

二維半空間中掩埋物體影像重建之研究

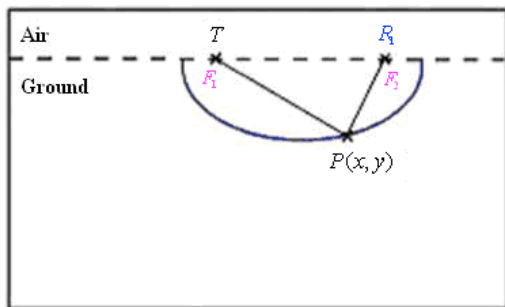
藍振璋*、林俊華

國立臺灣海洋大學電機工程學系

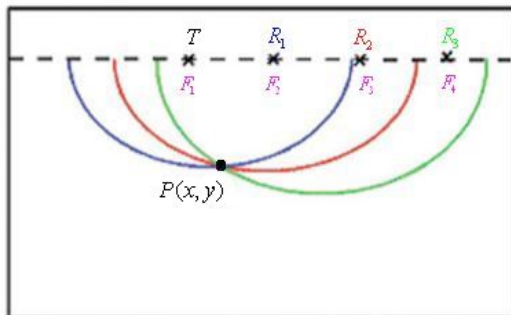
摘要 — 本論文在二維空間中，使用作者Neyrat等人提出的波前移動技術[1]進行掩埋物體的影像重建，並觀察掩埋物體的重建影像，判斷物體介電常數的大小。接著，使用平面波反射係數公式的概念，獲得一修正參數 a ，經由計算後，可精準地估計出掩埋物體的相對介電常數。

一、波前移動技術

波前移動技術(wavefront migration technique)[1]成像的概念，如圖一及圖二所示，將發射端與接收端，視為橢圓中的兩個焦點 F_1 及 F_2 ，並利用橢圓上任意點 $P(x, y)$ 與兩焦點距離之和皆相等的特性，將一個天線組(包含一個發射端及數個接收端)中，相同發射端(F_1)與不同接收端(F_2 、 F_3 、 F_4)所繪之橢圓進行疊加的動作。其中點 $P(x, y)$ 為半空間下半區域中的任意點，也就是散射體可能存在的位置。



圖一 發射端與接收端的橢圓特性結構



圖二 不同接收端之橢圓線性疊加

圖二中，影像重建過程的數學表達式如下式，

$$E_{i=1} = \sum_{j=1}^N \left[\int_{-\infty}^{+\infty} R_{i=1,j}(t) \cdot \delta(t - t_{1,j}(x, y)) dt \right] \quad (1)$$

+

$$\begin{matrix} \vdots \\ + \\ E_{i=M} = \sum_{j=1}^N \left[\int_{-\infty}^{+\infty} R_{i=M,j}(t) \cdot \delta(t - t_{M,j}(x, y)) dt \right] \end{matrix} \quad (2)$$

↓

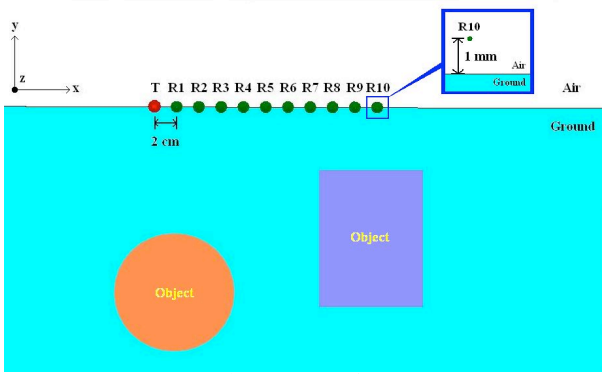
$$E_{total} = E_{i=1} + E_{i=2} + \dots + E_{i=M} + \dots \quad (3)$$

$$t_{i,j}(x, y) = \frac{\overline{T_i P(x, y)} + \overline{P(x, y) R_j}}{c / \sqrt{\epsilon_{r,ground}}} \quad (4)$$

上列所有式子中的 i 及 j ，分別代表不同位置的發射端及接收端。如(2)式， N 為接收端的個數、 M 為第 M 組天線位置的發射端、 $\delta(t - t_{M,j})$ 為 Dirac delta function，當 t 等於 $t_{M,j}$ 時，(2)式的中括弧可直接表示成 $R_{M,j}(t_{M,j})$ 。其中， $R_{M,j}(t)$ 為第 M 組天線位置中不同接收端接收到的時域訊號。經過(4)式運算後，可將 $\overline{T_i P(x, y)} + \overline{P(x, y) R_j}$ (訊號從發射端到 $P(x, y)$ 到接收端所行走的距離)除以速度得到的時間 $t_{i,j}(x, y)$ ，轉換成時域訊號 $R_{i,j}(t)$ 所對應的 timesteps，再將此 timesteps 對應到的電場大小，依兩焦點與 $t_{i,j}(x, y)$ 的關係，繪成一個橢圓。接著，對所有 $P(x, y)$ 與接收端重複上述步驟，可得到重建影像圖中，每個 $P(x, y)$ 位置上一部分的像素(pixel)大小，也就是 $E_{i=M}$ ($E_{i=M}$ 為每個位置的像素構成的矩陣)。所以，經由改變天線組的模擬位置(如過程(1)式至(2)式)，進行多次橢圓影像加後((3)式)，可由重建影像中，獲得散射體實際位置的重要資訊。

二、物體重建影像的分析與探討

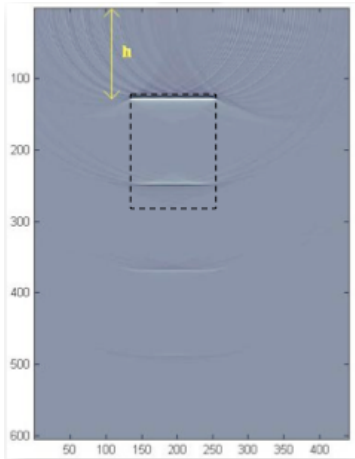
實際測量時，量測儀器應放在地表上，因此，為了符合真實結構，我們將天線組平行放置於半空間介面上 1mm 的位置。天線組的安排如圖三所示，一個天線組包含一個發射端和十個接收端，發射端的位置在天線組的最左端，並在發射端右邊每隔兩公分的位置依序放置接收端。此外，一張影像重建圖數據取得的過程，為將天線組由左至右水平移動，每模擬一次，並將天線組往右移六公分，移動十二次，共得到十三組數據。本研究使用波前移動技術搭配圖三之模擬結構，進行掩埋物體的影像重建。



圖三 模擬空間

2.1 金屬

首先，藉由重建影像去分析掩埋物體的材料。如圖四所示，可以清楚地看到一個距離地表最近的清晰平面。假如在此清晰平面的下方，沒有清楚地看見一個其平面寬度較第一個清晰平面寬、且末端向上微彎的紋路(圖五)；或是，其平面寬度較第一個清晰平面較窄、且末端往下些微內彎的紋路的話(圖六)，此矩形物體的材料應為金屬。



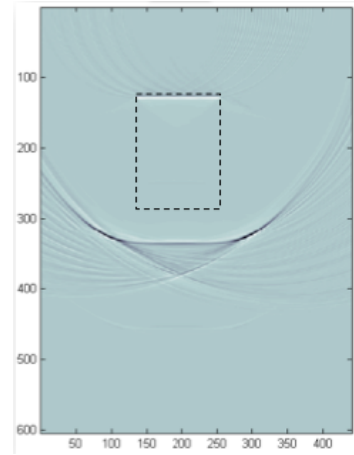
圖四 矩形正放，PEC， $\epsilon_{r,ground} = 6$ ， $\sigma_{ground} = 0$ (TM)

如圖四，可將地表與第一個清晰平面之間的距離稱為深度h，並把h視為地表與矩形上平面之間的距離。由於半空間的關係，在影像重建圖中可以看到一些因訊號在物體與地表之間來回反射所造成的平面。因此，在第一個清晰平面下方距離1h、2h的位置深度，可看見一些顏色較第一個清晰平面淡、且與第一個清晰平面等寬的平面。物體影像重建的部分，物體側面，因反射角度的關係，接收端幾乎接收不到矩形側面的回波，而當物體為金屬時，因電磁波無法穿透金屬，加上非破壞性量測的因素，即使將發射端放在離物體較遠處，入射波也打不到矩形下平面，自然而然不會有回波的產生。

2.2 物體介電常數大於背景介電常數

首先，藉由重建影像去分析掩埋物體的材料。如圖五所示，可看到一個距離地表最近的清晰平面。假如在此清晰平面的下方，可以很清楚地看見一個平面寬度較

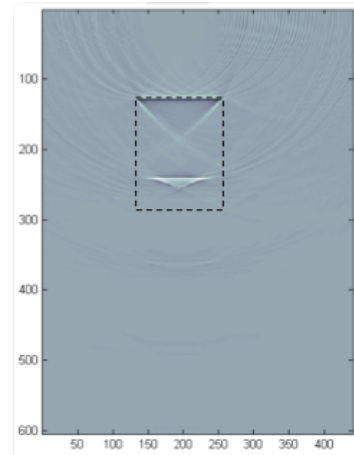
第一個清晰平面寬、且末端向上微彎的紋路的話，此矩形物體的材料應為介質，且此物體的介電常數大於背景的介電常數。此種平面寬度較第一個清晰平面寬、且末端向上微彎的紋路，是因為當物體介電常數大於背景介電常數時，電磁波穿透介質物體打到矩形的下平面後，在介質物體裡多重反射所造成的影像。



圖五 矩形正放， $\epsilon_{r,object} = 10$ ， $\epsilon_{r,ground} = 6$ ， $\sigma_{ground} = 0$ (TM)

2.3 物體介電常數小於背景介電常數

如圖六，可看到一個距離地表最近的清晰平面。如果在此清晰平面的下方，可清楚地看見一個平面寬度較第一個清晰平面較窄、且末端往下些微內彎的紋路的話，此矩形物體的材料應為介質，且此物體的介電常數小於背景的介電常數。此種平面寬度較第一個清晰平面較窄、且末端往下些微內彎的紋路，是因為當物體介電常數小於背景介電常數時，電磁波穿透介質物體打到矩形下平面後，在介質物體裡多重反射所造成的影像。



圖六 矩形正放， $\epsilon_{r,object} = 3$ ， $\epsilon_{r,ground} = 6$ ， $\sigma_{ground} = 0$ (TM)

2.4 不同材料物體混合擺放

如圖七至圖九，當不同材料掩埋物體混和擺放時，皆可利用 2.1 至 2.3 節單一物體的經驗，判斷掩埋物體的材料應為金屬、還是介電常數大於或是小於背景介電常

數的介質，並皆可重建出矩形的深度以及上平面的寬度。

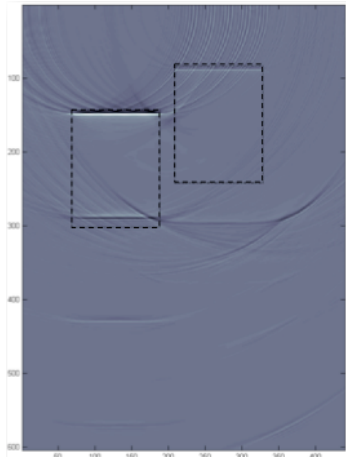
三、二維半空間中介質物體材料分析

3.1 反射量修正估計法

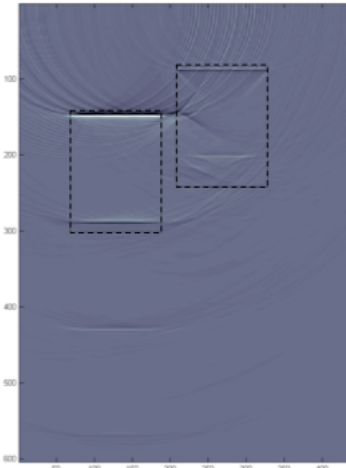
對於掩埋在地底下、或是任何形式半空間中物體的材料，是我們所關注的。在非破壞性探測的前提下，實際測量時，接收端能接收到的訊號包括：(一)水平方向的入射場 (二)掩埋物體的反射訊號。如(5)式與(6)式，分別為平面波理論反射係數的定義及公式，

$$\Gamma_{theory} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} \quad (5)$$

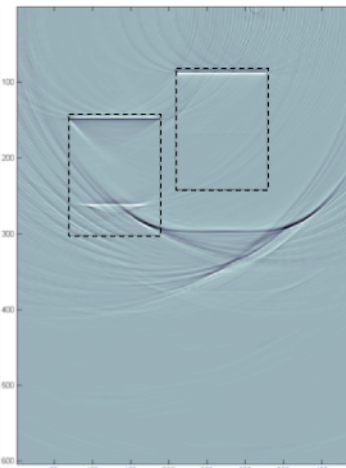
$$\Gamma_{theory} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (6)$$



圖七 左右物體為(PEC、 $\epsilon_r = 10$) (TM)

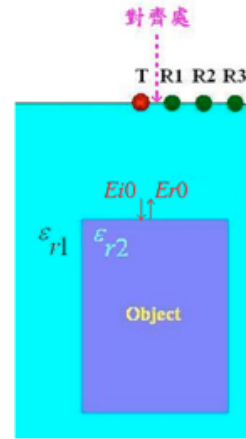


圖八 左右物體為(PEC、 $\epsilon_r = 3$) (TM)



圖九 左右物體為($\epsilon_r = 3$ 、 $\epsilon_r = 10$) (TM)

其中，(5)式中的分子與分母分別為圖十中，背景與物體界面上的入射場及反射場強度，



圖十 介質材料模擬空間設置

由於非破壞性量測的因素，導致在實際測量時，無法得到介質物體的理論反射場強度 E_{r0} 。因此，我們運用上述概念，將第一個接收端(R1)接收到的反射場強度 $E_{R1}^{peak,original object}$ ，利用平面波反射係數公式的概念，估計介質掩埋物體的反射係數。公式如下，

$$\Gamma_{estimated\ by\ R1} = \frac{E_{R1}^{peak,original\ object}}{E_{v_i,n}^{peak}} \quad (7)$$

(7)式中，分母為圖十中的入射場強度 E_{i0} 。由於使用(7)式估計出之相對介電常數與實際上有不小誤差，因此，我們提出一個修正參數 a ，如(8)式，

$$a = \frac{E_{R1}^{peak,original\ object} - E_{r0}}{E_{r0}} \quad (8)$$

由模擬結果得知，此修正參數只與背景介質有關，與物體介質無關，其結果之主要因為，第一次的反射波只在背景介質中行進，其振幅會隨著行進的距離增加而逐漸減弱，而訊號強度減弱的幅度，只與背景的介電常數有關，與物體的介質無關。

接著，為了將模擬與實作結合，我們將 (一)圖九(物體影像重建圖) (二)模擬得到之平行半空間介面方向的入射場強度 $E_{h,35}$ 、 $E_{h,20}$ ，以及 (三) R1 接收到的反射場強度 $E_{R1}^{peak,original object}$ ，視為在真實空間獲得的數據。見表格 I，可計算出模擬空間中水平與垂直入射場強度係數的比值 $\frac{C_v}{C_h}$ ，並在模擬空間中，依圖九的物體寬度與位置，適當放置一任意介電常數 $\epsilon_{r,testing object}$ 的測試物體，分別求出測試物體的修正參數 a 。然後，利用在模擬空間中求得的修正參數 a ，修正在真實空間中 R1 接收到的反射場強度 $E_{R1}^{peak,original object}$ 後，如表格 II，在非破壞性量測的前提下，可精準的估計出掩埋物體的相對介電常數 $\epsilon_{r,estimated by a}$ 。此外，此估計出的物體相對介電常數，與真實物體的相對介電常數之間的誤差 $\epsilon_{r,error}$ 也都在百分之一內。

表格 I：模擬環境中測試物體之數據

$\epsilon_{r,ground} = 6$	左	右
	h(深度)=35cm w(寬度)=30cm $\epsilon_{r,original object} = 3$	h(深度)=20cm w(寬度)=30cm $\epsilon_{r,original object} = 10$
$\epsilon_{r,testing object}$	5	
$E_{R1}^{peak,testing}$	8.59	12.05
$\frac{C_v}{C_h}$	18.9648	
$\Gamma_{theory,testing}$	0.0455	
a	-0.1039	-0.0840

表格 II：真實環境中真實掩埋物體之數據

$\epsilon_{r,ground} = 6$	左	右
$E_{R1}^{peak,original}$ (實測)	31.99	-33.6
$E_{h,35}$ (實測)	6.2067	14.477
$E_{v,35}$ (evaluated by $\frac{C_v}{C_h}$)	209.2481	289.0859
$\Gamma_{theory,original}$	0.1717	-0.1270
$\Gamma_{estimated by a}$	0.1706	-0.1269
$\epsilon_{r,estimated by a}$	3.0120	9.9947
$\epsilon_{r,error} = \frac{\epsilon_{r,estimated by a} - \epsilon_{r,original object}}{\epsilon_{r,original object}}$ (%)	0.4000	-0.0530

結論

在二維空間中，使用波前移動技術[1]在背景介質為無損的情況下，可重建出掩埋物體的部分形狀。並藉由觀察掩埋物體的重建影像，可分辨出物體應為金屬，還是介電常數大於或小於背景介電常數的介質。此外，我們使用平面波反射係數公式的概念，在背景介質無損的情況下，利用測量到的反射場強度與理論反射場強度之間的關係，獲得一修正參數 a ，利用此參數修正量測到的反射場強度後，可精準地估計出掩埋物體的介電常數。但是，當背景為有損介質時，暫無法用相同方法準確地估計出掩埋物體的介電常數。因此，未來的研究方向可朝背景介質有損耗時作進一步的探討，另外可嘗試在三維空間中，使用本論文提出之方法，獲得掩埋物體之影像以及估計物體之介電常數。

參考文獻

[1] M. Neyrat, C. Guiffaut, A. Reineix, and F. Reynaud, "Fast modeling using FDTD method and wave front inverse method for multisensor in the time domain," *Microwave and optical technology letters*, vol 51, no 3, pp. 796-802, Mar. 2009

[2] P. Meincke, "Linear GPR inversion for lossy soil and a planar air-soil interface," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 39, no. 12, pp. 2713-2721, Dec. 2001

[3] F. Soldovieri, O. Lopera, and S. Lambot, "Combination of advanced inversion techniques for an accurate target localization via GPR for deming application," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 49, no. 1, pp. 451-461, Jan. 2011

[4] Y. Liu, L. Li, and F. Li, "Novel algorithm for real time imaging of objects in a half-space with unknown characteristics," *IEEE Microwave Conference APMC*, pp. 1-4, 2008

[5] F. Soldovieri, A. Brancaccio, G. Prisco, G. Leone, and R. Pierri, "A kirchhoff-based shape reconstruction algorithm for the multimomostatic configuration: the realistic case of buried pipes," *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 3031-3038, Dec. 2008