 2.3 中， ϵ_0 ， μ_0 分別為真空介電傳導率(8.85×10^{-12} F/m)以及磁通率($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)， ϵ 為介質之介電傳導率， σ 為介質之電導率。 k_a 則為介質之介電係數，可以表示為：

$$k_a = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{例如空氣中 } k_a=1, \text{ 而在水中 } k_a=80) \quad (2.4)$$

2.2 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):

$$t_i(\text{or } \alpha_i) = \sum_{j=1}^M p_j d_{ij} \quad (2.5)$$

式 2.5 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與附錄一。

三、研究成果

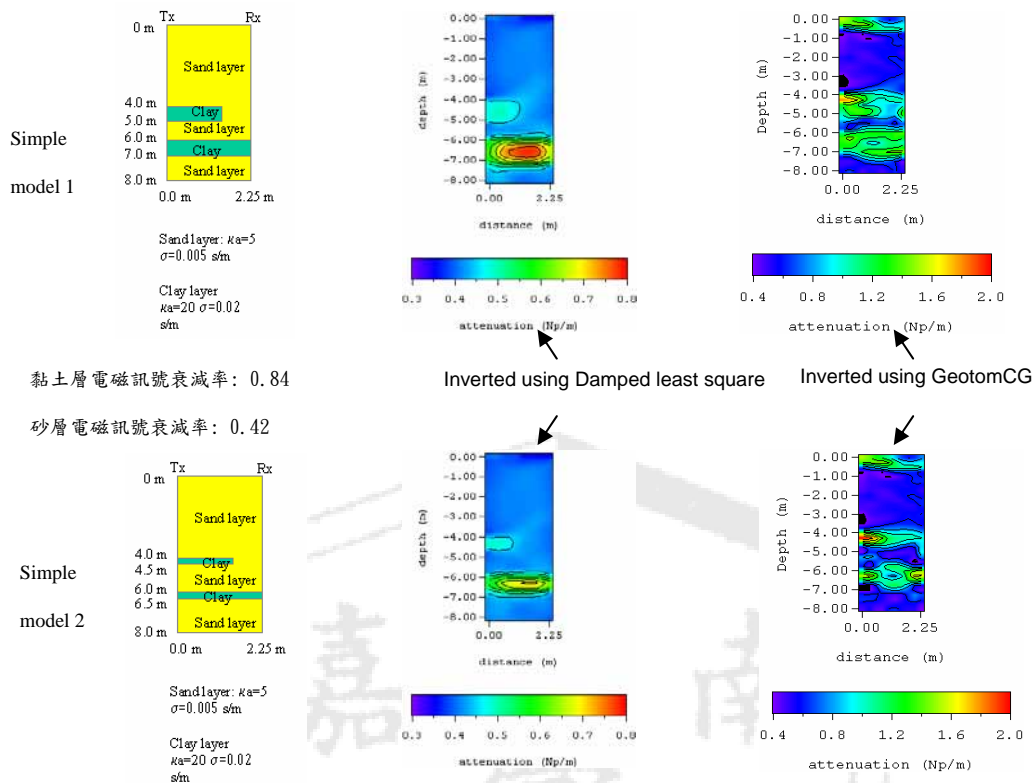
(1) 透地雷達影像反演算程式之撰寫

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 2.5 中可根據直進路徑假設建立模型矩陣 (由式 2.5 中 p_j 組成)、路徑參數矩陣 (d_{ij})，以及觀測值矩陣 ($t_i(\text{or } \alpha_i)$)。本研究運用阻尼最小平方法 (Damped least square method)，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。反演算程式之內容請參照附錄一，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方法對掃描影像之解析度探討

如節 2.2 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 3 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。

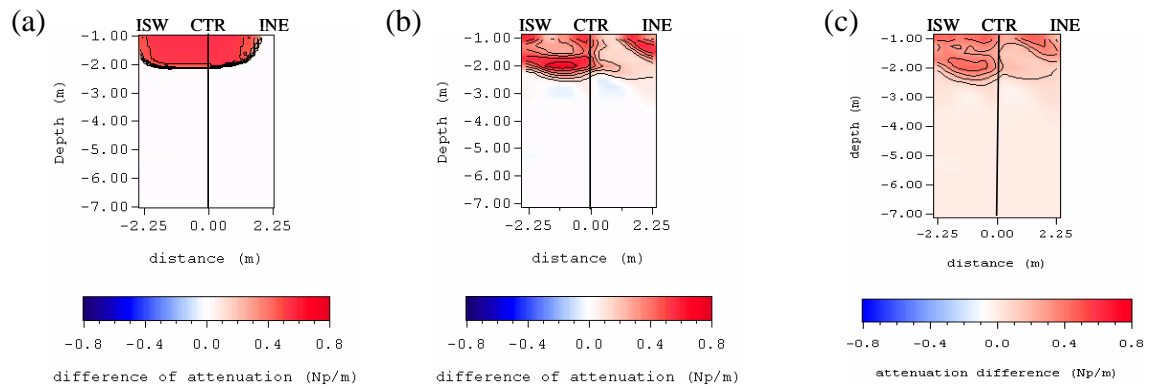


圖一、運用兩種簡單模型驗證不同反演算程式之結果

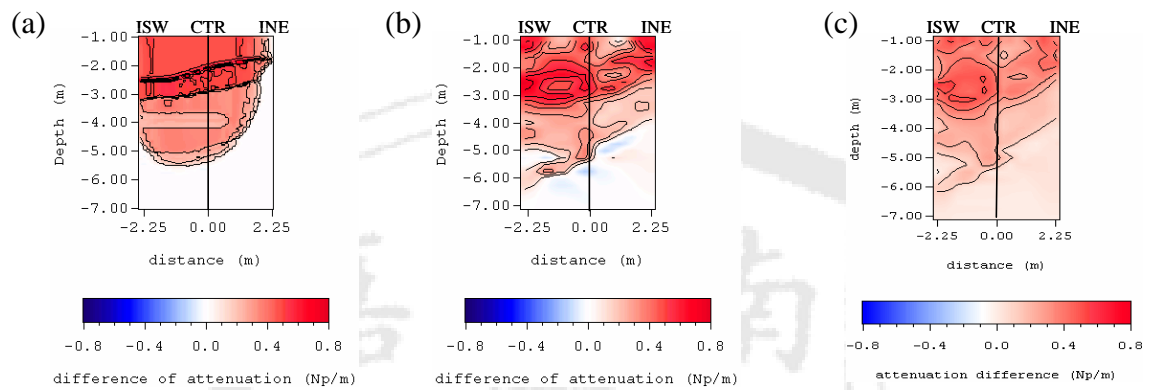
(3) 地層與地下水層物理狀況對透地雷達斷層掃描之誤差分析。

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、第二十一日、以及第四十二日之衰減率變化原始結果、GeotomCG 反演算與阻尼最小平方反演算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，由於阻尼最小平方反演算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，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。但比較所得之衰減率變化，阻尼最小平方反演算所得之值較 GeotomCG 接近原模型之設定值，顯示以阻尼最小平方反演算所得之影像，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。

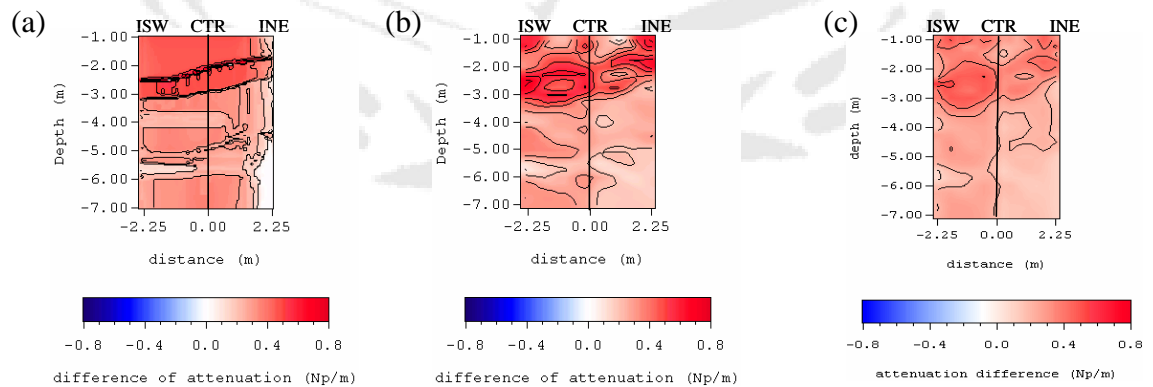
Day 7



Day 21



Day 41



圖二、入滲試驗開始後第七日、第二十一日、以及第四十二日之(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，再以阻尼最小平方方法反演算所得之影像結果

四、結論

提升透地雷達斷層掃描影像之解析度與精確度之研究，透地雷達(Ground Penetrating Radar, GPR)斷層掃描技術(Tomography)已被用在許多飽和、未飽和地下水層與汙染傳輸研究上。本研究完成以阻尼最小平方法進行直進波反演算之程式，與商程式 GeotomCG 之結果比較，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。若利用瞬變(Transient)水文地質模型比較衰減率變化原始結果、GeotomCG 反演算與阻尼最小平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)。由於阻尼最小平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，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。但比較所得之衰減率變化，阻尼最小平方法所得之值較 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。

五、參考資料

Davis, J., L., and Annan, A., P., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophys. Prosp., Vol.37, p. 531-551.

GeoTom, LLC, 1998, User Manual for GeotomCG and GeoTom3D

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., 84p.

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

計畫成果自評

本研究成功撰寫直進波透地雷達斷層掃描反演算程式，用於驗證跨孔透地雷達之解析度與精確度研究，比較一般傳統採用直線路徑之商用反演算程式 GeotomCG，本研究以阻尼最小平方法反演算之結果能較正確顯示簡單模型中之砂泥層分布情形。然而在動態入滲環境下，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，因此雖然影像大致與由商程式所得之結果相同，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，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。另外無論是商程式或自行開發程式之結果，訊號衰減率影像均未能如波速反演算影像一般呈現正確之入滲地下水分布，顯示訊號衰減率反演算受波進路徑影響較大，未來將檢討是否利用曲線波理論撰寫反演算程式，以提升訊號衰減率反演算成果。

附錄一 透地雷達反演算 Matlab 程式

```
clear
t0=clock;
% spatial discretisation
Dr = 0.25;
% Read the measured attenuation from observation file
[Xt,Zt,Xr,Zr,FTIME]=textread('raytime.txt','%n%*n%n%n%*n%n%n');
[ATT]=textread('rayatt.txt','%*n%*n%*n%*n%*n%*n%*n');

% Calculate the total number of ray paths
nequat=length(FTIME);

% Calculate the model size(number of cells in x- and z- direction)
nx=1+abs(Xt(1)-Xr(1))/Dr;
nz=1+abs(max(Zr)-min(Zr))/Dr;
nmod=nx*nz;

% Setup the model vector (univorm model with attenuation=0.7 Np/m)
inimod=5;
iniatt=0.74;
MODT=inimod*ones(nmod,1);
MODA=iniatt*ones(nmod,1);
SOLT=ones(nmod,1);
SOLA=ones(nmod,1);
% Build the inversion matrix space
AMAT=sparse(zeros(nequat,nmod));

% Doing the forward modeling and build the equation matrix
for s=1:nequat;
    % define flags (Zt(s) and Zr(s) are negative)
    Si=1+Xt(s)/Dr;
    Sj=fix(1-Zt(s)/Dr);
    Ri=fix(1+Xr(s)/Dr);
    Rj=fix(1-Zr(s)/Dr);
    ncelli=1+fix(abs((Xr(s)-Xt(s))/Dr));
    % Search the ray path and write the A matrix (for theta<=45 degrees)
    theta=atan((Sj-Rj)/abs(Ri-Si));
    sflag=sign(theta);
    jcount=1;
    for i=1:ncelli
        if theta>=0
            if (i-0.5)*tan(theta)<=(jcount-0.5)
                j=Sj-(jcount-1);
                if i==1
                    dis=(0.5/cos(theta))*Dr;
                elseif i==ncelli
                    dis=(0.5/cos(theta))*Dr;
                else
                    dis=(1/cos(theta))*Dr;
                end
            end
        end
    end
end
```



```

        vflag=i+nx*(j-1);
        AMAT(s,vflag)=dis;
    else
        j=Sj-(jcount-1);
        M=(i-0.5)*tan(theta)-jcount+0.5;
        N=M/tan(theta);
        disa=Dr*(1-N)/cos(theta);
        vflaga=i+nx*(j-1);
        AMAT(s,vflaga)=disa;
        disb=Dr*N/cos(theta);
        vflagb=i+nx*(j-2);
        AMAT(s,vflagb)=disb;
        jcount=jcount+1;
    end
else
    if (i-0.5)*tan(-theta)<=(jcount-0.5)
        j=Sj+(jcount-1);
        if i==1
            dis=(0.5/cos(theta))*Dr;
        elseif i==ncelli
            dis=(0.5/cos(theta))*Dr;
        else
            dis=(1/cos(theta))*Dr;
        end
        vflag=i+nx*(j-1);
        AMAT(s,vflag)=dis;
    else
        j=Sj+(jcount-1);
        M=(i-0.5)*tan(-theta)-jcount+0.5;
        N=M/tan(-theta);
        disa=Dr*(1-N)/cos(theta);
        vflaga=i+nx*(j-1);
        AMAT(s,vflaga)=disa;
        disb=Dr*N/cos(theta);
        vflagb=i+nx*j;
        AMAT(s,vflagb)=disb;
        jcount=jcount+1;
    end
end
end
end

% Do the LSQR calculation
% Damping Matrix
DMAT=diag(1*ones(nmod,1),0);
% Forming left hand side matrix
ATOT=[AMAT;DMAT;DMAT];
ATOT2=[AMAT;DMAT];
% Forming right hand side vector
CONV=zeros(nmod,1);

```

```

RHST=[FTIME;MODT];
RHSA=[ATT;CONV;MODA];
% Do the LSQR calculation
MODT=lsqr(ATOT2,RHST,[],200,[],[],MODT);
MODA=lsqr(ATOT,RHSA,[],200,[],[],MODA);

% -----Do smoothing-----
SOLT=MODT;
SOLA=MODA;
for qq=3:nz-2
    for pp=3:nx-2

SOLT(pp+nx*(qq-1))=(MODT(pp+nx*(qq-2))+MODT(pp+nx*qq)+MODT(pp+nx*(
qq-1)+1)+MODT(pp+nx*(qq-1)-1)+MODT(pp+nx*(qq-1)))/5;

SOLA(pp+nx*(qq-1))=(MODA(pp+nx*(qq-2))+MODA(pp+nx*qq)+MODA(pp+nx*(
qq-1)+1)+MODA(pp+nx*(qq-1)-1)+MODA(pp+nx*(qq-1)))/5;
    end
end
% Data smoothing for left and right edges
for kk=1:nz
    SOLT(2+nx*(kk-1))=(MODT(2+nx*(kk-1))+MODT(3+nx*(kk-1)))/2;
    SOLT(nx*kk-1)=(MODT(nx*kk-1)+MODT(nx*kk-2))/2;
    SOLT(1+nx*(kk-1))=SOLT(2+nx*(kk-1));
    SOLT(nx*kk)=SOLT(nx*kk-1);
    SOLA(2+nx*(kk-1))=(MODA(2+nx*(kk-1))+MODA(3+nx*(kk-1)))/2;
    SOLA(nx*kk-1)=(MODA(nx*kk-1)+MODA(nx*kk-2))/2;
    SOLA(1+nx*(kk-1))=SOLA(2+nx*(kk-1));
    SOLA(nx*kk)=SOLA(nx*kk-1);
end

% -----
% Output the solution
Fid = fopen('inv_tt.txt','a');
for p=1:nz;
    for q=1:nx;
        vecount=q+(p-1)*nx;
        fprintf(Fid,'%g %g %g\n',(q-1)*Dr,(1-p)*Dr,SOLT(vecount));
    end
end
fclose(Fid);

Fid = fopen('invatt.txt','a');
for p=1:nz;
    for q=1:nx;
        vecount=q+(p-1)*nx;
        fprintf(Fid,'%g %g %g\n',(q-1)*Dr,(1-p)*Dr,SOLA(vecount));
    end
end
fclose(Fid);

```