

聲納探勘過程的數值影像模擬

作者：張逸中 (Yet-Chung Chang)

服務單位：國立成功大學水工試驗所

聯絡地址：台南市大學路一號成功大學水工試驗所

電話：(06)2094865

前 言

聲納探勘基本上是一個聲波發射、傳播及接收的過程，目前多數的聲納使用者習慣以波線(Ray)的觀點來解釋或理解這些過程。但以物理學的角度而言，波線概念是波動傳遞過程的簡化(或稱宏觀)描述方式，其所以被廣泛運用的主要原因是它的簡捷特性，並非它可以完整的描述波動的所有細節。例如使聲納具有指向性的聲波干涉(interference)現象，以及側掃聲納賴以得到訊息的回向散射(back-scattering)現象都不易以波線概念完整描述。基於此種理解，本文暫時跳脫波線理論習用的反射及折射等概念，以波動學中的惠更斯原理為基礎，視聲納體及海床上各點為密集的點波源，再以數值運算及影像模擬的方式表達出聲納探勘過程的宏觀現象。此種作法基本上可以較完整的展現散射或干涉等波動現象，並使得探勘過程可視化，對於了解聲納的施測過程或聲納工具的設計應有所助益。

本 文

聲納探勘的基本物理過程可概分為：1.由聲納向水體發出聲波波串；2.聲波觸及海床產生一連串的聲波反應；3.海床聲波反應之一部份陸續返回聲納體或獨立的接收器，成為聲納探勘的資料。這其中發生的物理現象包括聲納波源的原發振動，聲波在水體中的來回傳遞，海床受激的次發振動、各個原發或次發振動間產生的干涉現象以及接收器感應到週遭音場的壓力變化產生訊號輸出等等。整體來說，這是一個在三度空間內隨時間變化的複雜過程。但以惠更斯原理的觀點而言，各個介質點的個別行為十分單純，只是接受外來的波動，再以本身為點波源將同樣的訊號傳出而已；所謂反射、折射或散射等現象則是這些個別波源互相干涉的整體結果。以下便是筆者根據此原理所作的幾個簡單模擬，讀者不妨在閱讀過程中同時比較它們與我們習用的波線理論預測結果的異同。

1. 聲納發射音場的模擬

聲納基本上是一個可以產生週期振動，推動週遭介質製造出壓縮波的機械元件。在此我們以正弦函數代表聲源振動的週期函數，不同型式的聲納被視為由密集排列且同相位振動的點狀聲源共同組成；任一波源都會隨

著時間對模擬音場中的各點產生影響。空間中任意一點受單一波源 i 的振動反應可表示如下：

$$A_i = A_{i0} * f(d) * \sin(2\pi (f * t + d/\lambda))$$

其中 A_{i0} 代表波源振幅， d 代表該點與波源距離， $f(d)$ 代表振幅隨距離增加時的振幅衰減函數，通常這個函數包含了因能量在空間擴散造成的衰減(spherical attenuation)，以及因分子摩擦造成熱能散失導致的衰減兩個部份。前者與距離平方成反比；後者則概略與頻率(振動次數)成正。此函數在本文中僅以一任意選擇的自然對數衰減(exponential decay)加以代表，對於實際的能量擴散或消耗並未嚴謹的定義，換言之，本文中出現之振幅或能量只能視為相對值。

此外正弦函數中的 f 代表波源振動頻率，它與時間 t 及 2π 的乘積代表波源在時間 t 時的相位；而 d/λ 乘上 2π 代表的則是因波動傳播距離產生的相位差，其中 λ 表示聲波波長。此公式(或與其同義的等式)在任何波動或光學的基本課程中都有詳盡的介紹。本文中所謂的音場模擬即是先計算空間中各點在某時刻受所有點波源影響的總和振幅($A = \sum A_i$)，再以數位影像的方式繪出；或進一步將振幅之平方延時間軸積分 ($E = \int (\sum A_i^2) \cdot dt$) 成為能量的示意圖。

1.1 點波源

一個最單純的聲納可設想為一個點波源，以週期性的漲縮產生波動。以圖 1 為例，若標示有 S 的圓圈代表不斷漲縮的聲納體，則可在其週遭產生如圖示的音場，圖中的明暗代表波動的振幅。這種『聲納』的特色之一是發出的聲波不具有方向性，聲波能量均勻的向各方向傳遞，其迴聲也就可能來自相當大的海床範圍，通常僅能由聲波來回傳遞的時間估計其反射或散射點的距離。在實際應用上，最近似這種聲納型式的探勘工具是用於震測的爆炸性震源，如炸藥、高壓放電器(Sparker)或壓縮空氣槍(Air-gun)等等。使用此類震源的目的是它們可以產生較大的能量穿透地層，取得地層深部的資訊，在此前提下不得不犧牲一些探測波的指向性。當然爆炸性波源發出的波串頻率較為零亂，與圖 1 所示的單頻音場不同。

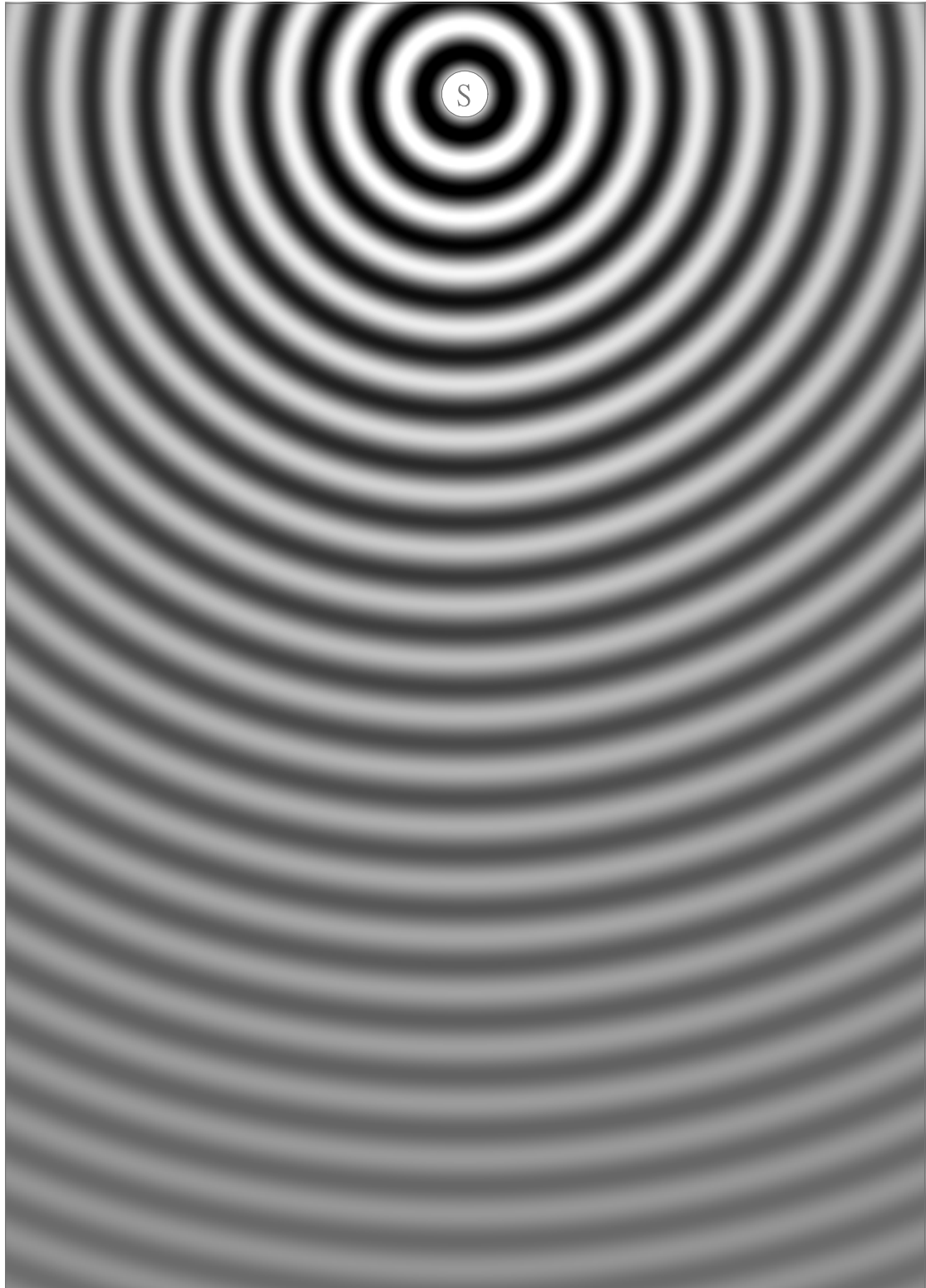


圖 1 點波源的音場振幅

1.2 線狀聲納

此類聲納之音鼓為長條型，在此我們以緊密排成一行之同相位點波源加以模擬，在數學關係上，它們與高中物理提及的多狹縫干涉或光柵實驗

完全一樣。圖 2 是平行聲納軸線方向的波動振幅模擬結果，若將圖 2 各點振幅之平方延時間軸積分($E = \int (\sum A_i^2) \cdot dt$)，可得到如圖 3 的能量分佈圖，可以看到因眾多點波源互相干涉產生指向性波束的情況。但如果我們考慮三度空間中的狀況，模擬垂直聲納軸方向的音場，會發現與圖 1 中的點波源一樣不具有指向性。這表示我們由此種聲納得到的『波束』形狀接近圓盤狀，音束如刀片一般延垂直聲納軸方向切向四周。

在實際的探勘工具中，此類聲納的代表是側掃聲納(Side-scan Sonar)。它可以藉著這種波束特性得到海床的聲波掃描線，情況類似一般的電視影像，藉著連續的掃描線組成完整的海床影像。稍有不同的是側掃聲納通常會設計成在垂直聲納軸方向也具有有一些指向性，而且通常有兩個聲納體分別射向左下及右下兩側。如此設計的原因是如果只有一個線狀聲納，則來自聲納左右兩側的回向散射訊號會相疊而難以辨認。根據上述原則，我們使線狀聲納也具有一定的寬度(呈矩形之音鼓面)，且分別指向左右兩側即可模擬側掃聲納在垂直聲納軸方向的音場能量分佈如圖 4。

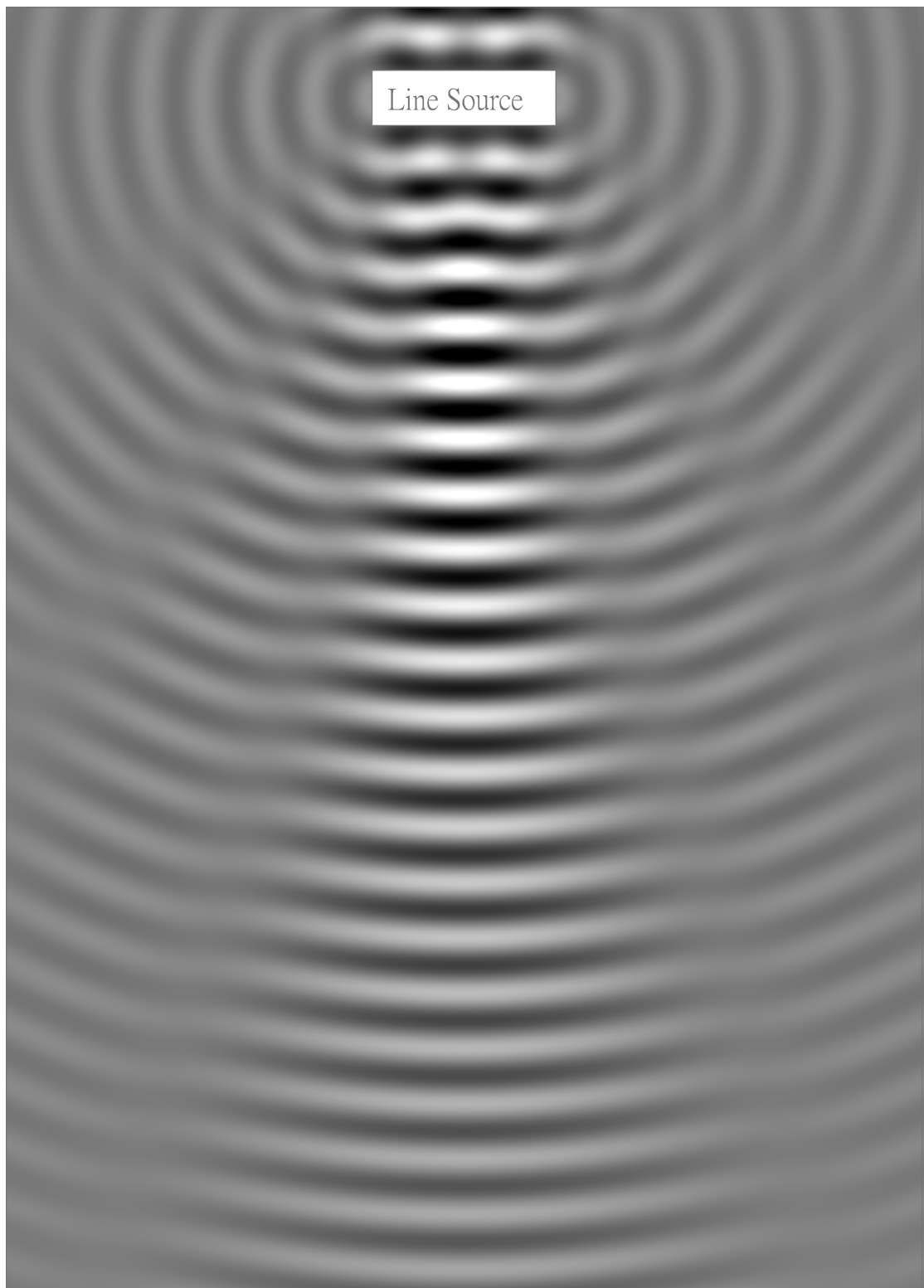


圖 2 線狀聲源振幅



圖 3 線狀聲源能量分布

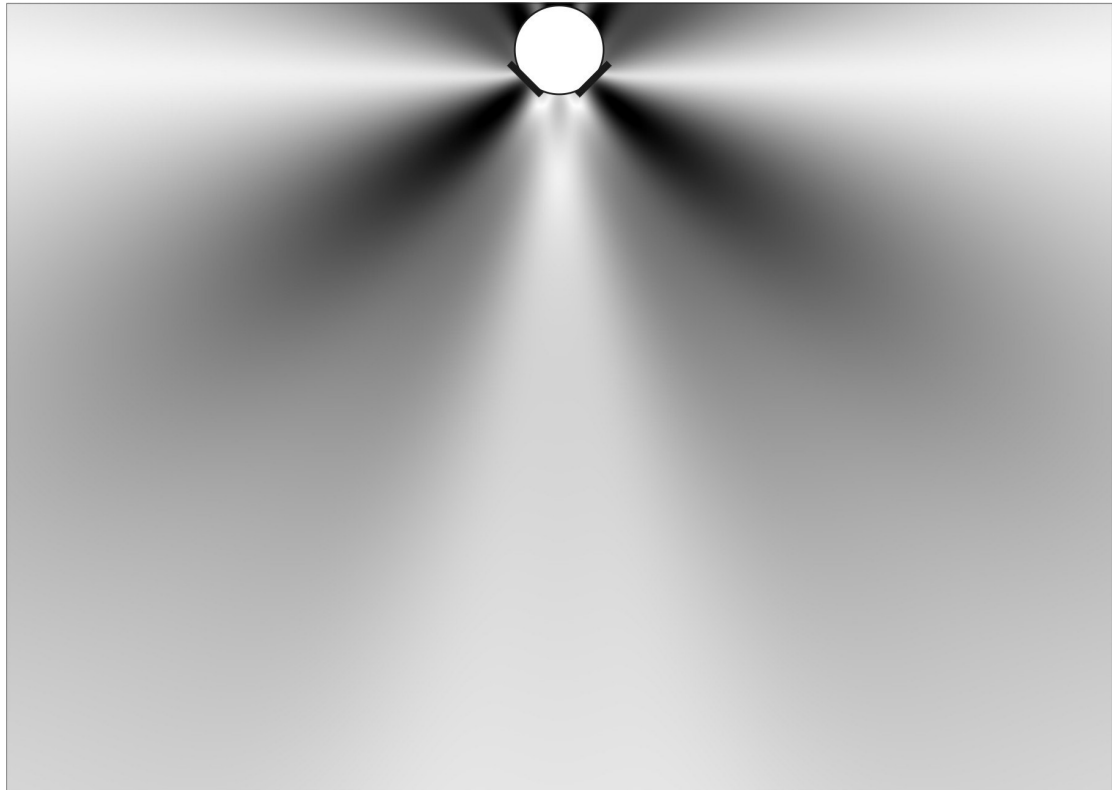


圖 4 側掃聲納能量分布

1.3 平面狀聲納

此類聲納的音鼓形狀通常為一個圓形平面，設計的目的是希望音束如雷射光一般以極窄束寬直指目標，大多數的測深聲納皆屬於此種型式。在此我們以密集排列成平面狀的同相位點波源加以模擬得到音場能量分佈與圖 3 相同，與線狀聲納不同的是在空間中它在各方向看都是這個形狀。若希望指向性較好(能量集中、束寬變窄)，須使音鼓面相對於波長變大。這通常有兩種方式達成，一是直接增加音鼓面積，如圖 5；一是提高音波頻率使波長變短，如圖 6。因此指向性高的聲納一般具有音鼓較大或頻率較高的特徵。對於相同頻率及發射功率的聲納來說，指向性提高的優點是聲納對目標地形的解析度較高，且因空間擴散造成的衰減效應較小可探測深度會較深。



圖 5 寬平面聲納能量分布模擬

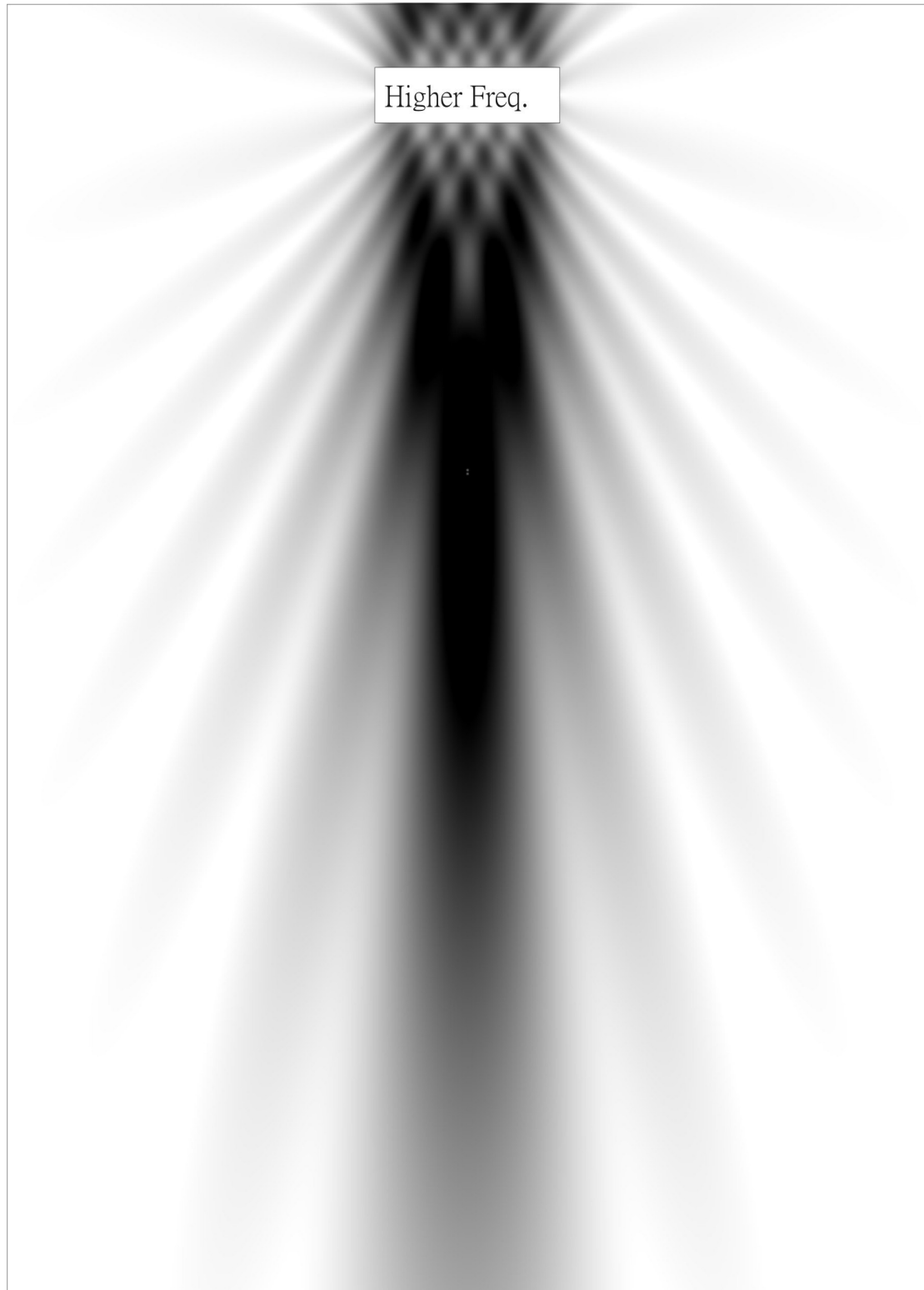


圖 6 高屏率聲納能量分布

2. 海床反應音場的模擬

根據惠更斯原理，海床上任意一點對聲納探勘的反應應該是在聲波到達前保持平靜，聲波到達後開始成爲一個點波源以正比於入射波的振幅振

動。因為聲納音波到達海床上各點的時間不同，各個海床點波源的相位也會不同，如果我們由上述的平面聲納發射音場求得海床上各點的振幅及相位，並將它們賦與平坦海床上各點使成為新的點波源陣列，則海床反應水體的音場振幅可模擬如圖 7。

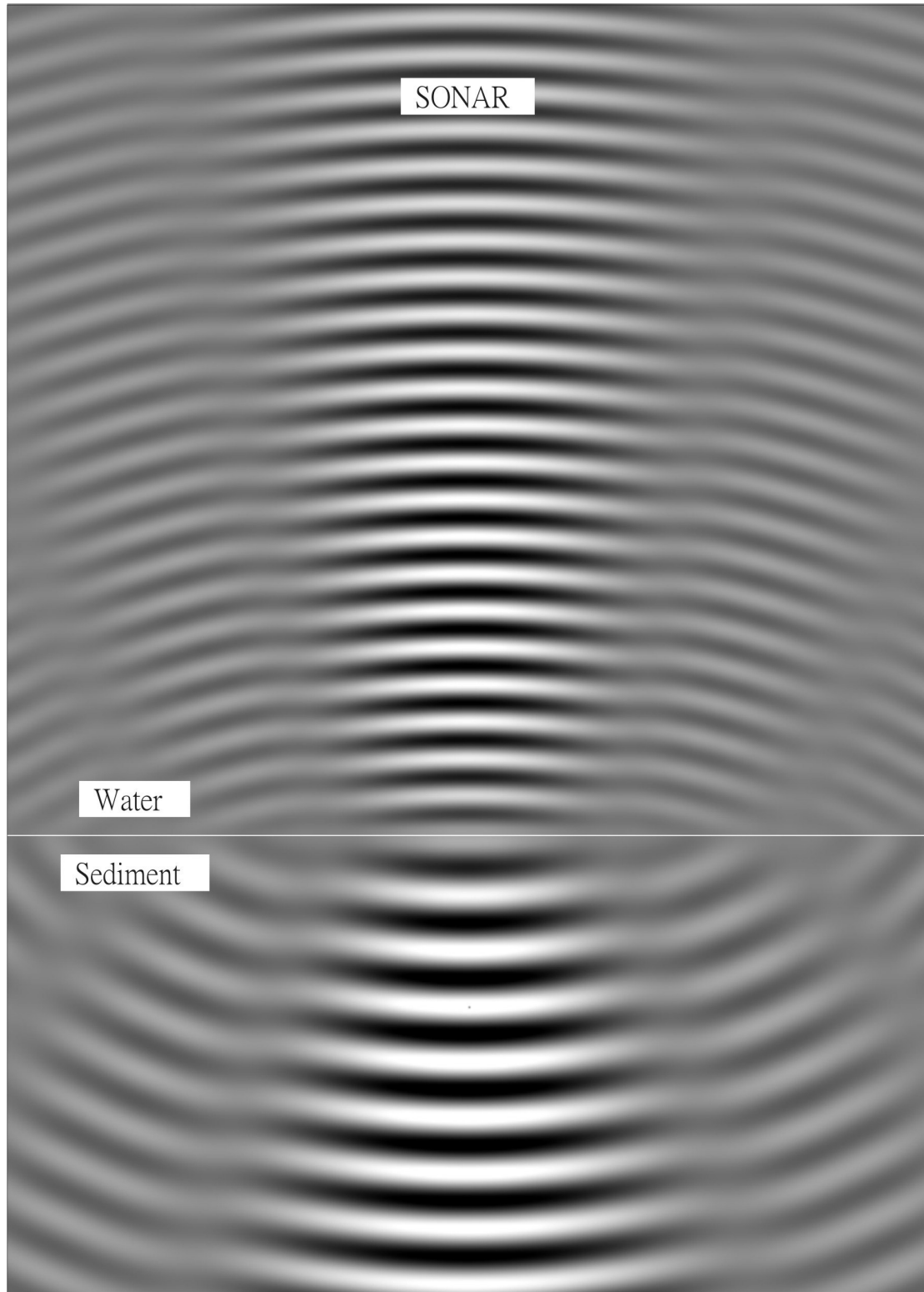


圖 7 海床反應聲波能量模擬

圖 7 中並同時模擬了聲波穿透海床進入聲速較高的沉積層後的可能音場，其運算方式與水體中反應相似，唯一的不同是其波長隨介質波速增加而變長，這也就是一般震測過程中發生的情況。值得注意的是主要的能量波束進入地底後似乎變寬了。這個現象由波線的折射定律也可以預測得知(如圖 8)。如果海底為一斜坡，模擬出之水體音場反應如圖 9 所示。可看出反應波束之軸線與反射定律所預測的一樣向下坡方向偏折。由圖 7 和圖 9 中可以發現，波動觀點與波線觀點所推測的結果並無抵觸。

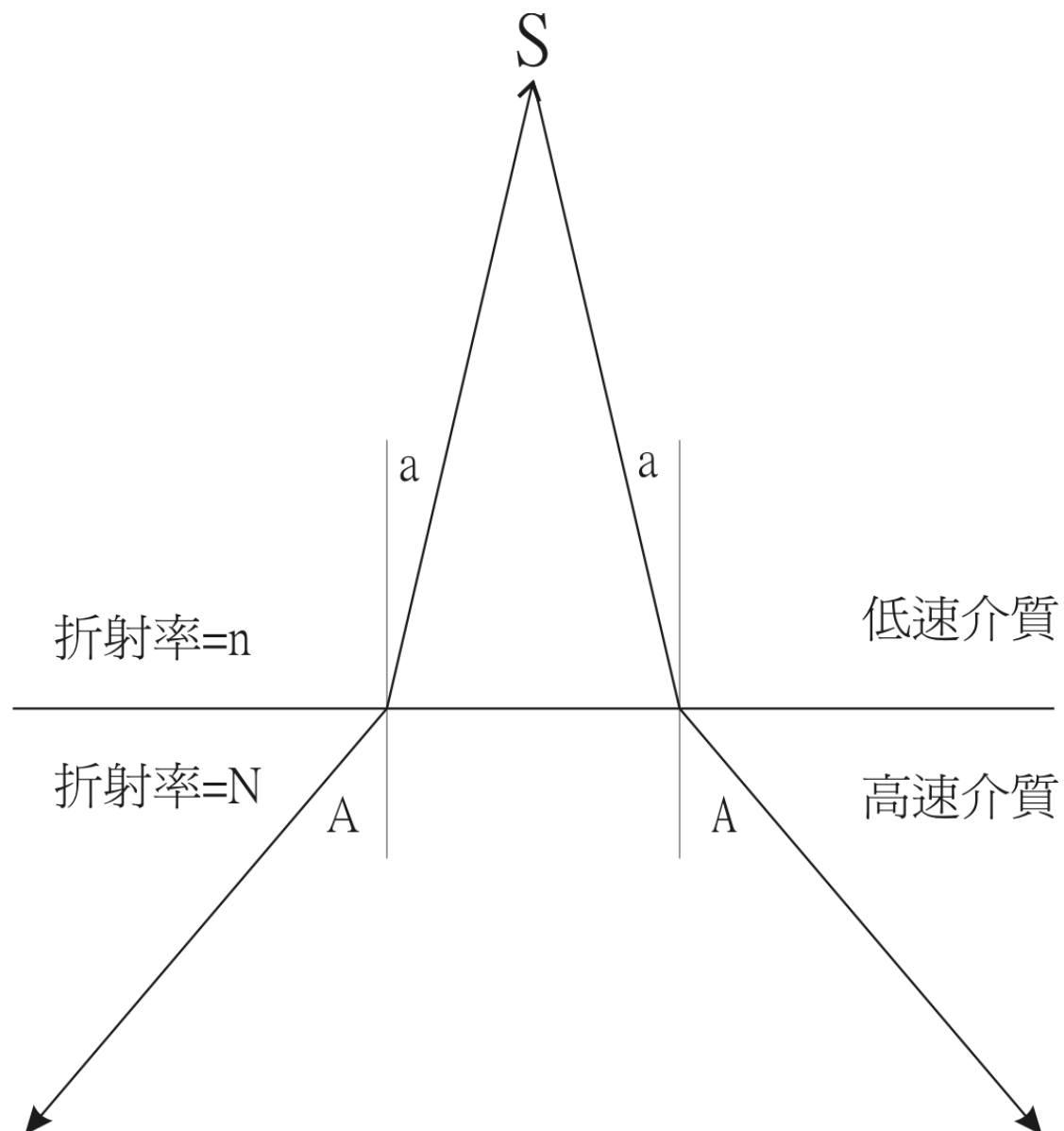


圖 8 折射路徑示意圖

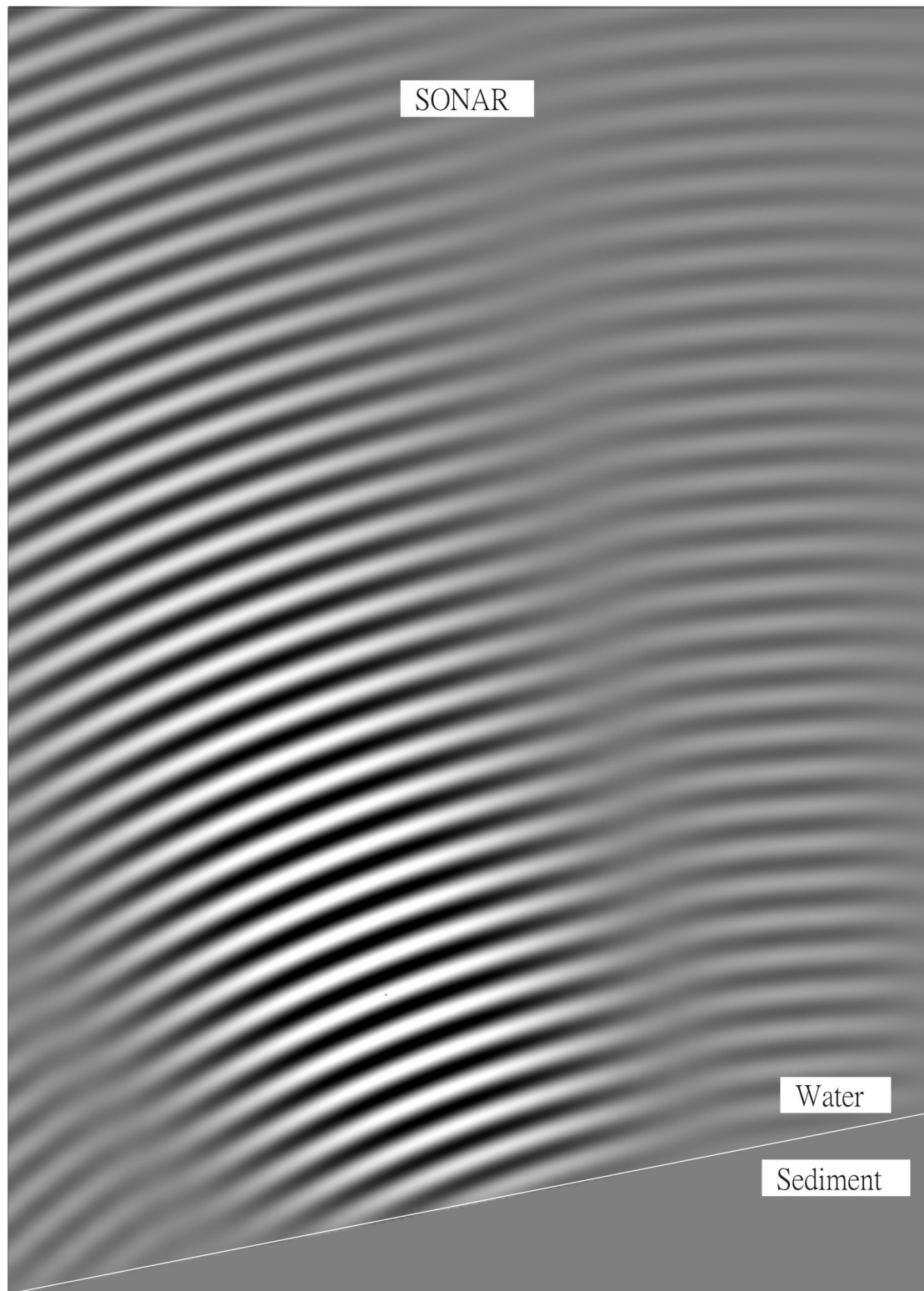


圖 9 斜坡海床反射能量模擬

3. 迴聲接收的模擬

在實際的探勘過程中聲納發出的訊號通常為有限長度之聲波波串，在平坦海床上其收發情況應如圖 10 所示；在空間中任一點可收到的迴聲訊

號應是該點受到海床反應音場影響的時間函數。對測深聲納而言，通常只記錄迴聲初達的時間，再以音速換算水深；但側掃聲納或震測系統則會完整的記錄全部的迴聲。

以波線的觀點來說，圖 10 的聲納接收的訊號應完全來自海床上符合反射定律的一點(聲納體正下方標示 B 處的一點)，依此概念聲納收到的波串應如圖 11a 所示，除傳遞過程造成的能量衰減外與發射波波形一致。但是以波動的觀點來看，海床上任一點只要受到聲納入射能量的擾動，就會產生點波源狀的散射，據此模擬所得的接收訊號將如圖 11b，可以看出兩波串初達時間一致，但後者在眾多點波源互相干涉後的結果是相位略有延遲。

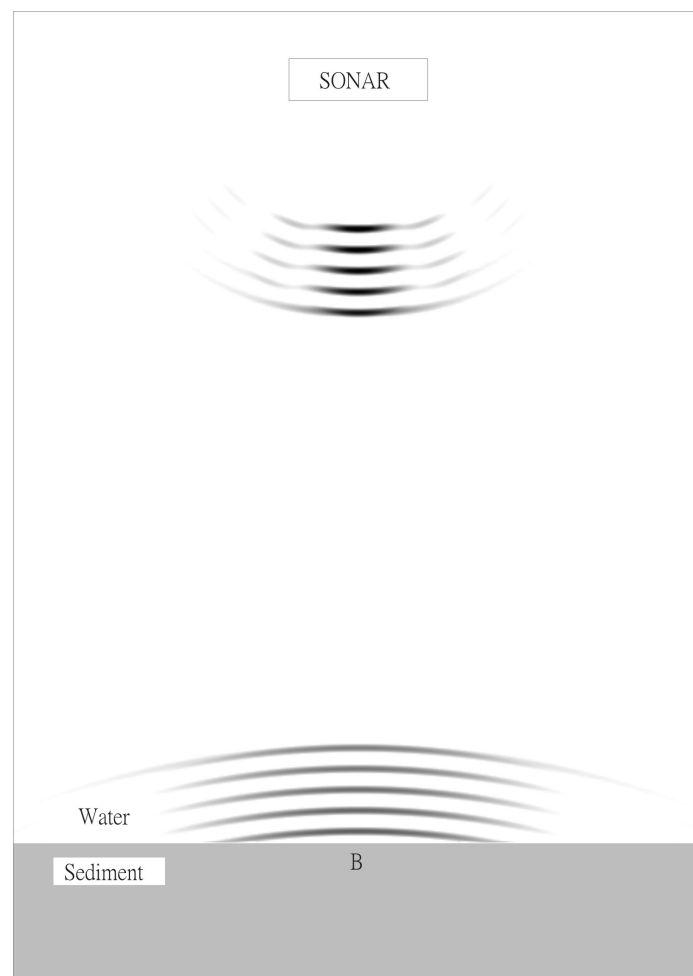


圖 10 聲納有限長波串音場模擬

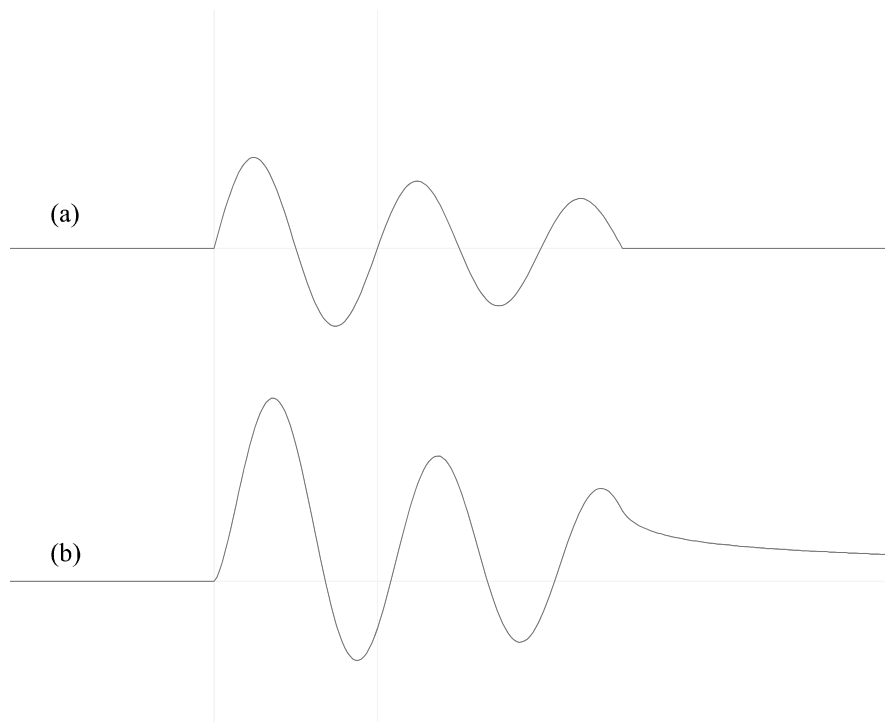


圖 11 有限波長聲納訊號時間序列繪圖

上述模擬方法的一個主要優點是，如果我們要得知複雜地形的迴聲訊號時，唯一要作的只是改變海床點的位置。在電腦銀幕前我們可以很快的得知各種地形可能產生的反應，無需作太多的硬體實驗。這除了可以幫助我們了解所收到的聲納訊息，在設計聲納工具或資料處理程序時也可以省下許多時間和花費。以下便是一個較複雜地形的模擬實例。

在聲納測深的研究中，一個基本的共識是探測音束束寬越窄，在海床上的映照面積越小，所得測深值的水平解析度也就越高。以一個坑洞的簡單例子來說(如圖 12)，如果束寬小到可以完全進入坑洞範圍，坑底深度便可測得；反之，若束寬大於坑洞則此地形將無法辨認。不過這個結論的前提是我們所得到的『測深值』只是海床反應波串的『初達時間』，而非完整的反應波串。如果我們完整記錄迴聲波串，將會是什麼情況呢？

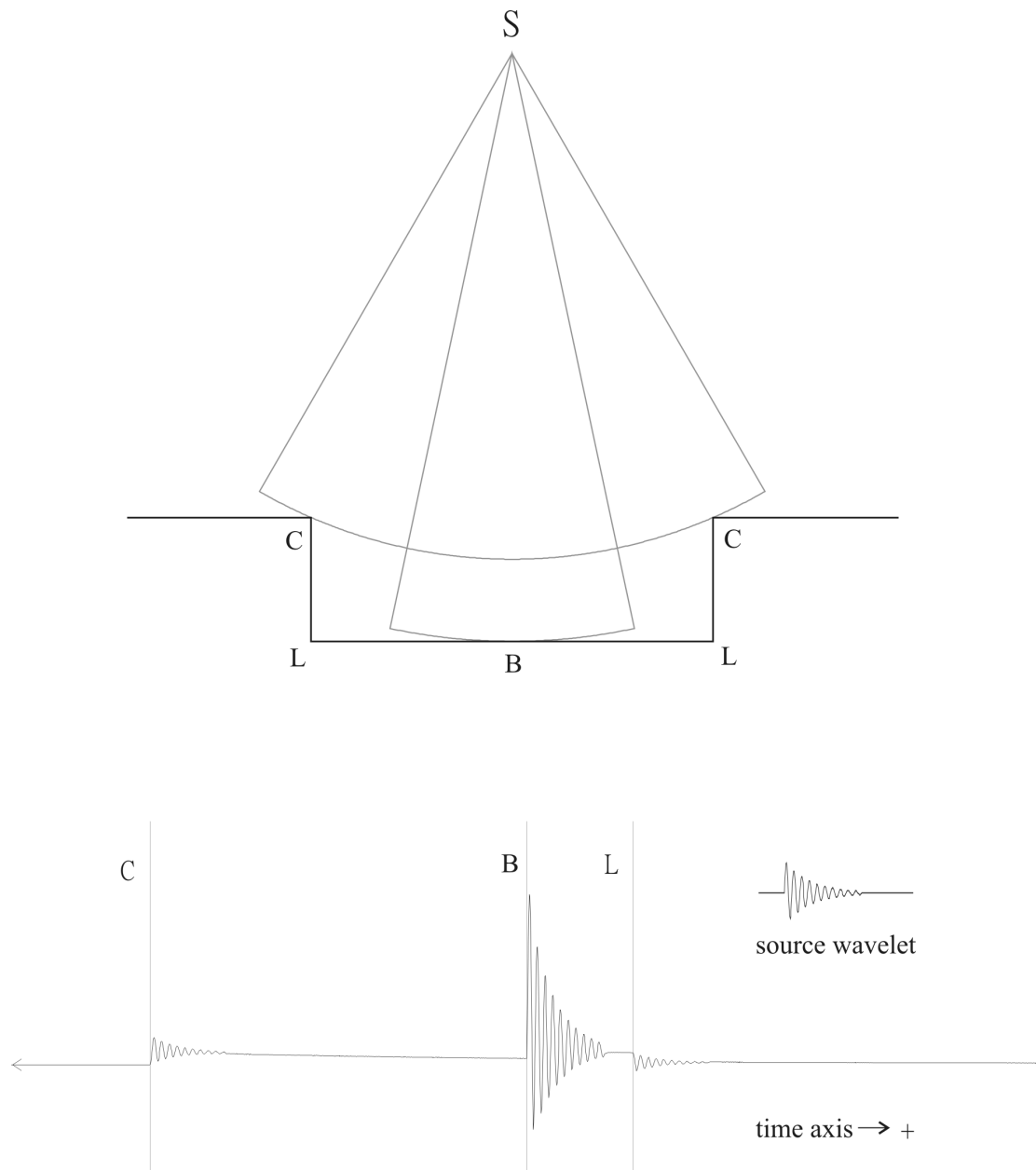


圖 12&13 坑洞聲納反應示意圖

以一個點波源對圖 12 的坑洞探勘為例，模擬所得之完整迴聲訊號如圖 13。以路徑時間推算可知除了反應自坑洞邊緣(標示 C 處)的初達波外，其後方還有來自坑底(標示 B 處)及坑底角落(標示 L 處)的兩組反應訊號。這顯示除了反射訊號(來自 B 點)外，海床上的坡度轉折點也會有獨立的訊號反應。所謂『寬束聲納無法測得坑底深度』就是聲納機中自動辨認迴聲的機制會受到 C 點訊號的驅動，而不理會其後來自 B 點的訊號。當然如果我們以完整的迴聲訊號為分析基礎，因坑底反射能量遠大於坑緣的散射訊號，要得知坑底深度並不困難。另一有趣的現象是來自坑底角落(標示 L 處)的訊號在干涉作用下產生了與另兩組訊號相位相反的情況，這意味著我們也可以從個別訊號的內容得知散射源頭地形的一些訊息。

結 語

本文以物理學中的波動理論及數位影像技巧模擬了多種聲納探勘工具的聲波發射、海床反應及可能接收到的迴聲訊號。其主要目的在提供聲納使用者於習用的波線觀點之外另一個理解聲納運作的方式。基本上波動觀點比波線的理解較為複雜，但更為接近物理的微觀事實，經過數值模擬運算其宏觀結果也可以清楚的展現。以目前電腦科技的發達程度，此類模擬運算已非難事，相信此技術可以更廣泛運用於聲納工具的教學及設計工作。

圖例說明：

- 圖 1. 點波源狀聲納的音場振幅之模擬影像，波源位於標示 S 處。
- 圖 2. 線狀聲納發射音場振幅的模擬影像。
- 圖 3. 線狀聲納發射音場能量分佈的模擬影像，深色代表較高能量。
- 圖 4. 側掃聲納發射音場能量分佈的模擬影像。
- 圖 5. 音鼓較寬的聲納產生的發射音場能量分佈模擬影像。
- 圖 6. 頻率較高的聲納產生的發射音場能量分佈模擬影像。
- 圖 7. 平坦海床對聲納的音響反應模擬影像。
- 圖 8. 波線觀點下之平坦海床波束折射示意圖。
- 圖 9. 傾斜海床對聲納的音響反應模擬影像。
- 圖 10. 有限長度波串的聲納發射與海床反應模擬影像圖。
- 圖 11. (a)單反射點之海床反應波串；(b)多散射點模擬之海床反應波串。
- 圖 12. 聲納束寬與坑洞探測關係之示意圖。
- 圖 13. 以點波源為探測波源的坑洞反應訊號模擬。