

第三章

時間回轉(Time-Reversal)實驗模擬

3.1 簡介

本章中利用 FDTD 模擬陣列收發機的時間回轉實驗，首先會將模擬的空間配置與使用的 UWB 波源作介紹。接著由均勻介質空間開始探討一個偵測物體與兩個偵測物體時的聚焦解析度，進而介紹多重散射現象與引入介質透鏡(Dielectric Lens)進入我們的偵測分析。最後，我們也討論極化在時間回轉中使用的可行性。

3.2 FDTD 空間配置與 UWB 波源

使用 FDTD 來模擬電磁問題時，必須先決定網格大小 Δx 、 Δy 、 Δz 以及時間分割 Δt ，才能根據網格大小作空間切割，進而開始模擬，如同我們在之前 2.2.2 中 FDTD 穩定條件的介紹，網格大小與波源有很大的關係。在本篇論文中，由於我們都是以超寬頻(UWB)訊號來作未知物體的分析，以下便介紹 UWB 波源及相對應的網格與時間分割的決定。

圖 3.1 及圖 3.2 展示了兩個 UWB 訊號，我們可以從右側的頻譜看出其超寬頻特性，一般超寬頻訊號都是由高斯函數的一階到多階微分產生，圖 3.1 是高斯一階微分脈波，可以由公式(3.1)來獲得[24]，圖 3.2 是高斯四階微分脈波，可以由公式(3.2)來獲得[25]：

$$p(t) = 2\sqrt{e} \cdot (\pi t f_c) \cdot e^{-2(\pi t f_c)^2} \quad ; \quad f_c = 6.85 \text{GHz} \quad (3.1)$$

$$p(t) = \left(1 - 2\left(\frac{4\pi}{T_{au}}\right)t^2 + \left(\frac{4\pi}{T_{au}}\right)^2 t^4\right) \cdot e^{-2\pi\left(\frac{t}{T_{au}}\right)^2} \quad ; \quad T_{au} = 0.175 \text{ns} \quad (3.2)$$

雖然這兩個脈波都可以拿來當作激發波源，但由於高斯四階微分脈波的時域波形有

較多的震盪，可能增加在時間回轉實驗中，對於未知物體聚焦判別的複雜性，因此我們選擇用圖 3.1 的高斯一階脈波來當 UWB 波源。接著我們從頻譜來看，30GHz 時的頻譜強度已經較中心頻率(6.85GHz)小 60dB 左右，因此我們便定 FDTD 模擬時的最高頻率 $f_{\max} = 30\text{GHz}$ ，則為了保證數值模擬的準確度，我們取 f_{\max} 相對應波長的十分之一來當作 Δx 和 Δy ，即 $\Delta x = \Delta y = 1\text{mm}$ ，由於我們的模擬是在二維環境中，所以 Δz 便省略了，接著，在滿足 Courant criterion 的前提下，我們選擇 $\Delta t = 1\text{ps}$ ，接下來我們便介紹我們 2D FDTD 模擬的空間配置。

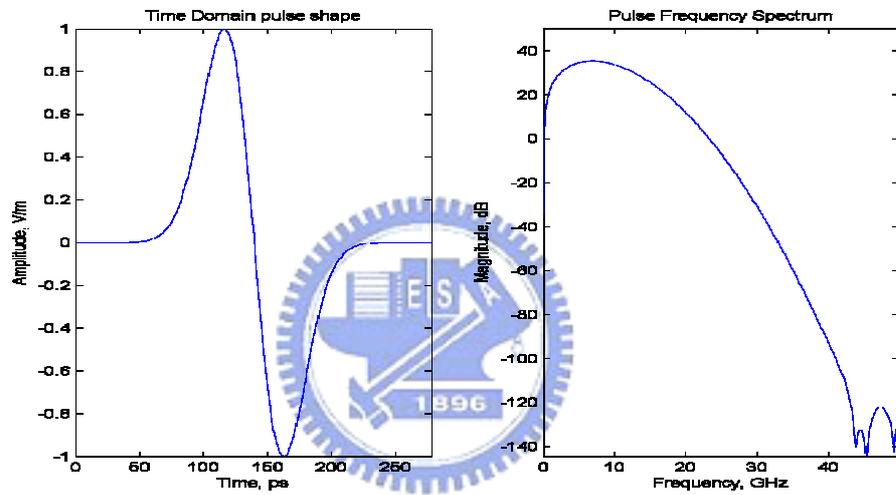


圖 3.1 高斯一階微分脈波

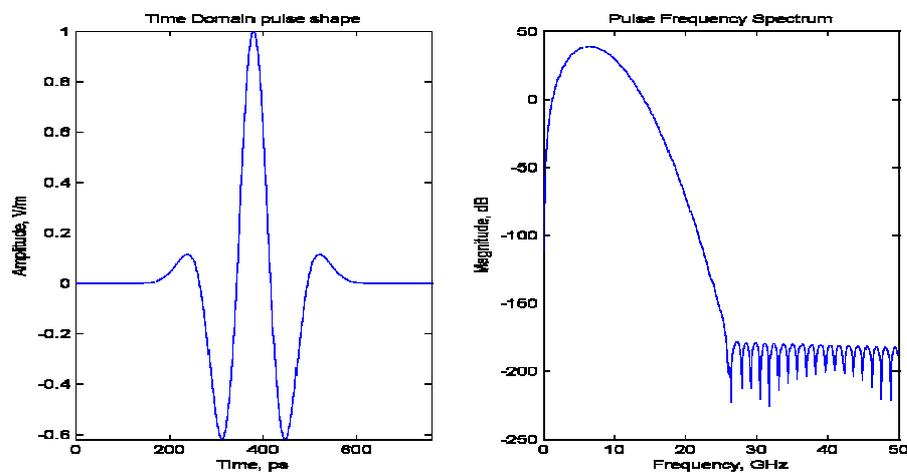


圖 3.2 高斯四階微分脈波

圖 3.3 與圖 3.4 展示的是對於 1 個未知物體與 2 個未知物體偵測時 FDTD 空間配置，模擬空間的大小都是 451×401 個網格，並且由於 $\Delta x = \Delta y = 1mm$ ，所以實際空間大小大約為 $45cm \times 40cm$ ，模擬空間的四周為了確保是開放空間的環境，我們用 10 層的 PML 來截斷電磁波，此外 a 代表的是所有收發機的排列寬度，L 代表的是收發機與欲偵測物體的垂直距離，sp 代表的是收發機的間距，tsp 代表的是 2 個欲偵測物體間間距。並且，由於我們使用的 UWB 脈衝中心頻率為 $6.85GHz$ ，換算一個波長約 $43.8mm$ ，從網格的角度來看，則是約 44 個網格。第 8 個收發機處標示的脈衝圖案代表的是在 Forward process 時，我們只從正中心位置的收發機打出 UWB 脈衝波。

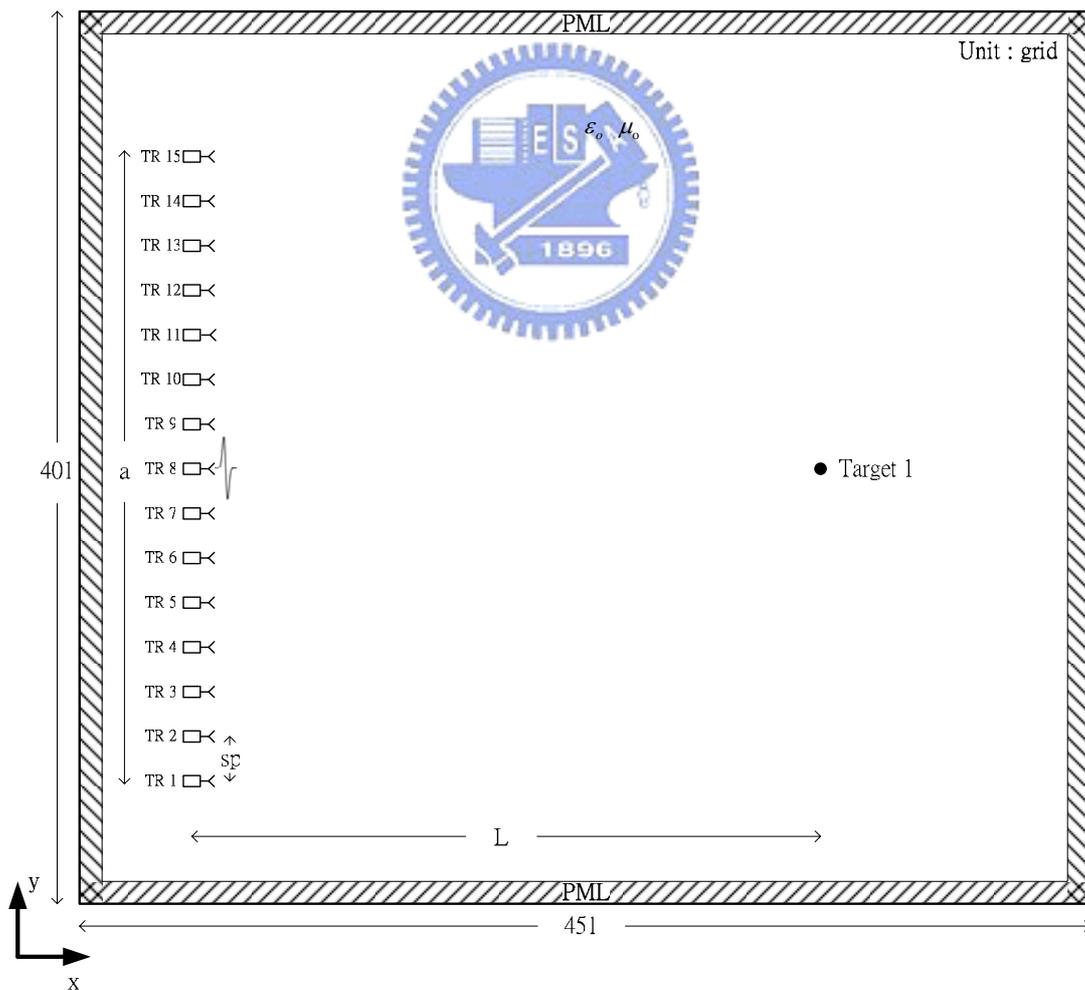


圖 3.3 偵測一個未知物體時的 FDTD 空間配置圖

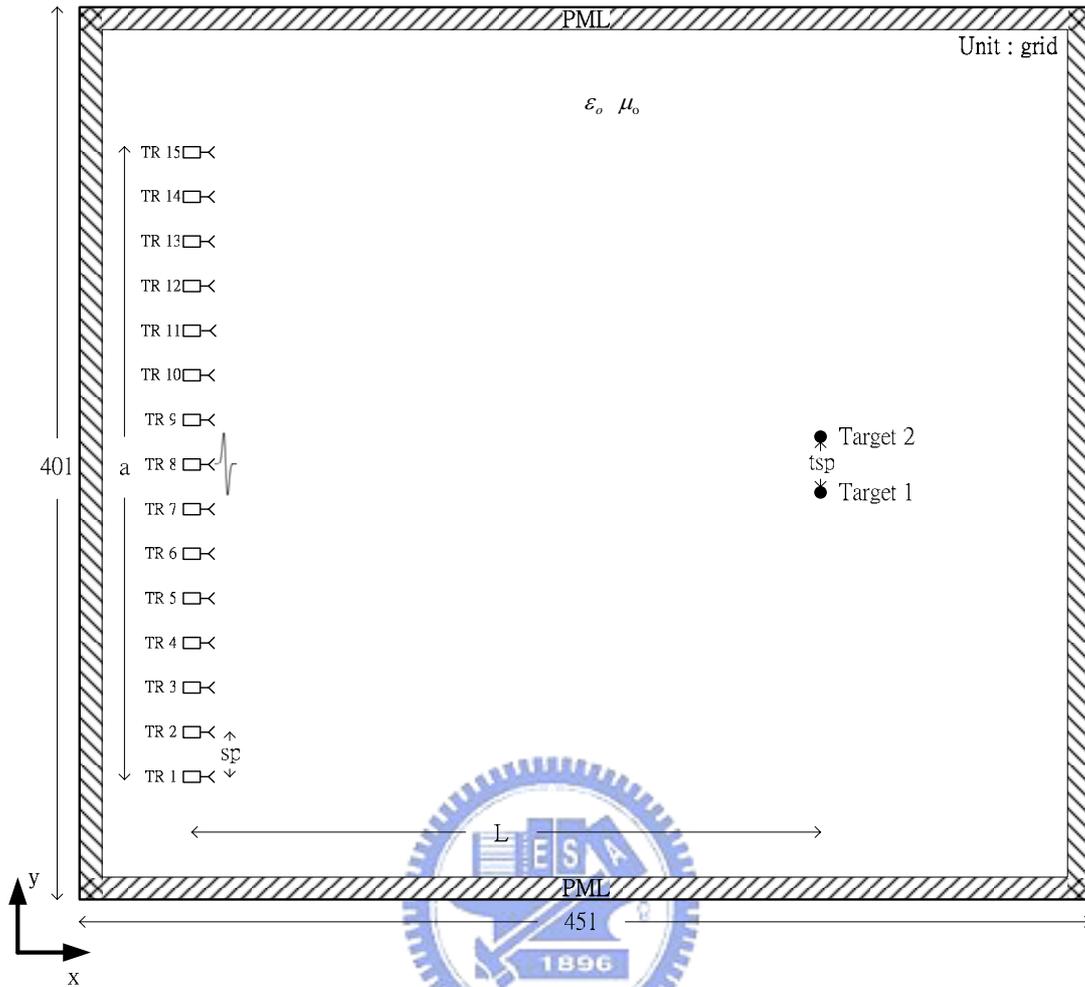


圖 3.4 偵測兩個未知物體時的 FDTD 空間配置圖

3.3 利用陣列收發機聚焦的解析度估測

在光學中的單狹縫繞射實驗裡，當單狹縫的狹縫寬度為 d ，以及與屏幕間的距離為 l 時，我們可以在屏幕上得到繞射的亮紋，其中中央亮紋的寬度為 $2\lambda_0 l/d$ ，其他亮紋的寬度 $\lambda_0 l/d$ ， λ_0 為光波波長。反觀我們的實驗，收發機的橫向排列就類似一個單狹縫，每個收發機的角色就如同一個點波源，所有收發機排列的寬度 a 則相似於狹縫寬度，而與偵測物體的垂直距離 L 便相似於單狹縫與屏幕的距離，當然，這兩種情況並不完全相同，因為單狹縫中的每一點都是一個新波源，而我們的收發機僅是離散地排列在寬度 a 的範圍內，但我們從單狹縫亮紋寬度的特性可以推知在我們的實驗裡，聚焦解析度也是會有

(3.3)式的比例關係。而一般我們說的光學繞射極限，Rayleigh 已經證明了大約是二分之一波長，這是在均勻環境條件下的解析極限，若是能造成超越這個解析極限 ($resolution < \lambda/2$)，則我們稱它作超解析(Super-resolution)，接下來的實驗當中，我們也將提出一個利用介質透鏡(Dielectric Lens)來達到超解析的方法。

$$resolution \approx \frac{\lambda L}{a} \quad (3.3)$$

3.4 均勻空間中一個未知物體的偵測

3.4.1 變化偵測物的垂直距離 L

見圖 3.3，我們固定 $a=280$ 格，收發機數目 15 個，間距 $sp=20$ ，從 $(x, y)=(50, 60)$ 垂直排列到 $(50, 340)$ ，並由第 8 個收發機 $(50, 200)$ 位置處激發一 UWB 測試訊號。接著我們變化未知偵測物體的位置來探討 L 的變化對解析度的影響，Target 1 我們把它設定為半徑 $r=2$ 格的金屬圓柱，和我們的中心頻率相對波長(44 格)相比是非常小的，大約是十分之波長，以下便討論 $L=70$ 格、 140 格、 280 格、 350 格等四種情況，分別代表 Target 1 在 $(120, 200)$ 、 $(190, 200)$ 、 $(330, 200)$ 、 $(400, 200)$ 等位置。

首先，時間回轉實驗的第一步驟：Forward process，我們分別激發兩次波源，第一次是將波打入不包含偵測物體的空間，並在收發機上記錄下入射場 $Ez_{inc}(t)$ ，第二次是將波打入包含偵測物體的空間，並在收發機上記錄下全場 $Ez_{tot}(t)$ ，將全場扣除入射場後則可以得到純粹由偵測物體來的散射場資料，如圖 3.5 所示，代表的是每個收發機上散射場的資料 $Ez_{scat}(t)$ ，我們可以看到由圖 3.5(a)~圖 3.5(d)，隨著散射物體擺的越遠，散射波接收到的時間越晚。接著，進行時間回轉實驗的第二步驟：Reverse process，我們將每個收發機上的散射波作時間回轉後重新打回不包含散射物體的空間，接著便觀察是否在原本散射物體位置處有發生聚焦現象，圖 3.6 代表的是 $L=280$ 時在原本散射物體位置處記錄到的 Ez 電場的資料，上方代表的是時域的變化，下方的兩個圖是當時域

資料的有最大值時，相對應空間上 E_z 電場在 x 及 y 方向的變化，我們可以看到的確有聚焦現象的產生，圖 3.7 則是電場 E_z 聚焦時的暫態空間分佈，我們可以看到聚焦的位置的確都是原本偵測物體的位置，圖 3.8 則是把聚焦時的橫向解析度拿來作正規化的比較，隨著 L 越大，聚焦的橫向解析度便開始變細，若以 -6dB 的電場值為聚焦時的解析度，則大約是電場強度為一半時來作分界，代表主要的能量都聚集在這個解析度範圍內，表 3.1 代表橫向解析度 -6dB 寬度比較，從表中來看，利用 $\lambda L/a$ 來作解析度的粗略估計，應該是可行的。

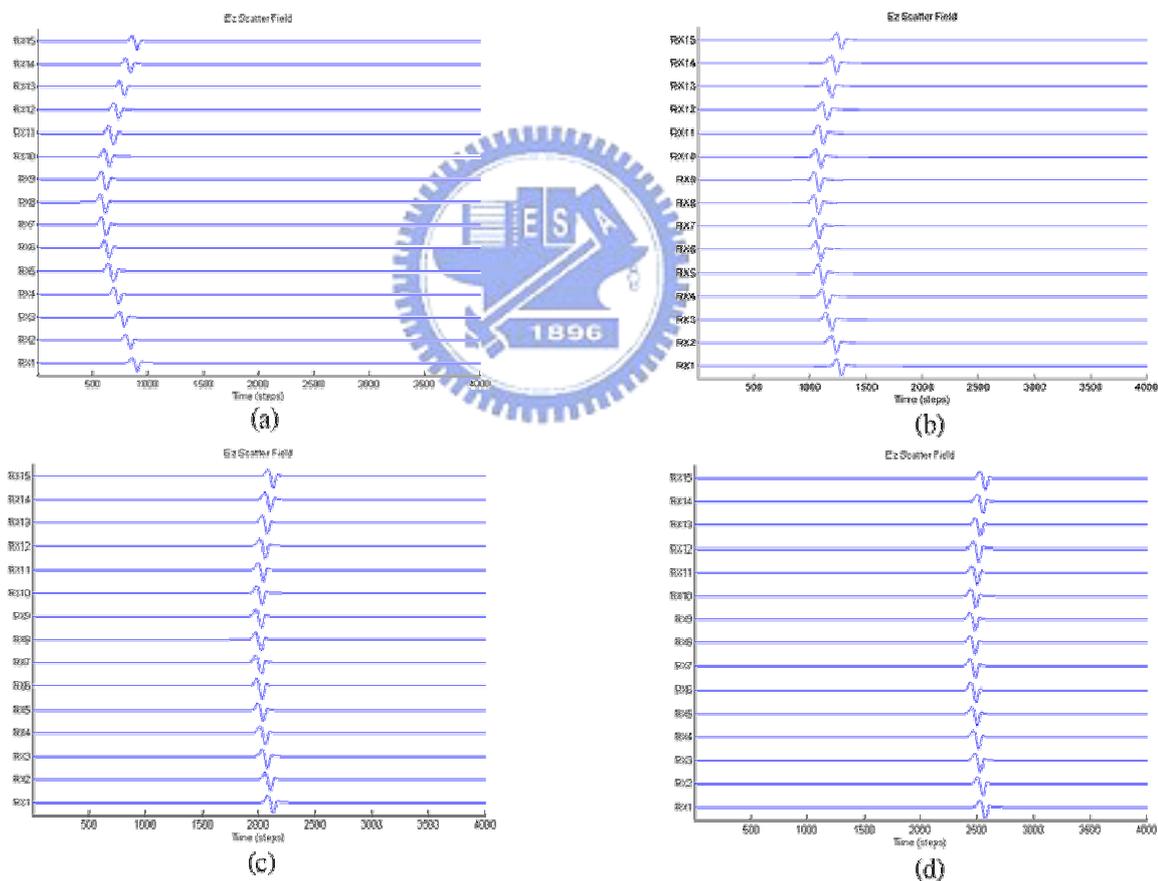


圖 3.5 均勻空間中一個偵測物時隨 L 變化的時域散射場資料 (a) $L=70$ (b) $L=140$ (c) $L=280$ (d) $L=350$

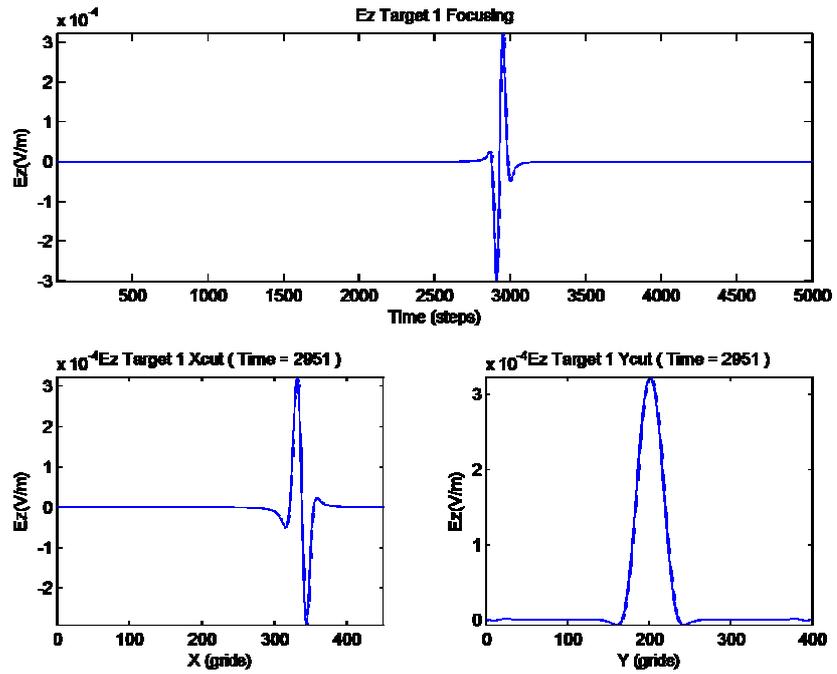


圖 3.6 均勻空間中一個偵測物時時域及空間的聚焦

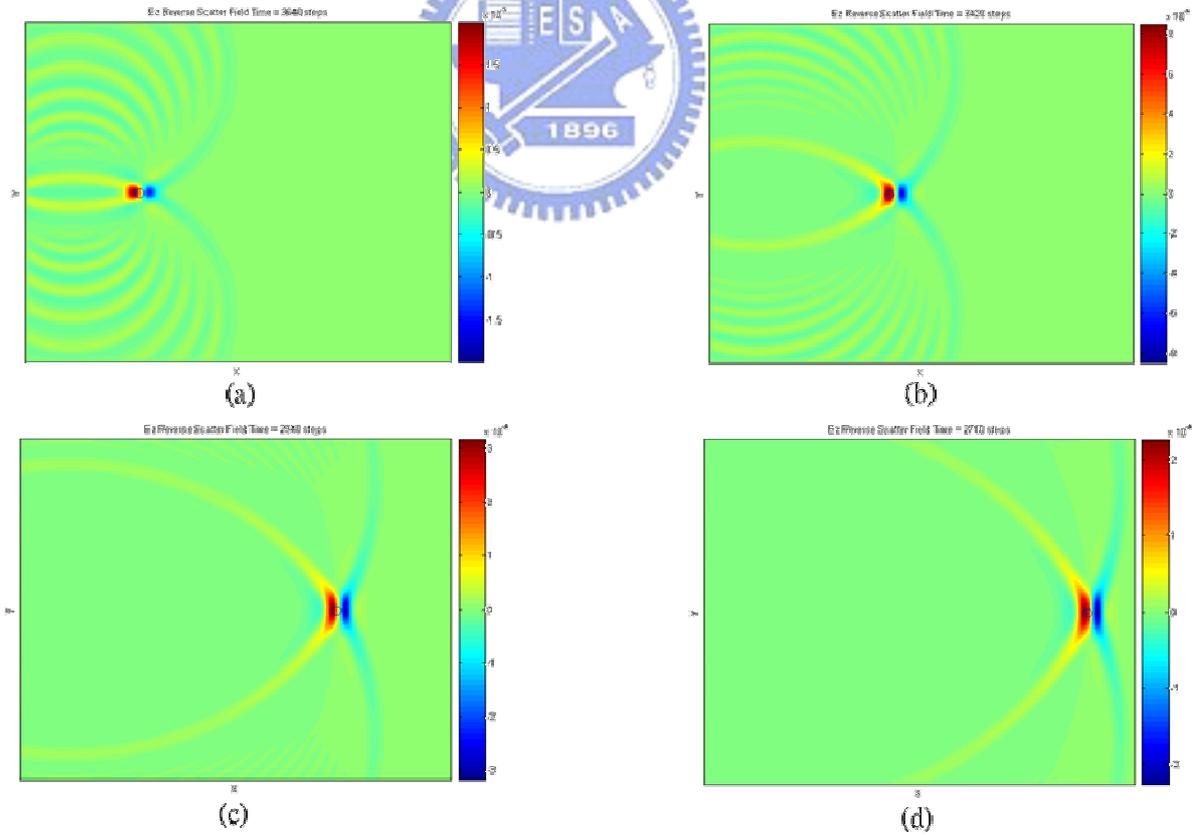


圖 3.7 均勻空間中一個偵測物時隨 L 變化的電場聚焦暫態圖 (a) $L=70$ (b) $L=140$ (c) $L=280$ (d) $L=350$

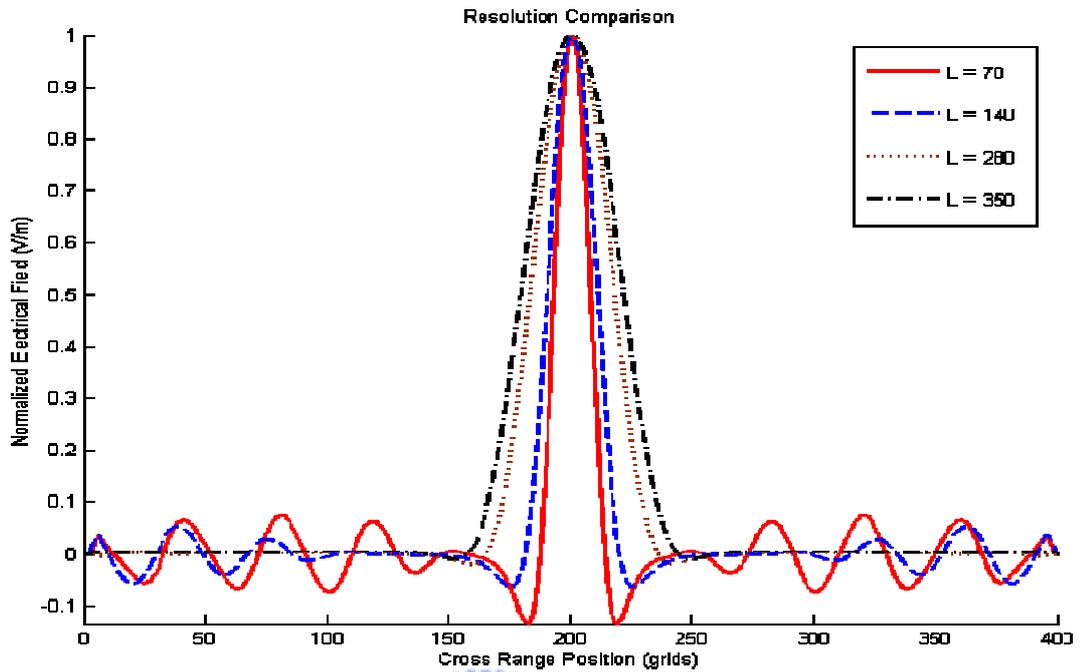


圖 3.8 均勻空間中一個偵測物時隨 L 變化的橫向解析度比較

表 3.1 均勻空間中一個偵測物時垂直距離 L 對解析度影響

	-6dB 寬度 (grids)	-6dB 寬度 (λ)	L/a
L = 70	15	0.35	0.25
L = 140	21	0.5	0.5
L = 280	35	0.8	1.0
L = 350	43	1.0	1.25

3.4.2 變化陣列收發機寬度 a

見圖 3.3，在這裡的分析，我們固定 L=280 格，收發機數目 15 個，考慮 a=280 格、140 格、70 格三種情況，a=280 格時相對的間距 $s_p=20$ 格，則收發機由 $(x, y)=(50, 60)$

垂直排列到(50, 340)，而 $a=140$ 格時相對的間距 $sp=10$ 格，則收發機由 $(x, y)=(50, 130)$ 垂直排列到(50, 270)，而 $a=70$ 格時相對的間距 $sp=5$ 格，則收發機由 $(x, y)=(50, 165)$ 垂直排列到(50, 235)，並由第 8 個收發機(50, 200)位置處激發一 UWB 測試訊號。Target 1 我們仍把它設定為半徑 $r=2$ 格的金屬圓柱。

圖 3.9 代表的是每個收發機上散射場的資料 $E_{z,scat}(t)$ ，我們可以看到由圖 3.9(a)~圖 3.9(c)，隨著收發機寬度 a 越來越大，接收到訊號的角度也跟著變大，相對波形的分佈也漸漸呈現弧線的形狀。圖 3.10 則是電場 E_z 聚焦時的暫態空間分佈，由於圖 3.9(a) 中每個收發機的的散射場幾乎一樣，因此造成在圖 3.10(a)中呈現了如同平面波傳播的情況，而隨著收發機寬度 a 越來越大，圖 3.10(b)、圖 3.10(c)呈現的聚焦情況也越來越明顯。

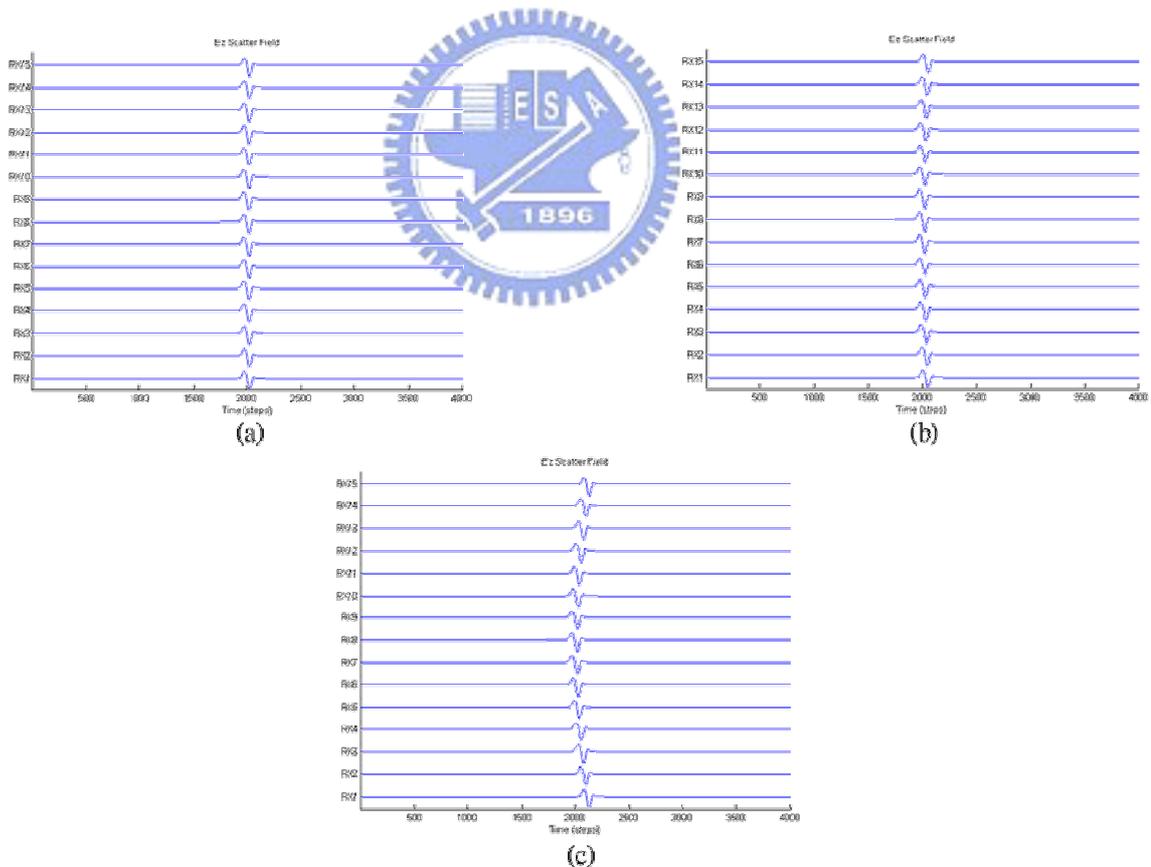


圖 3.9 均勻空間中一個偵測物時隨 a 變化的時域散射場資料 (a) $a=70$ (b) $a=140$ (c)

$a=280$

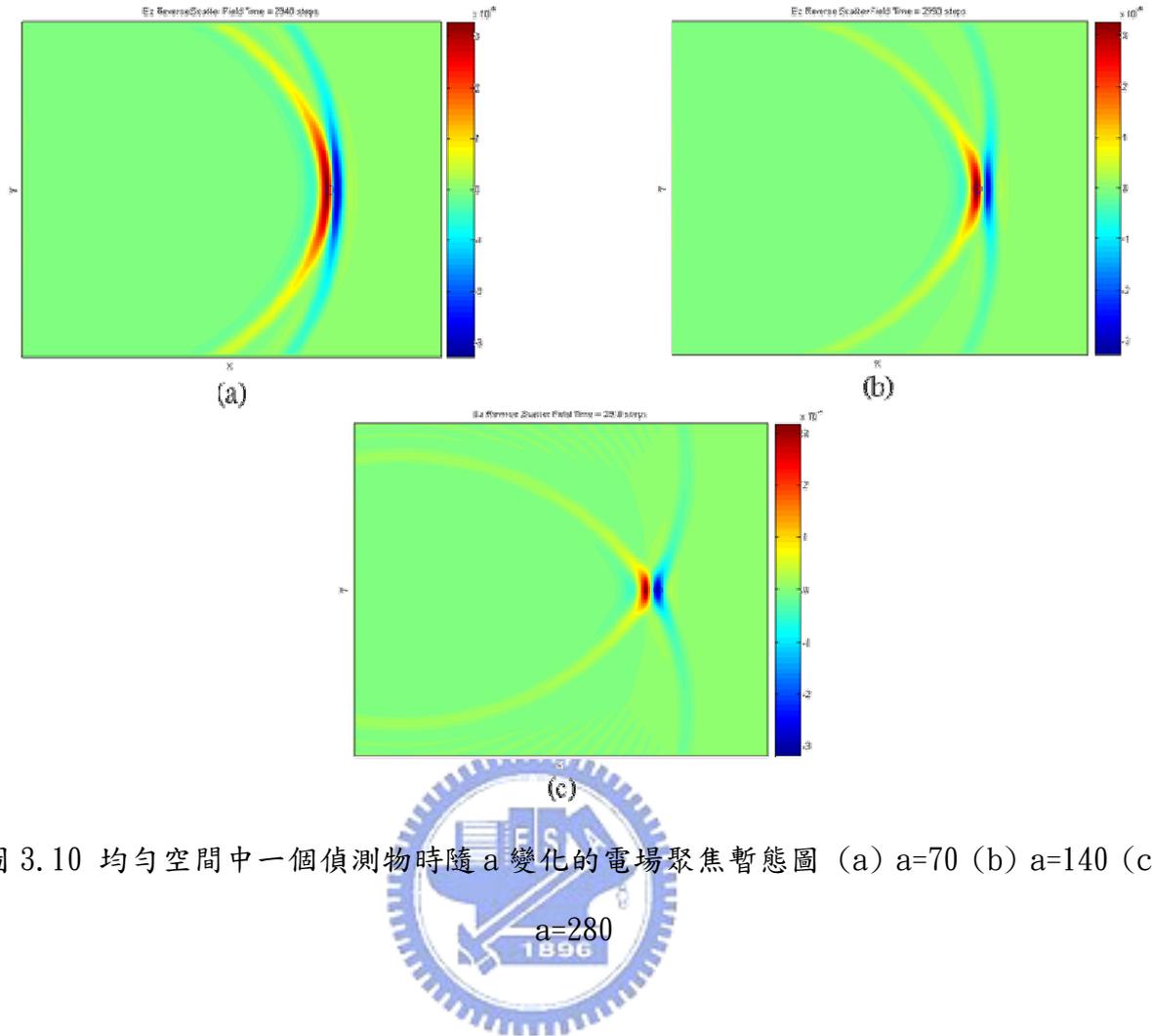


圖 3.10 均勻空間中一個偵測物時隨 a 變化的電場聚焦暫態圖 (a) $a=70$ (b) $a=140$ (c)

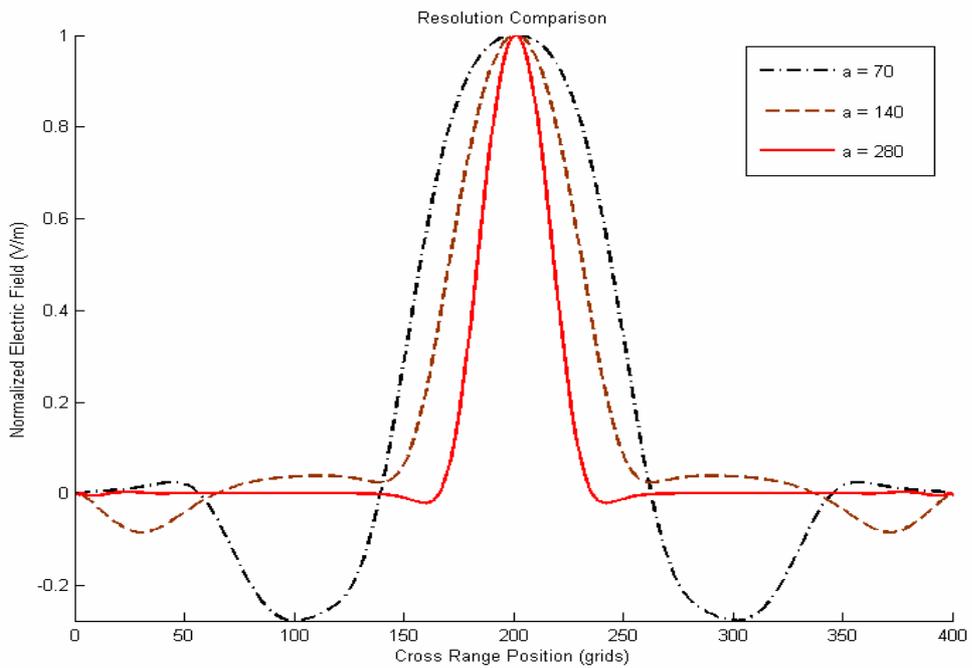


圖 3.11 均勻空間中一個偵測物時隨 a 變化的橫向解析度比較

表 3.2 均勻空間中一個偵測物時收發機寬度 a 變化對解析度影響

	-6dB 寬度 (grids)	-6dB 寬度 (λ)	L/a
$a = 70$	87	2.0	4
$a = 140$	61	1.4	2
$a = 280$	35	0.8	1.0

圖 3.11 則呈現了焦時刻橫向解析度的正規化比較，表 3.2 則呈現了聚焦時刻橫向解析度的-6dB 寬度比較，我們發現隨著 a 越來越小，與 $\lambda L/a$ 的估計值相差越大，我們用圖 3.10(a)來說明，由圖 3.10(a)我們看到聚焦時是呈現一個如同平面波的形式，要判斷聚焦已經是很困難了，所以才會造成這樣大的差距，而隨著圖 3.10(b)、圖 3.10(c) 聚焦現象的明顯化， $\lambda L/a$ 的估計值也與-6dB 寬度越來越接近。

3.5 均勻空間中兩個未知物體的偵測

3.5.1 變化偵測物間距 t_{sp}

見圖 3.4，這裡我們固定 $L=280$ 格， $a=280$ 格，收發機數目 15 個，間距 $sp=20$ ，從 $(x, y)=(50, 60)$ 垂直排列到 $(50, 340)$ ，並由第 8 個收發機 $(50, 200)$ 位置處激發一 UWB 測試訊號。接著我們變化兩個未知偵測物體的位置來探討它們之間的間距變化 t_{sp} 對解析度的影響，兩個待測物我們都把它設定為半徑 $r=2$ 格的金屬圓柱，這裡討論 $t_{sp}=22、44、66、88$ 四種情況， $t_{sp}=22$ 時，兩待測物中心分別為 $(330, 187)$ 及 $(330, 213)$ ， $t_{sp}=44$ 時，兩待測物中心分別為 $(330, 176)$ 及 $(330, 224)$ ， $t_{sp}=66$ 時，兩待測物中心分別為 $(330, 165)$ 及 $(330, 235)$ ， $t_{sp}=88$ 時，兩待測物中心分別為 $(330, 154)$ 及 $(330, 246)$ 。接著便依序進行時間回轉實驗的 Forward process 以及 Reverse process。

圖 3.12 代表我們接收到的散射場，觀察圖 3.12(a)~圖 3.12(d)的變化，圖 3.12 (a)

中的訊號只有一個脈波的形狀，但隨著兩個待測物的間距 t_{sp} 越來越大，圖 3.12(b)、~ 圖 3.12(d)中的訊號漸漸分離成兩個脈波，代表來自不同散射體的回波特性漸漸被分隔開了，接著，圖 3.13 是電場聚焦時的暫態圖，從圖 3.13(a)無法分辨兩個散射體，到圖 3.13(b)有一點分離的跡象，最後圖 3.13(c)和圖 3.13(d)已經可以清楚辨視出兩個物體，圖 3.14 則是散射物體聚焦時刻橫向解析度的正規化比較，我們更可以清楚地看到聚焦效果的好壞，結果同時整理於表 3.3。在固定 $L/a=1$ ，的情況下， $t_{sp}=22$ 格(0.5λ) 的間距是無法被解析出來， $t_{sp}=44$ 格(1.0λ)時恰可提供我們分辨兩個物體的聚焦現象，因此前面提到的解析度估測公式 $\lambda L/a$ 在兩個散射物體偵測時，同樣地提供了我們一個估測的依據，因此如何讓我們能夠在固定 $L/a=1$ ，即解析度約 λ 的情況下，分析出兩個間距半波長甚至更窄的物體，便是我們接下來的重點。

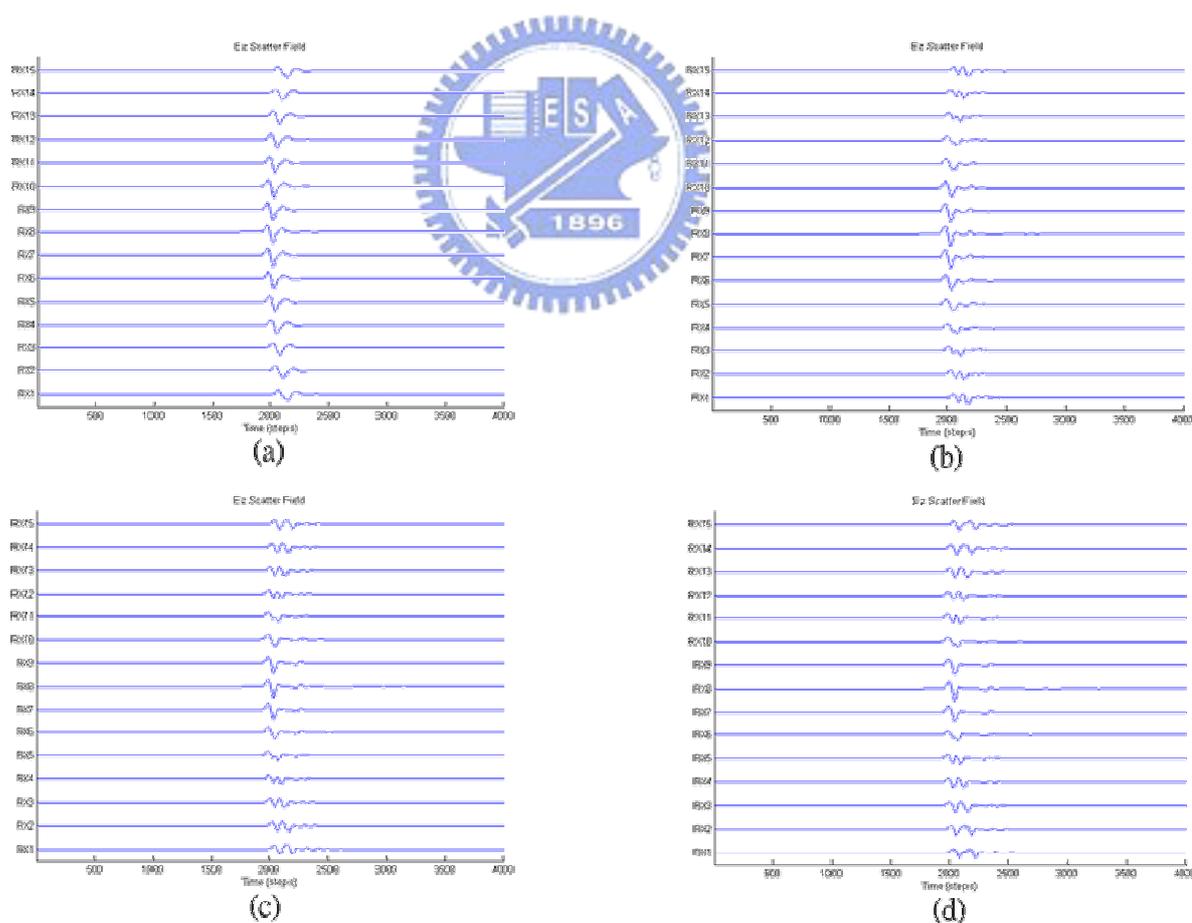


圖 3.12 均勻空間中兩個偵測物時隨 t_{sp} 變化的時域散射場資料 (a) $t_{sp}=22$ (b) $t_{sp}=44$
(c) $t_{sp}=66$ (d) $t_{sp}=88$

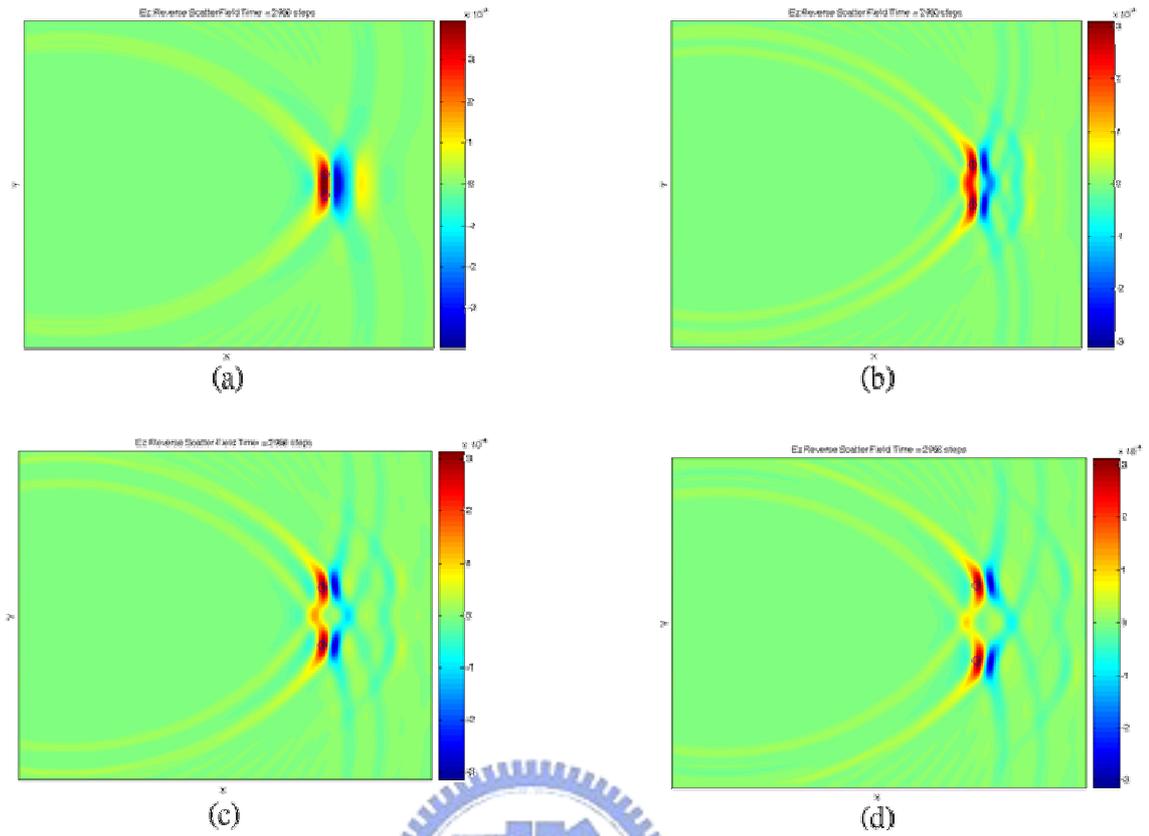


圖 3.13 均勻空間中兩個偵測物時隨 tsp 變化的電場聚焦暫態圖 (a) $tsp=22$ (b) $tsp=44$
(c) $tsp=66$ (d) $tsp=88$

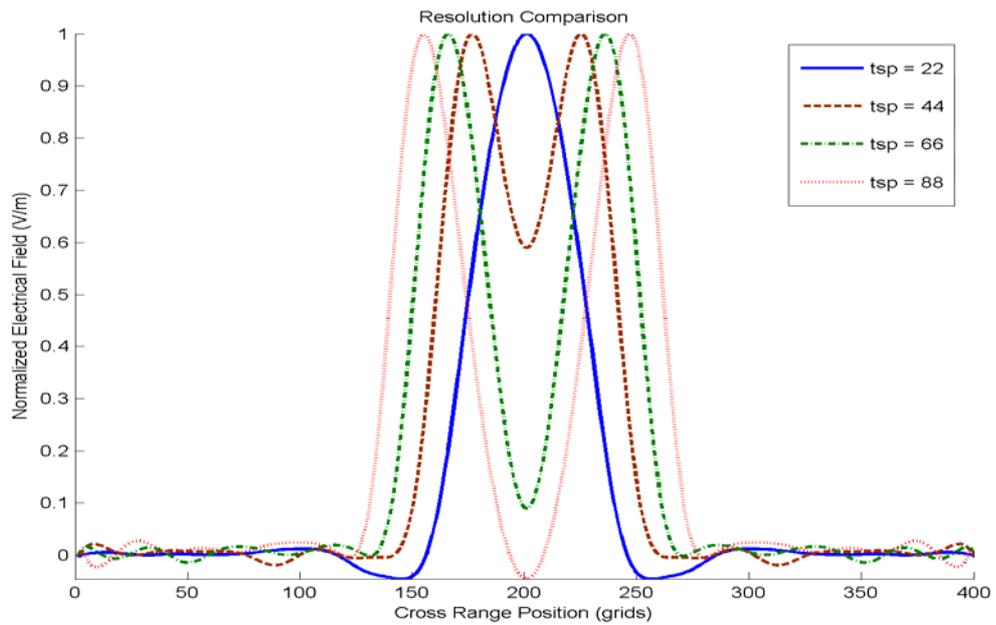


圖 3.14 均勻空間中兩個偵測物時隨 tsp 變化的橫向解析度比較

表 3.3 均勻空間中兩個偵測物時待測物間距 tsp 變化對辨視度影響

	tsp(λ)	辨視度
tsp = 22	0.5	無法分辨
tsp = 44	1.0	恰可分辨
tsp = 66	1.5	清楚分辨
tsp = 88	2.0	清楚分辨

3.6 多重散射(Multiple Scattering)現象介紹

無論是在一般環境中的無線通訊或是作非破壞性檢測時，由於環境中無可預期地會有許多散射物體，因此多重散射可以視為一個會自然發生的現象，而一般都會認為多重散射會帶來訊號接收的困難，甚至必需針對多重散射帶來的雜訊作額外的雜訊抑制，但在時間回轉(Time-Reversal)的研究中，多重散射卻是常被拿來研究的項目[5, 6]，因為多重散射雖然一樣會帶來額外的雜訊，但它同時提高了訊號在空間中的解析度，以下我們便針對多重散射如何提供較好解析度這部分，提出一些物理上的解釋。

首先，我們比較圖 3.15、圖 3.17 兩個環境，圖 3.15 代表的是發射機與收發機之間的环境是均勻的，也就是沒有多重散射的空間，圖 3.17 代表的是發射機與收發機之間的环境是包含許多會造成成散射、反射的介質，其中不同的顏色代表的是不同介質係數，可以視為一個容易造成多重散射的空間，先稱它作「介質透鏡」：

在均勻介質中傳遞的訊號，發射機與收發機之間僅存在一條直接路徑(line of sight)，如圖 3.16 所示，從接收機的角度來看，每個收發機僅接收到了特定方向來的發射訊號，當我們將這個訊號在 Reverse process 中由收發機打回接收機附近時，每個收發機也只能提供一個特定方向的訊號來聚焦，因此，收發機的數目以及它們擺設的寬度便影響到了聚焦時的效果，這裡提到的收發機寬度也可以用 2.3.1 的方式來形容，即發射機對所有收發機的張角，可以稱作孔徑寬度 a_w (aperture width)，孔徑寬度越大

時，聚焦時不同方向來的訊號成份越多，聚焦效果越好，反之則越差。

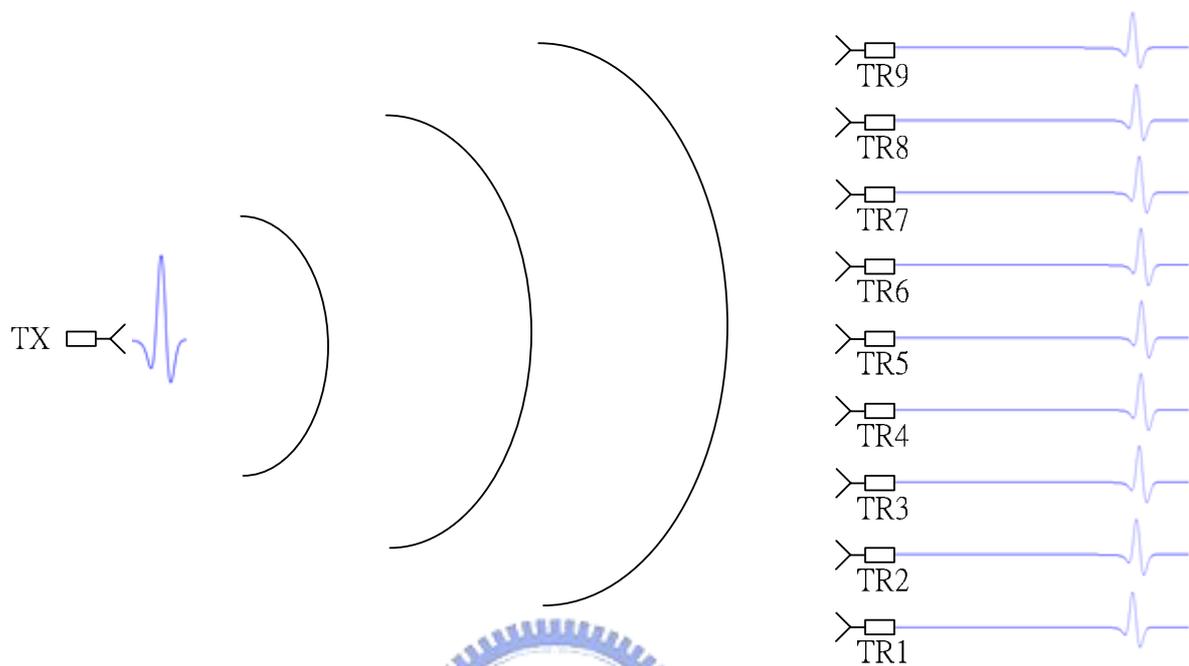


圖 3.15 均勻空間中發射機與收發機排列圖

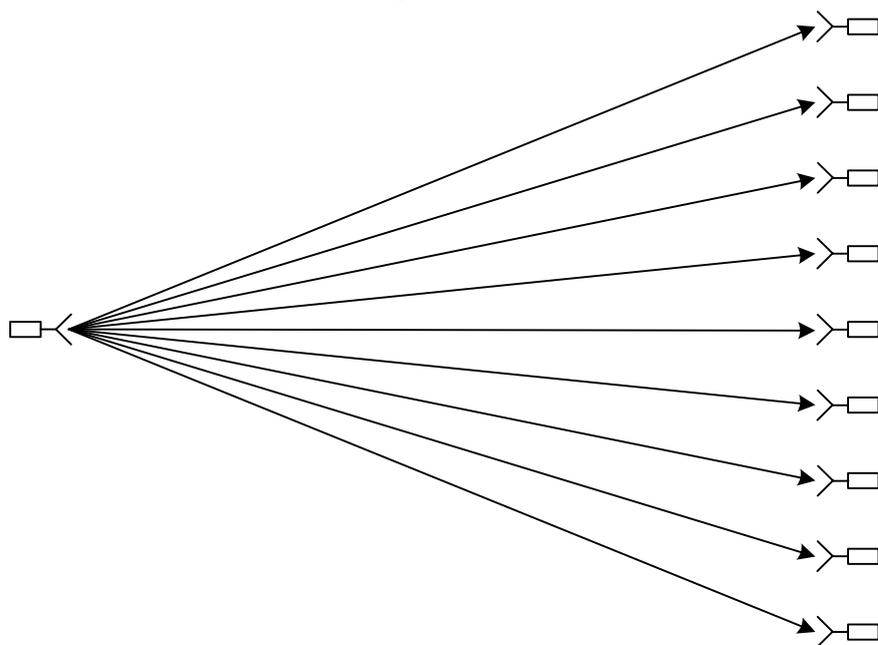


圖 3.16 均勻空間中發射機與收發機間訊號傳遞路徑

當發射機與收發機之間存在許多會造成成散射的介質，如圖 3.17 所示時，收發機上接收到的訊號便不再像均勻介質中那麼單純，經過了這個區域的波多了許多鏈波，看起來也雜亂多了，但這些雜亂的部分並非是沒有用的雜訊，我們用圖 3.18 來說明，圖 3.18(a)代表的是當兩個不同方向傳播的波在經過了介質透鏡時，它們有機會傳播到同一個收發機，圖 3.18(b)則說明同一個收發機可能同時收到經由多重散射以及沒有多重散射的波，圖 3.18(c)說明即使波是朝同一方向傳播，還是有機會經過介質透鏡到達不同的收發機，圖 3.18(d)則說明了原本在均勻環境中無法傳播到收發機的訊號，在經過介質透鏡後，也可以被收發機來接收。以上的四張圖，其實都說明了一件事，比起均勻環境來說，有多重散射的環境提供了更多讓發射機與接收機溝通的路徑，具體來說就是更多傳播路線，每個收發機不再只是接收到單一且特定方向的訊號，由圖 3.18 我們便能知道它可能接收到不只一個方向來的訊號，當然，在 Reverse process 中，也能提供發射機附近聚焦時更多不同方向來的訊號，若要從孔徑寬度 a_w 來描述，則是在多重散射的環境中，同樣的收發機排列能表現出較均勻環境更好的解析度表現，就如同等效的孔徑寬度變大了一般。圖 3.19 是均勻環境與多重散射環境在 Reverse process 的聚焦比較，我們可以很明顯地看出多重散射環境提供了較好的解析度。

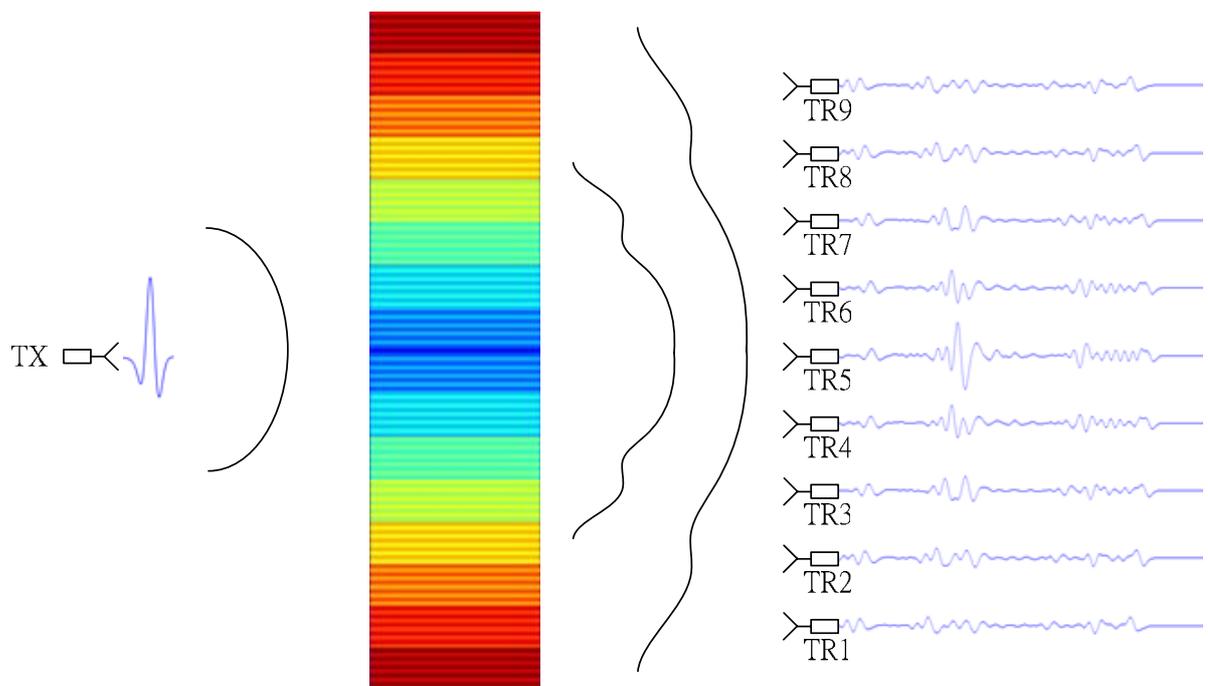


圖 3.17 多重散射空間中發射機與收發機排列圖

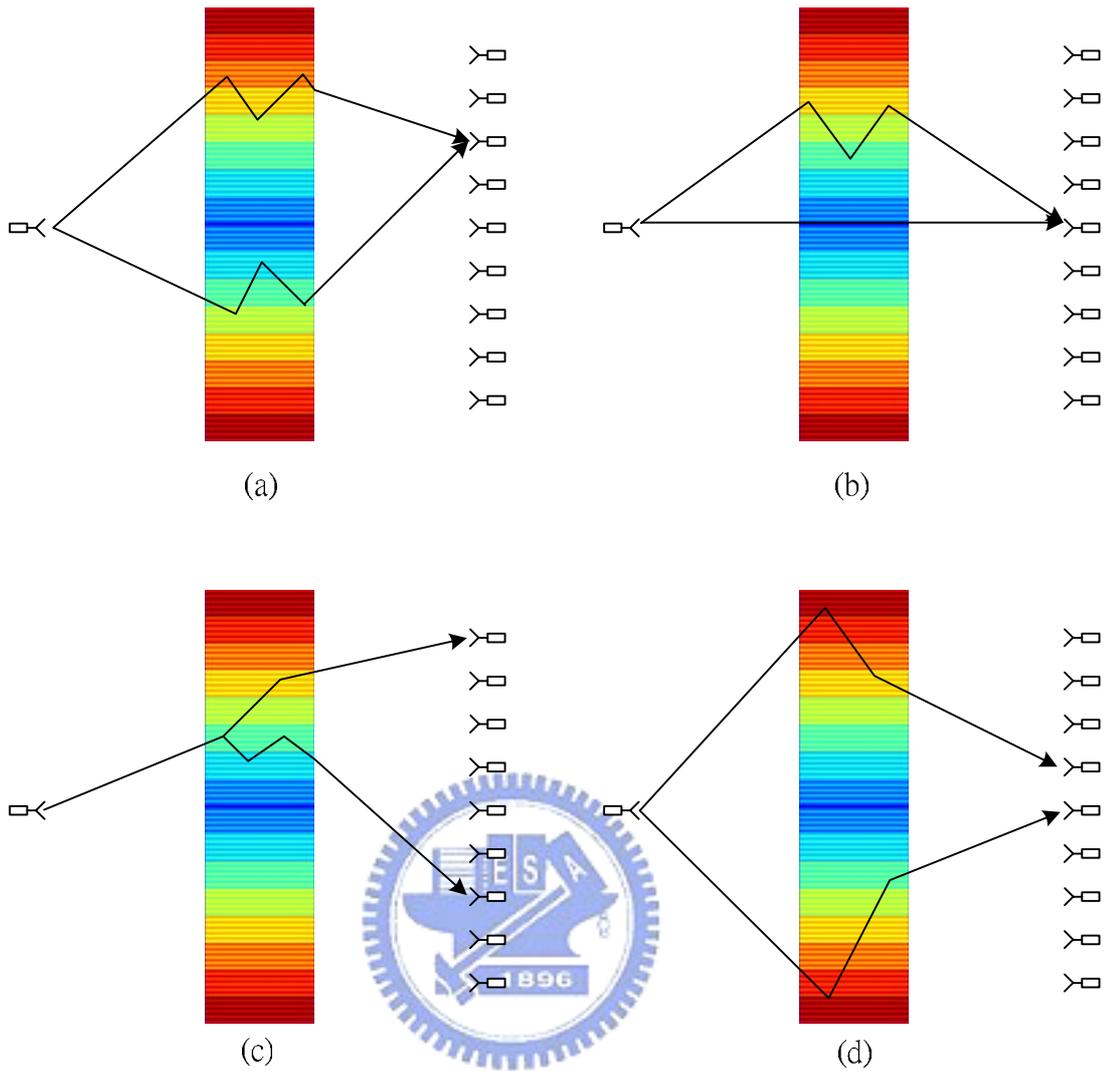


圖 3.18 多重散射空間中發射機與收發機間訊號傳遞路徑 (a) 不同路徑但到達同一收發機 (b) 直接傳遞的訊號與多重路徑訊號可能到達同一收發機 (c) 開始於同一路徑的訊號經多重散射到可能達不同收發機 (d) 原本太過外側的訊號經多重散射重新指回收發機位置

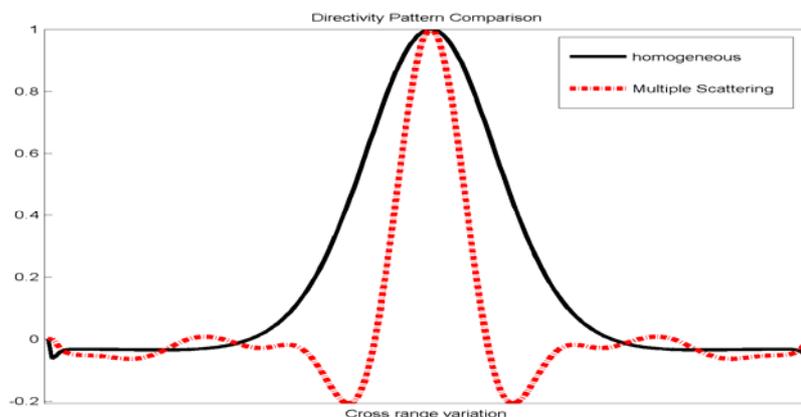


圖 3.19 均勻環境與多重散射環境聚焦解析度比較

圖 3.17 中用來造成多重散射環境的物體我們稱作介質透鏡(Dielectric Lens)，由於其容易造成多重散射的特性，圖 3.20 說明我們是如何來設計介質透鏡，首先我們利用兩兩成雙的介電係數來構成介質透鏡的一個薄層，舉 $\epsilon_r = 7;8$ 這一層為例，在這個薄層中，是以 $\epsilon_r = 7$ 與 $\epsilon_r = 8$ 兩種介電係數來穿插排列的，單一薄層的產生介紹完後，我們再來看薄層與薄層間的分佈，我們設計讓薄層由外到內有遞減的分佈，因此若用 $\epsilon_r = 2 \sim 10$ 來產生一完整的介質透鏡，就如圖 3.20 所示，因此若將介質透鏡是放置於收發機前方時，則能將欲往外側傳播的訊號導回介質透鏡的正前方或正後方，如同圖 3.18 所解釋一般。以下我們便會將介質透鏡應用到未知物體的偵測上，圖 3.21、圖 3.22 展示了包含介質透鏡的模擬空間配置圖。

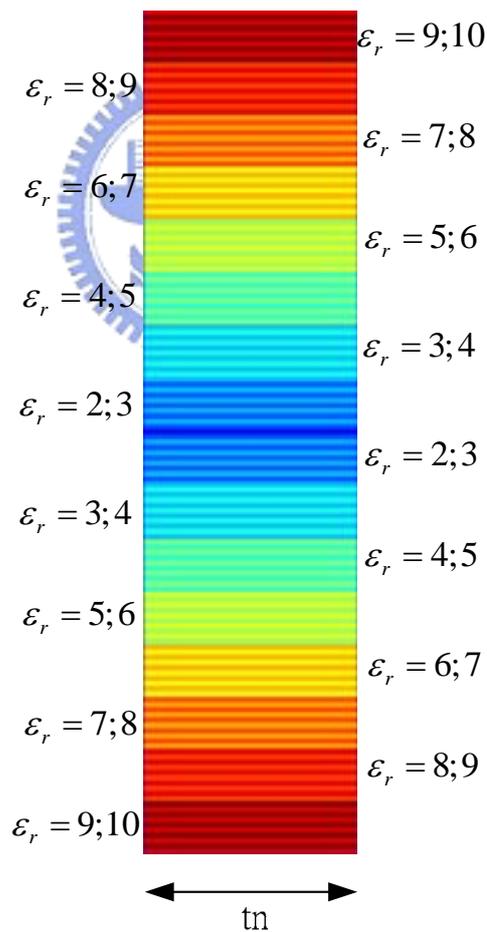


圖3.20 介質透鏡的設計

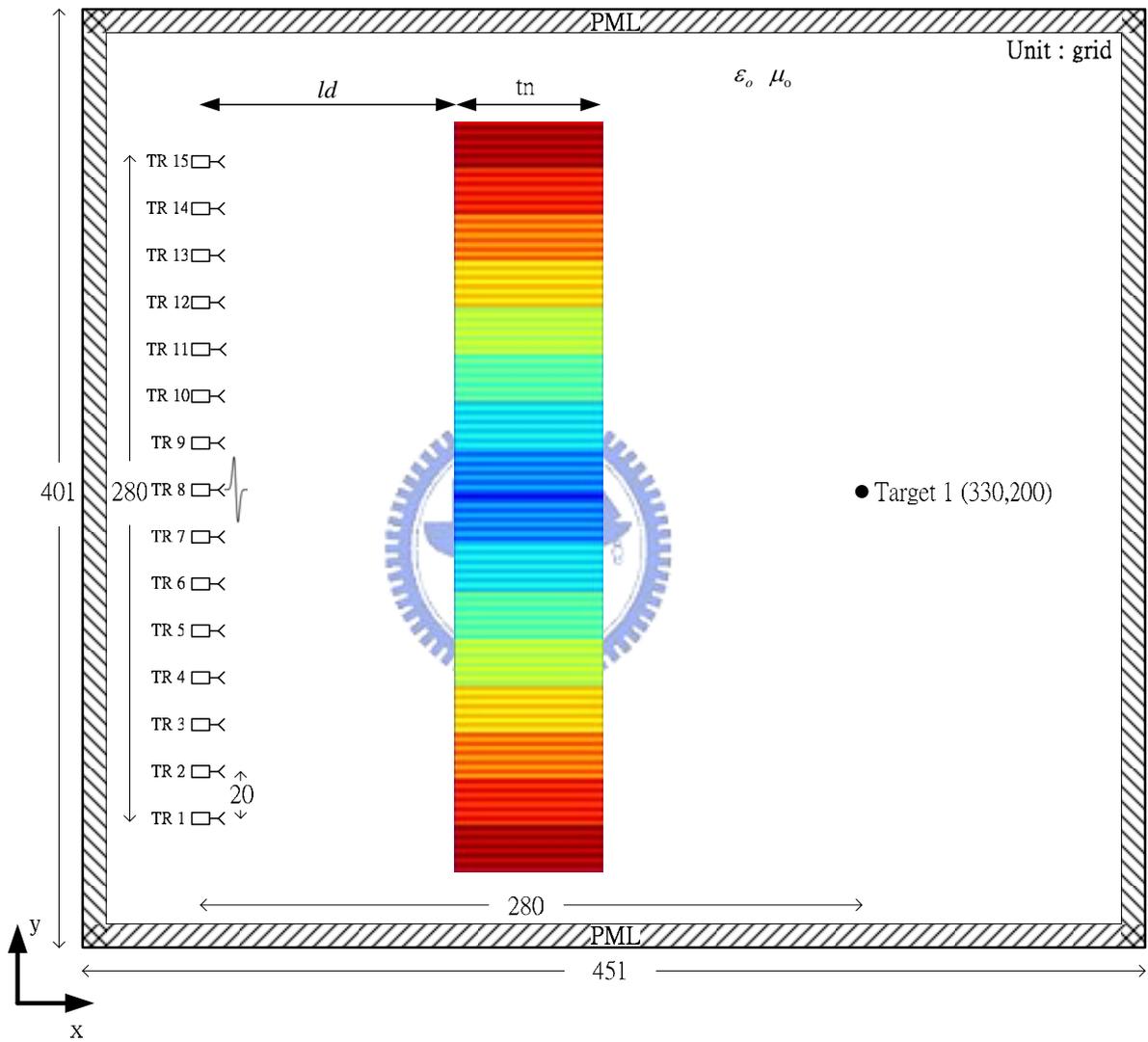


圖 3.21 包含介質透鏡時一個未知物體偵測的 FDTD 空間配置圖

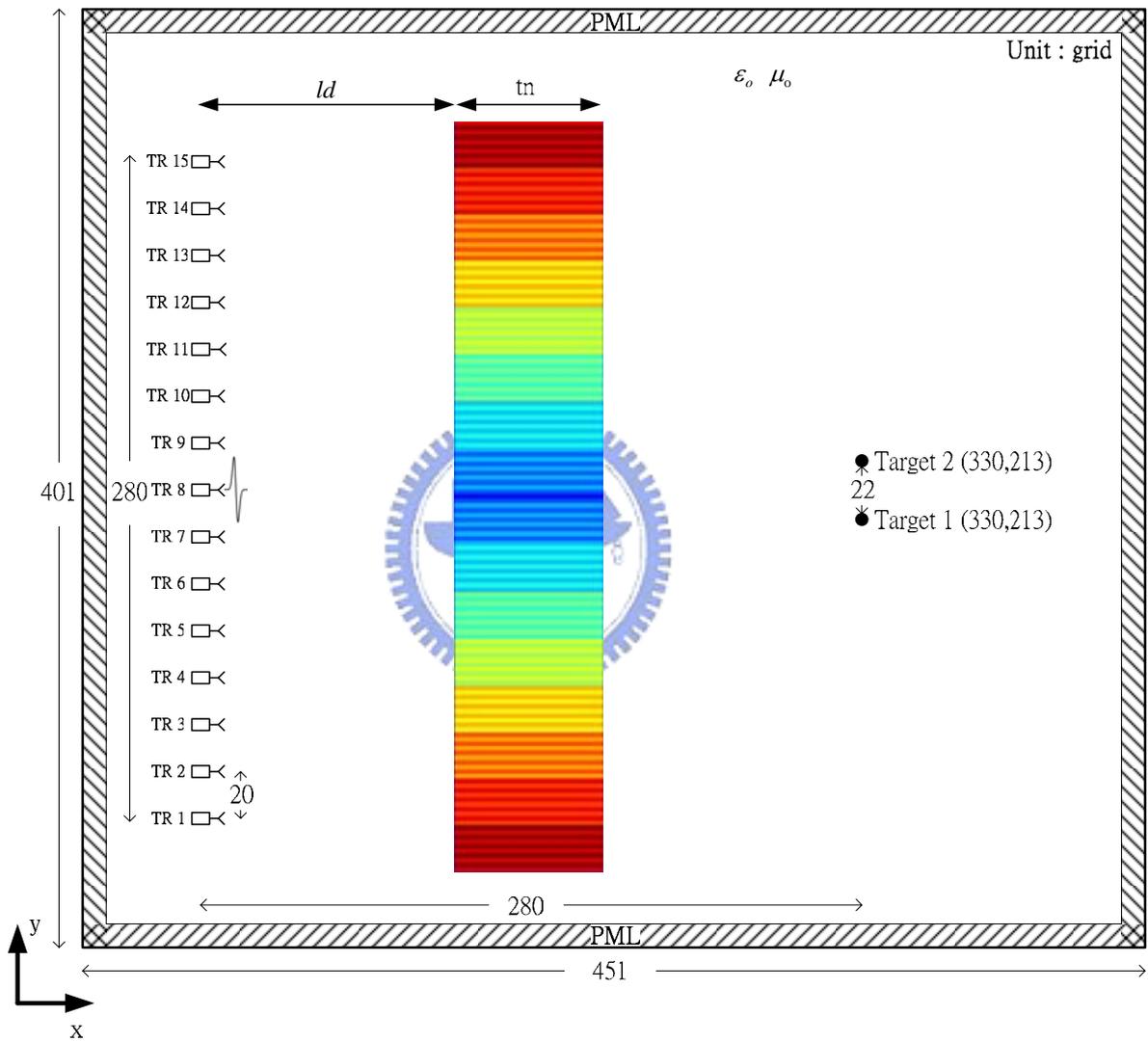


圖 3.22 包含介質透鏡時兩個未知物體偵測的 FDTD 空間配置圖

3.7 利用介質透鏡改善一個未知物體偵測的解析度

見圖 3.21，介質透鏡在 y 方向的介電係數分佈，我們已經在圖 3.20 中介紹，並且就使用圖 3.20 的分佈來模擬，其中 y 方向的分佈範圍由 $y=20\sim y=380$ 。這裡我們固定介質透鏡厚度 $t_n=40$ 格，分析介質透鏡擺放位置對於解析度的影響，圖 3.21 中的 ld 代表介質透鏡與收發機間的垂直距離，我們分析四種距離情況，none，代表沒有介質透鏡，沒有介質透鏡， $ld=60$ ，介質透鏡的分佈由 $x=110\sim 150$ ， $ld=120$ ，介質透鏡的分佈由 $x=170\sim 210$ ， $ld=150$ ，介質透鏡的分佈由 $x=200\sim 240$ 。

圖 3.23 是收發機上時域散射場資料，由於擺放了會多重散射的介質透鏡，因此散射場延續的時間也會較均勻時來的長，從圖 3.23(a)與圖 3.23(b)~ 圖 3.23(d)的比較便可以看出，圖 3.23(b)~ 圖 3.23(d)間的訊號大約包含兩個主要的部分，1 個在 2000 步左右，1 個在 6000 步左右。估算波源與散射物體間的平均距離約 300 格，相對於傳播時間約是 1000 步，因此來回便是 2000 步，從這裡大概可以推測有波在介質透鏡內維持很久才消失，這部分的訊號有可能在 Reverse process 中會提供聚焦時會有好的解析度。圖 3.24 是 $ld=150$ 時，於偵測物體位置處記錄到的時域資料及聚焦時刻的空間資料，由之前散射場的波形，不難想像偵測物體位置處記錄到的時域資料不會太漂亮，有大約 5 個局部區域的峰值產生，但我們還是可以清楚地將主要的峰值分離出來，大約在 18878 步時有最大值，從空間資料中顯示出有較好的聚焦現象產生，因此我們便接著看圖 3.25，隨著介質透鏡擺放位置遠離收發機，得到的聚焦現象也越來越好，關於橫向解析度的分析，展示於圖 3.26，同時我們把 -6dB 寬度的比較列於表 3.4，表 3.4 顯示當 $ld=150$ 時，-6dB 寬度已經比均勻介質 ($ld=0$) 時少了一半，大約是 0.38λ 左右，因此在固定了 $L/a=1$ 的情況下，使用介質透鏡的確有可能得到超解析度 (Super-resolution)，接著，我們便再分析用介質透鏡來作兩個未知物體偵測的實驗。

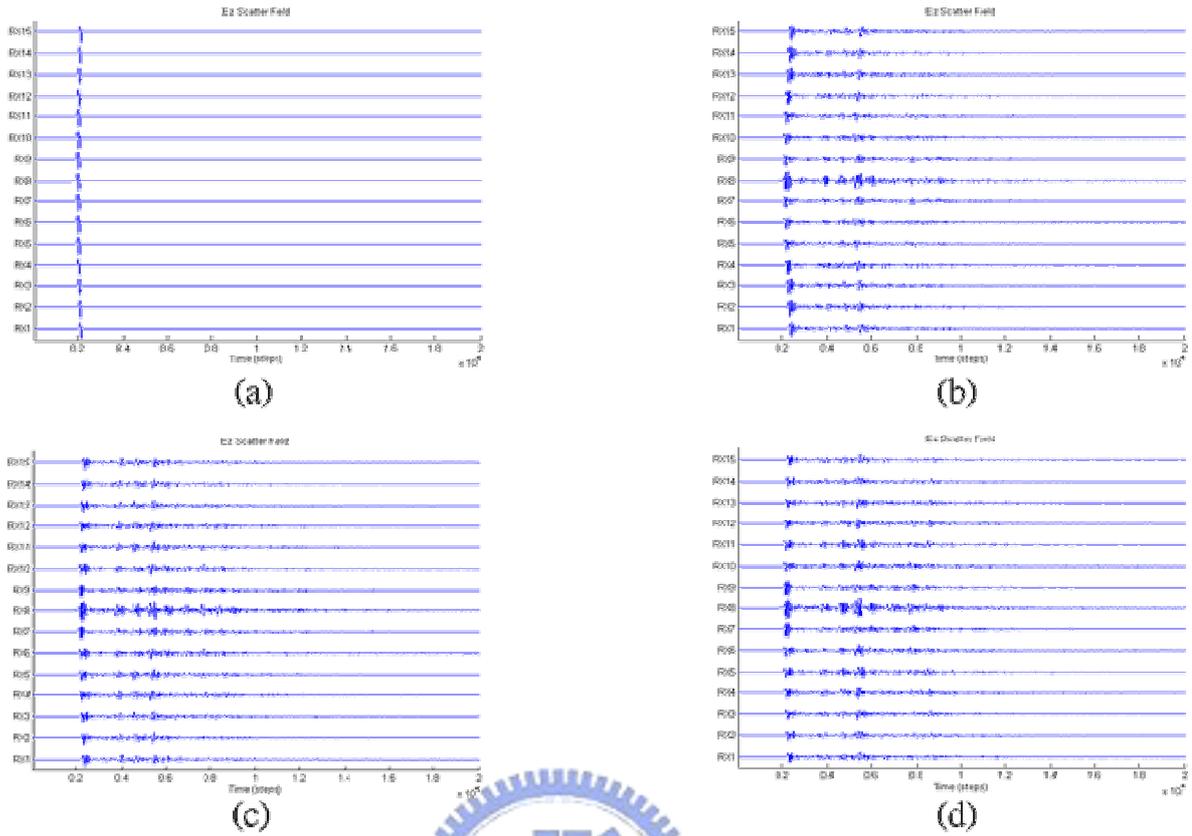


圖 3.23 多重散射空間中一個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的散射場資料 (a) none
(b) $ld = 60$ (c) $ld = 120$ (d) $ld = 150$

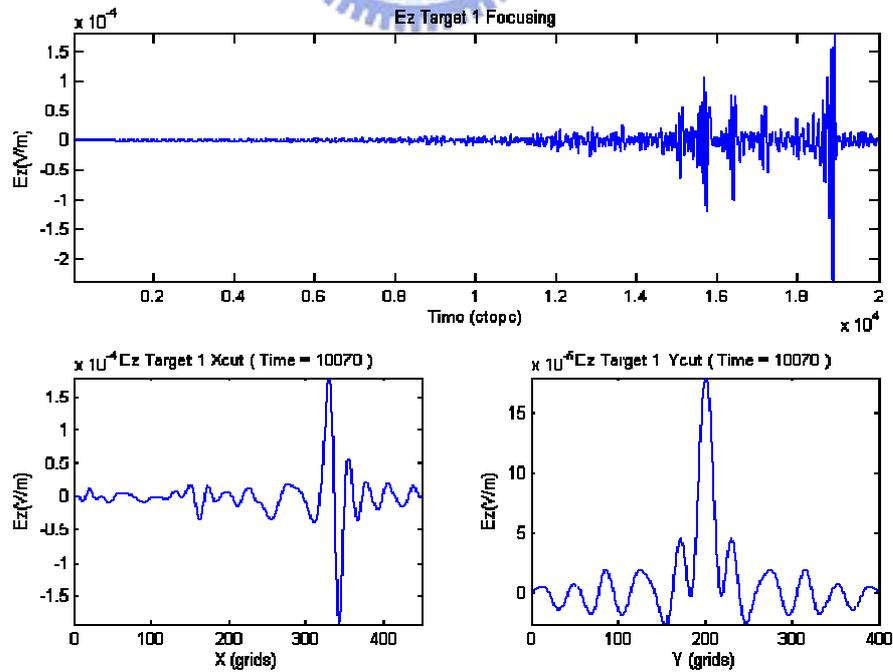


圖 3.24 多重散射空間中一個偵測物時時域及空間的聚焦

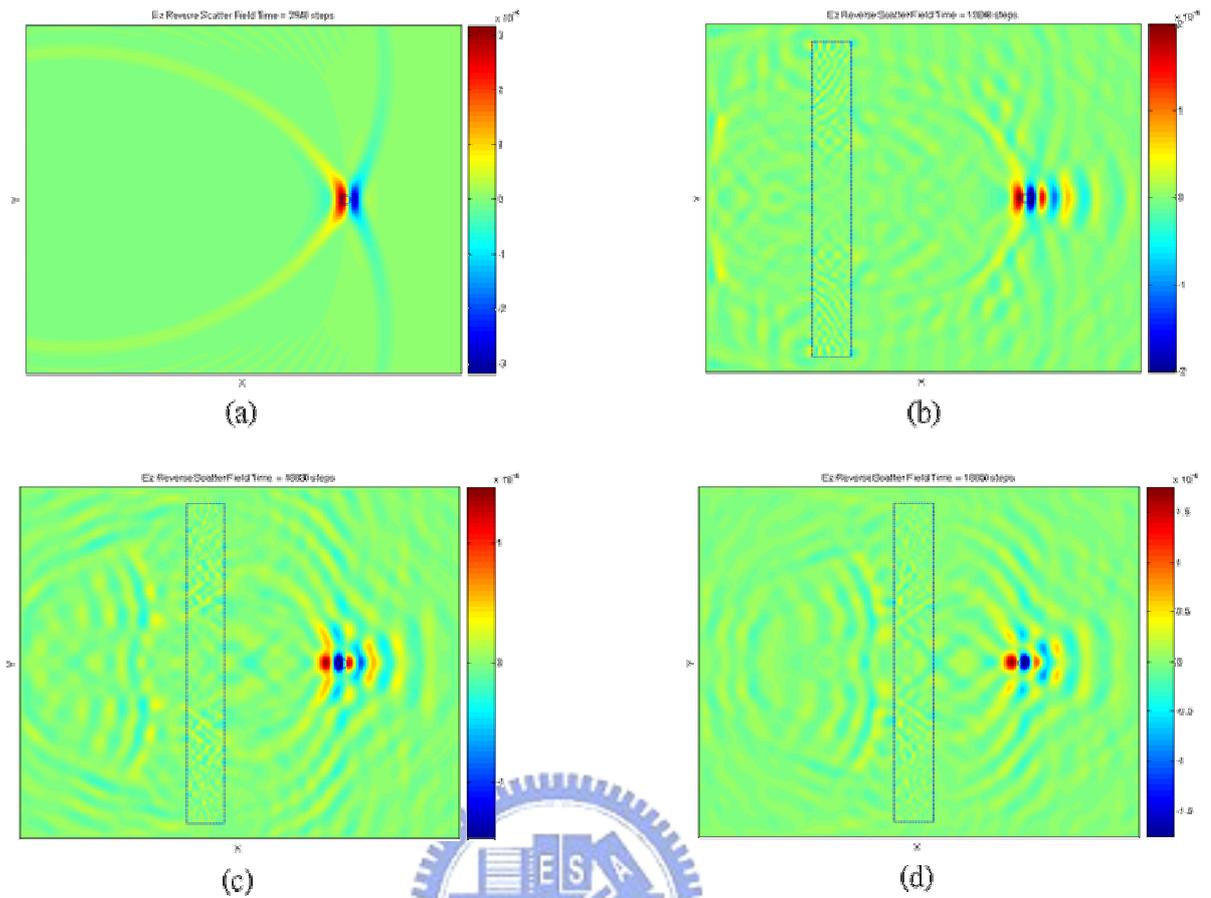


圖 3.25 多重散射空間中一個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的聚焦圖 (a) none (b) $ld = 60$ (c) $ld = 120$ (d) $ld = 150$

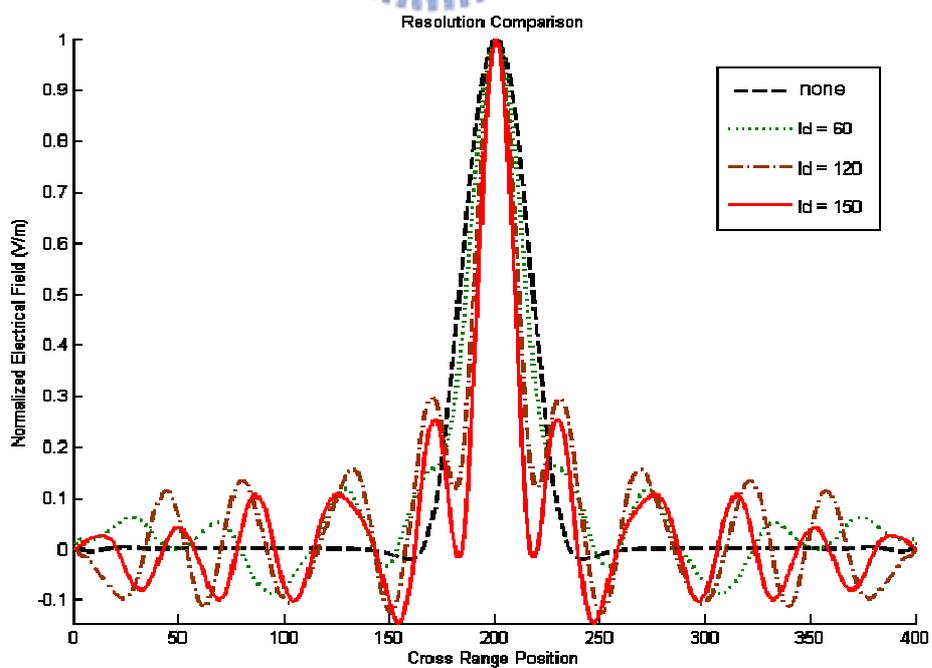


圖 3.26 多重散射空間中一個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的橫向解析度

表 3.4 多重散射空間中一個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化對解析度影響

	-6dB 寬度 (grids)	-6dB 寬度 (λ)	L/a
none	35	0.80	1.0
$ld = 60$	29	0.66	1.0
$ld = 120$	21	0.48	1.0
$ld = 150$	17	0.38	1.0

3.8 利用介質透鏡改善兩個未知物體偵測的解析度

見圖 3.22，介質透鏡的設定與之前單一物體偵測相同。這裡我們同樣固定介質透鏡厚度 $tn=40$ 格，分析介質透鏡擺放位置對於解析度的影響，圖 3.22 中的 ld 代表介質透鏡與收發機間的垂直距離，我們同樣分析四種距離情況， $ld = 60$ ，介質透鏡的分佈由 $x=110\sim 150$ ， $ld = 90$ ，介質透鏡的分佈由 $x=140\sim 180$ ， $ld = 120$ ，介質透鏡的分佈由 $x=170\sim 210$ ， $ld = 150$ ，介質透鏡的分佈由 $x=200\sim 240$ 。

圖 3.27 為所有收發機上時域散射場資料，由圖 3.27(a)~圖 3.27(d)來看，隨著介質透鏡與收發機的距離越來越遠，在 2000 步與 6000 步之間的散射電場有比較明顯的起伏，而圖 3.28 是 $ld = 150$ 時，其中一個散射物體位置的時域資料及聚焦時刻的空間資料，的確在 18875 步時，可以漂亮地聚焦出兩個峰值，也就是代表有兩個散射物體，圖 3.29 則展示不同 ld 時，電場於偵測物體位置處聚焦的暫態圖，圖 3.29(a)~圖 3.29(d) 四張圖顯示了聚焦越來越明顯的現象，圖 3.30 是聚焦時刻的橫向(cross range)解析度比較， $ld = 150$ 時，即使用 -6dB 寬度的判別標準，我們也能清楚分辨出兩個物體，由於我們已能成功聚焦兩個間距 0.5λ 的散射物體，這是原本在 $L/a = 1$ 的情況下，無法辨識出來的，因此我們更進一步，將兩個散射物體的間距縮小，看看這個方法的聚焦極限為何。從圖 3.31 來看，大約到間距是 18 格(0.4λ)時我們還能分辨出兩個物體，再

更小的情況就很困難了。最後我們把以上的模擬整理在表 3.5 中。

關於為何介質透鏡擺放離收發機一段距離後，幫助聚焦貢獻特性才開始明顯，我們認為可能是因為發射訊號激發位置若太靠近介質透鏡，則僅有一部份的波能經由介質透鏡的多重散射到達偵測物體處，而當擺得較遠時發射訊號便可以有比較多與介質透鏡作用的成份，當然就增加了可能到達偵測物體處的路徑，如同我們在多重散射處的介紹，越多的路徑代表越多不同成份的訊號聚焦，解析度越好。

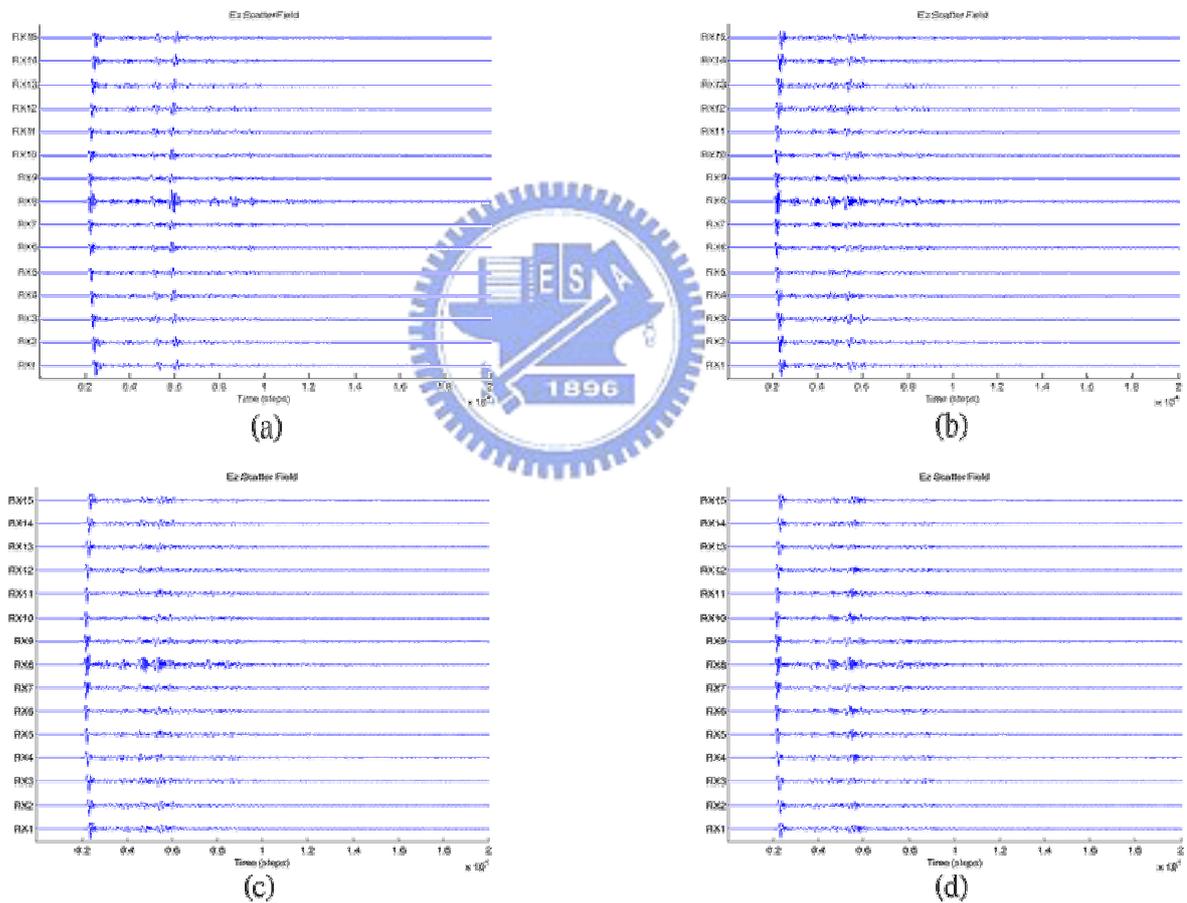


圖 3.27 多重散射空間中兩個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的散射場資料 (a)

$ld = 60$ (b) $ld = 90$ (c) $ld = 120$ (d) $ld = 150$

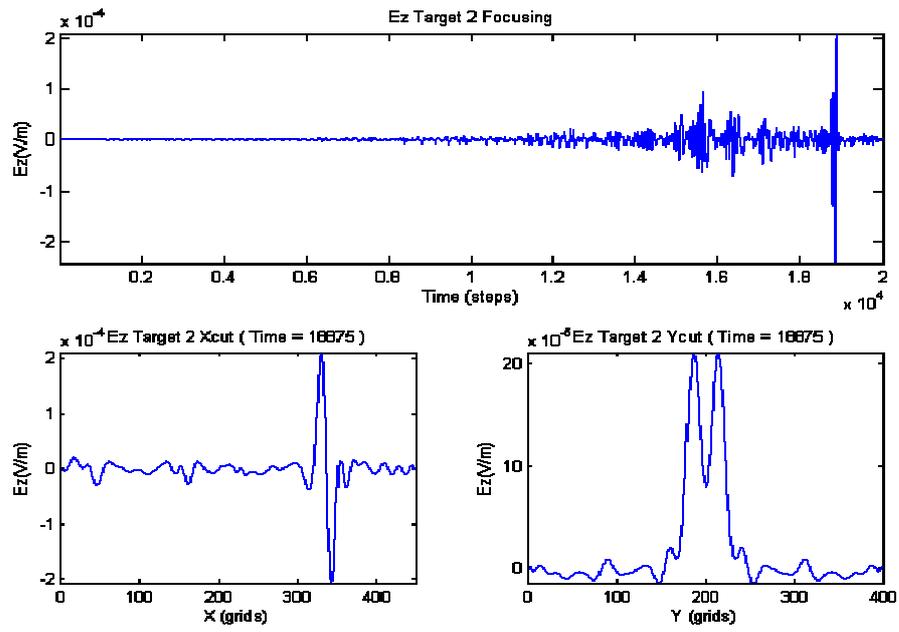


圖 3.28 多重散射空間中兩個偵測物時時域及空間的聚焦

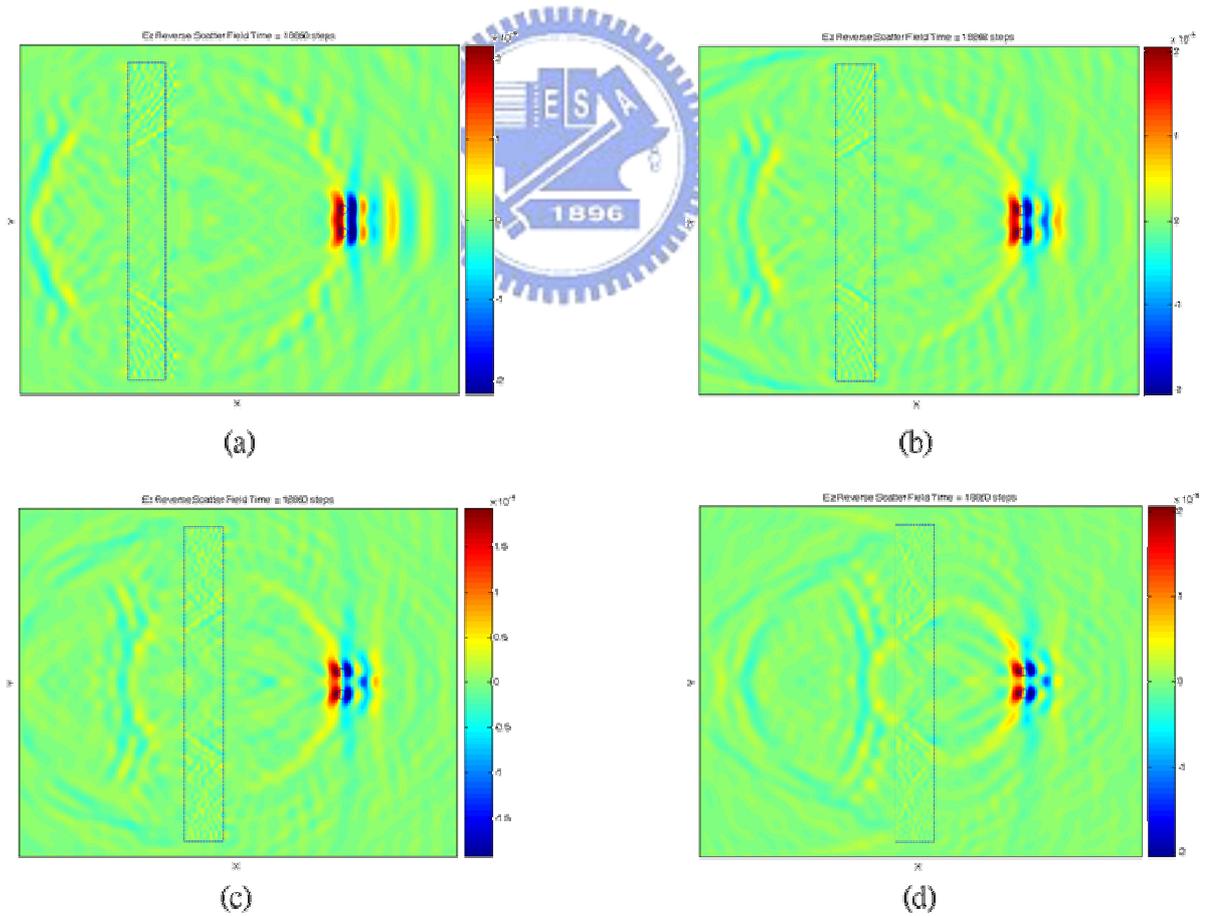


圖 3.29 多重散射空間中兩個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的聚焦圖 (a) $ld = 60$

(b) $ld = 90$ (c) $ld = 120$ (d) $ld = 150$

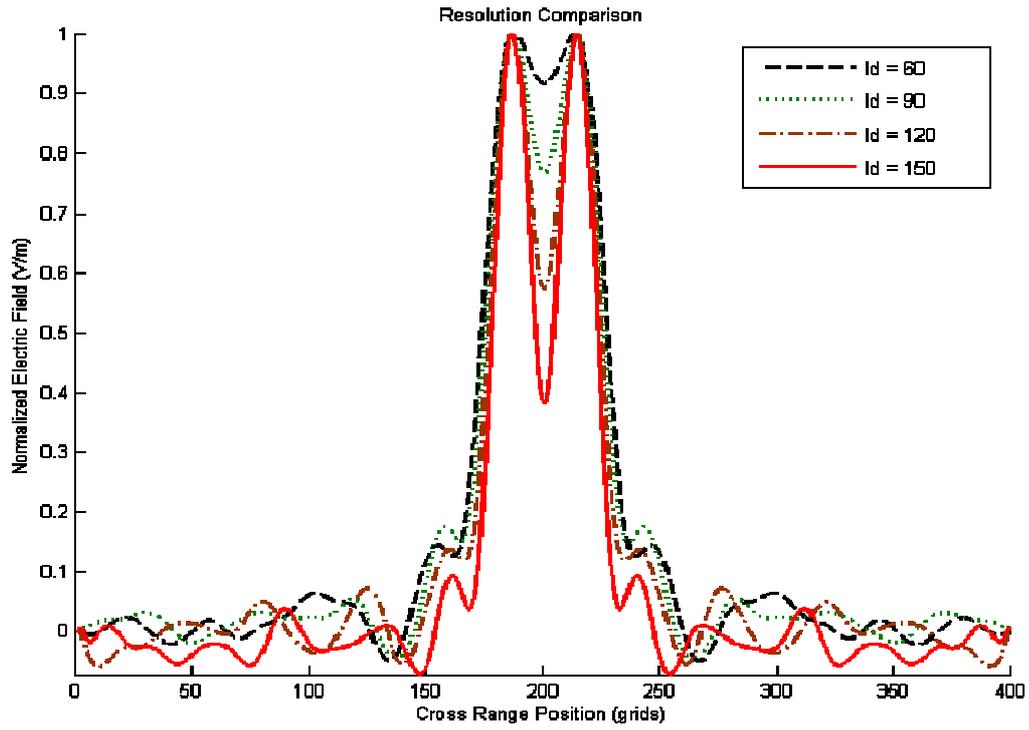


圖 3.30 多重散射空間中兩個偵測物時隨介質透鏡距離 ld 變化的橫向解析度

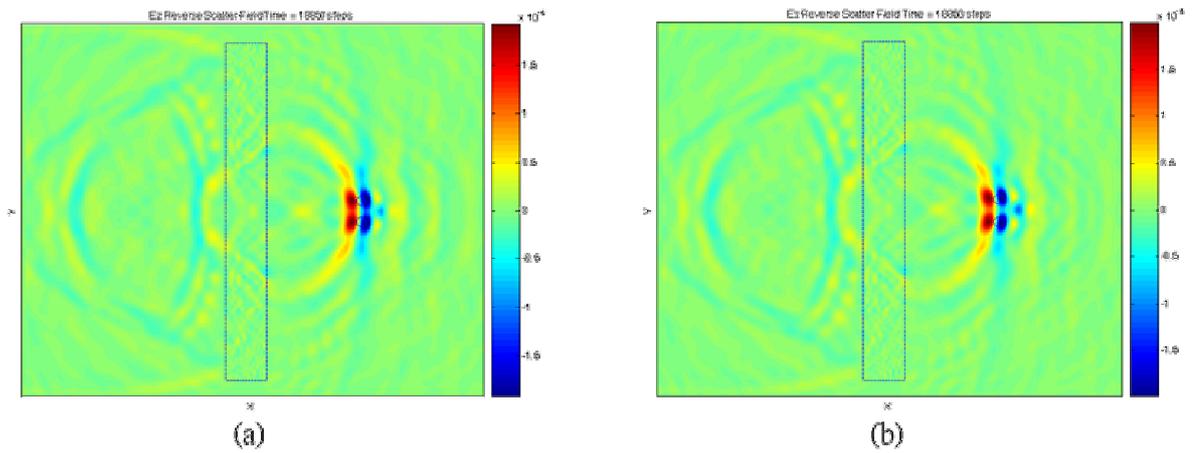


圖 3.31 多重散射空間中兩個偵測物時隨偵測物間距 tsp 變化的聚焦圖 (a)

$ld = 150, tsp = 18$ (b) $ld = 150, tsp = 20$

表 3.5 多重散射空間中兩個偵測物時辨視度比較

	$tsp(\lambda)$	L/a	辨視度
$ld = 60$	0.5	1.0	無法分辨
$ld = 90$	0.5	1.0	無法分辨
$ld = 120$	0.5	1.0	恰可分辨
$ld = 150$	0.5	1.0	清楚分辨
$ld = 150$	0.45	1.0	清楚分辨
$ld = 150$	0.4	1.0	恰可分辨

3.9 極化(Polarization)效應在時間回轉中的探討

極化效應是電波在傳播中的一獨特特性，不同極化的波彼此之間不會互相干擾，因此極化的應用可以增加資訊傳播的一項自由度[26]，但由於電波在傳播的過程中，不同極化的波可能發生耦合的現象，甚至在多重反射空間中的波，可能由原本的發射時的垂直極化，到接收機時變為水平極化，關於這類情形發生時，是否可以將它應用到時間回轉實驗中，這部份，我們便利用 TE FDTD 的方式模擬並提供解釋。

考慮如同圖 3.3 的空間，只是現在我們將要模擬的是二維的 TE FDTD，由於 TE 包含的場量有 E_x 、 E_y 、 H_z ，我們必須選擇使用 J_x 或 J_y 來激發，由圖 3.32 我們可以推斷，若是用 J_x 來激發，由於我們想偵測的區域恰好位於它的 J_x 的 Null 方向，可以想見散射的回波必定很弱，因此，我們選擇了利用 J_y 來當波源，主要的偵測區域正好落於 Broadside 的方向，必然可以得到較強的散射回波。除此之外，空間的設定參數為，固定 $L=280$ 格， $a=280$ 格，收發機數目 15 個，間距 $sp=20$ ，從 $(x, y)=(50, 60)$ 垂直排列到 $(50, 340)$ ，並由第 8 個收發機 $(50, 200)$ 位置處激發一 y 方向極化的 UWB 波源。

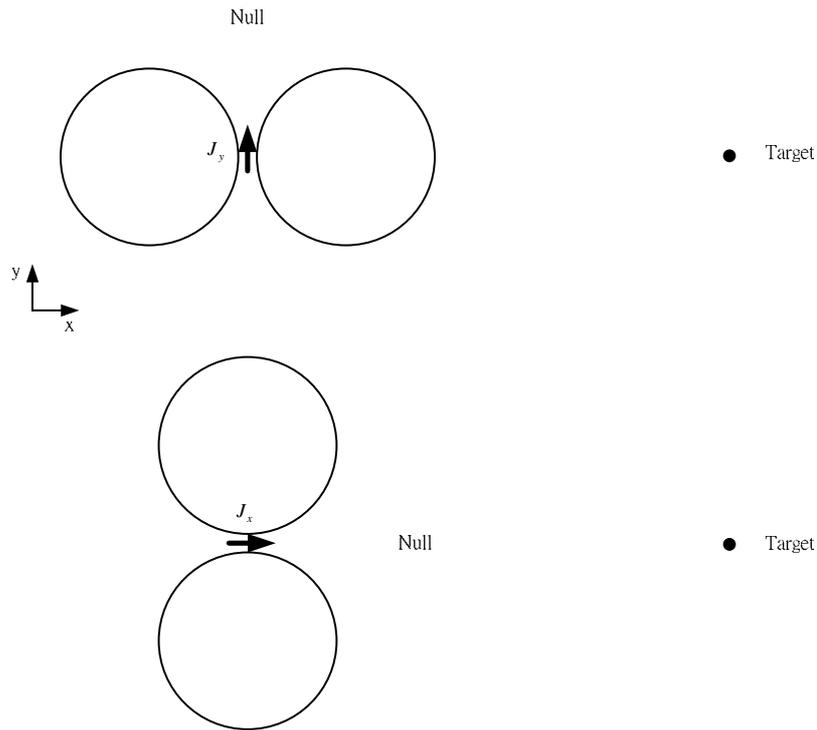


圖 3.32 兩種不同方向激發源的示意圖

圖 3.33 是在收發機位置處同時接收 x 方向電場及 y 方向電場的散射場，我們可以由圖 3.33(a) 中看到的確由 x 軸方向來的 E_x 回波非常弱，大部份都分散到兩側，圖 3.33 (b) 代表的 E_y 回波則較均勻。圖 3.34 代表的是電場 E_y 於偵測物體位置處聚焦的暫態圖，由於激發的波是 y 方向極化的，因此我們便把 y 方向電場的回波 E_y 定為同極化 (Co-polarization) 場，而 x 方向電場的回波 E_x 則定為交叉極化 (Cross-polarization) 場，因此圖 3.34(a) 便是只將同極化場的回波 E_y 作時間回轉再發回空間中的聚焦現象，圖 3.34(b) 是只將交叉極化場的回波 E_x 作時間回轉再發回空間中的聚焦現象，圖 3.34(c) 是同時將同極化場的回波 E_y 與交叉極化場的回波 E_x 都作時間回轉再發回空間中的聚焦現象，的確三種情況都能在欲偵測物體位置處產生聚焦，所以代表的是，在時間回轉實驗中，即便是已耦合到不同極化的波，如 E_x ，一樣能在 Reverse process 中聚焦回散射物體處。圖 3.35 顯示的是圖 3.34 中的三種聚焦情況發生時的橫向解析度比較，我們發現同極化回波的聚焦貢獻約是交叉極化的 9 倍左右，雖然交叉極化的貢獻不強，但一樣

能回來聚焦的現象是我們比較關切的。表 3.6 則是針對這個模擬作的整理。

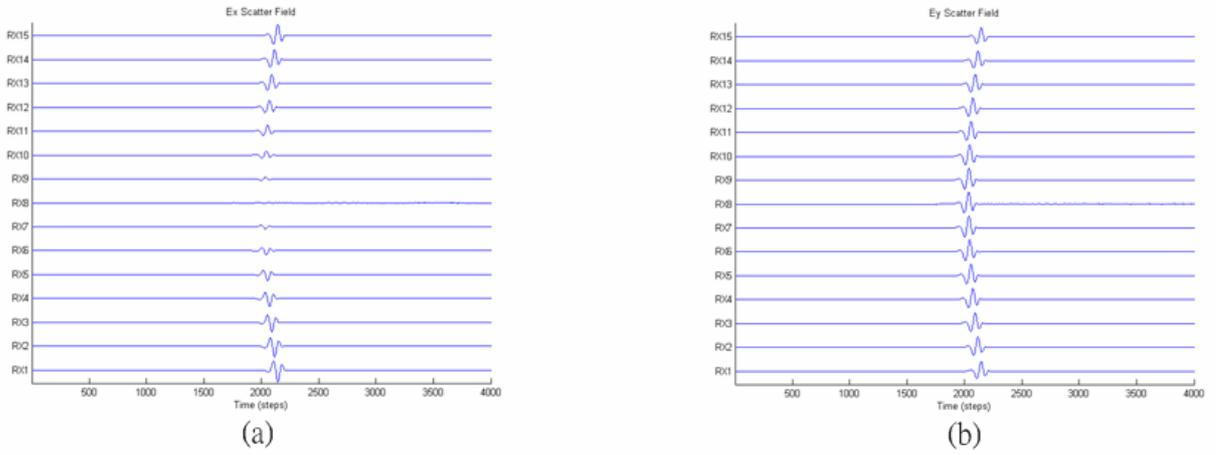


圖 3.33 均勻空間中一個偵測物時隨激發 J_y 的散射場資料 (a) x 方向電場 (b) y 方向電場

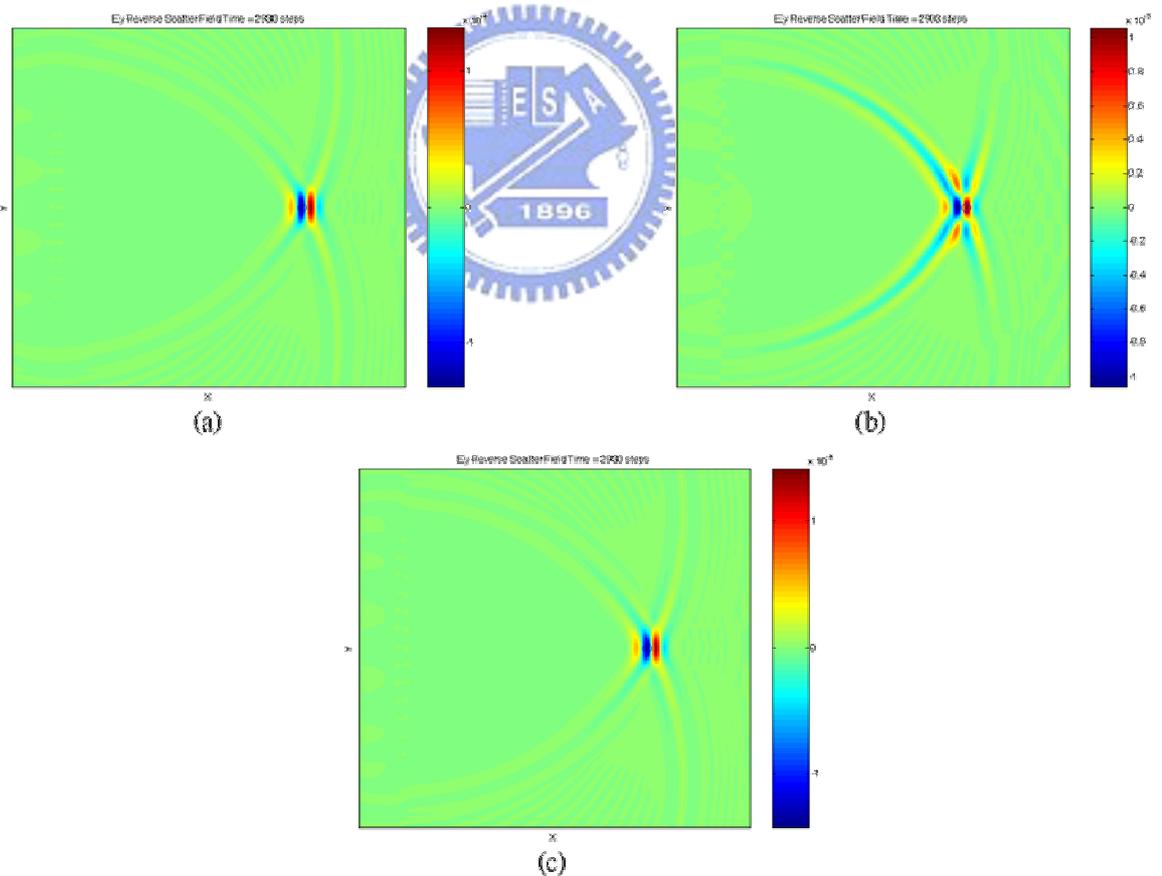


圖 3.34 均勻空間中不同極化回波的 E_y 電場聚焦圖 (a) 同極化場 E_y 的回波聚焦 (b) 交叉極化場 E_x 的回波聚焦 (c) 同極化場 E_y 與交叉極化場 E_x 同時回波聚焦

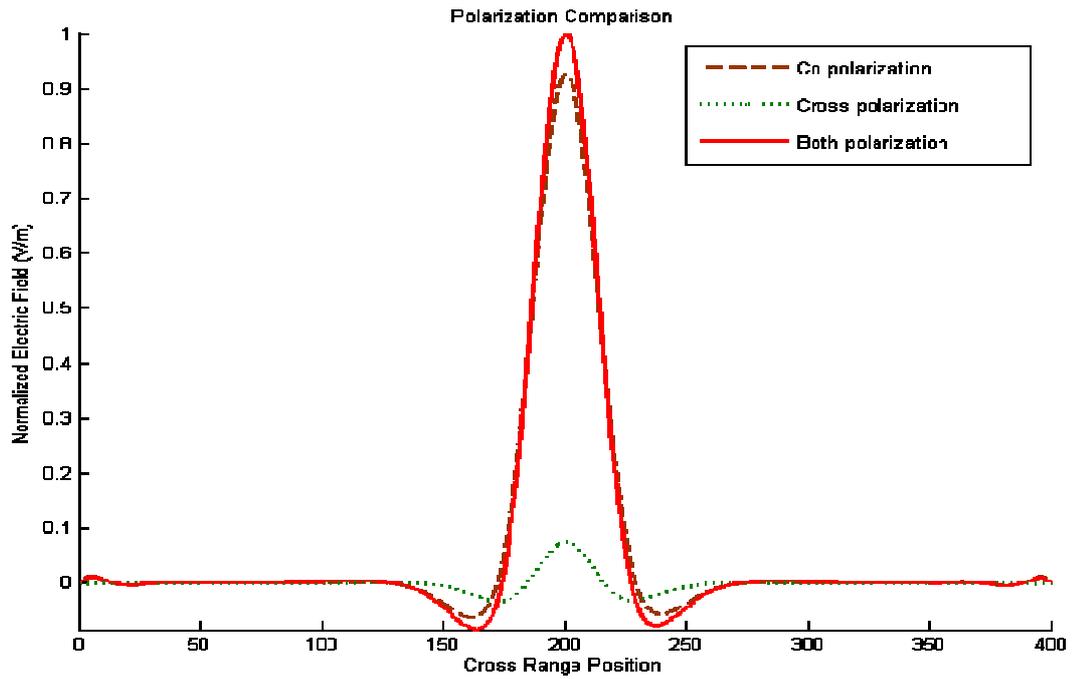


圖 3.35 均勻空間中不同極化回波的橫向解析度比較



表 3.6 均勻空間中不同極化回波的聚焦比較

	與原激發 極化比較	峰值比較 (正規化)	L/a
Ey 回波	同極化	0.9	1.0
Ex 回波	交叉極化	0.1	1.0
Ey Ex 同 時回波	以上皆有	1.0	1.0

3.10 結論

在本章中，首先模擬了均勻環境中一個未知物體與兩個未知物體聚焦的極限情況，尤其在兩個未知物體聚焦時，當 $a=280$ 與 $L=280$ 時，我們已無法從 Reverse process 的聚焦過程中判斷出有兩個物體的存在，因此我們便以這個情況做為我們在這個情形下的聚焦極限，接著，在引入了介質透鏡進入我們的模擬之後，我們看到了在一個未知物體偵測時解析度明顯地提升了一倍，甚至在兩個未知物體偵測時，打破了之前均勻介質中無法辨識的極限，兩個物體甚至擺到距離 0.4λ 都可以分別辨識出來，因此使用介質透鏡來聚焦是有其可能性的，雖然目前止提供了數值上的模擬結果，但未來在實際實驗中是有可能拿來利用的。此外，我們也討論了極化效應的利用在時間回轉中的可行性，我們發現即使在傳播過程中耦合到不同極化的電磁波，也能經由時間回轉的方式來作聚焦，這個結果也提供了未來在時間回轉實驗中也能考慮利用雙重極化方式來分析。

