

干涉式多點測深儀施測過程的數值模擬

前 言

基於施測效率及資料解析度等考量，同時進行多點測深已逐漸成為水下測深工作發展的一個新趨勢。目前可進行多點測深的聲納工具在施測原理的分類上可分為：多音束測深聲納(Multi-beam Echo Sounder, MBES)及干涉式海床調查聲納(Interferometric Seabed Inspection Sonar, ISIS)兩類。這兩種系統之施測原理及資料處理過程皆有很大的差異。其中前者發展較早，也較為相關學者所熟知；但後者基本上是以傳統的側掃聲納(Sidescan Sonar)為其聲源，所接收的原始資料也是連續的時間序列(time series)訊號，而非一般測深機所得的單點迴聲訊號。如何以這種原本無從定位的海床資訊，經過資料處理的方式得到多點水深值，是一個較為新鮮有趣的話題。作者曾於本刊提出以數位影像模擬聲納施測過程一文，本文即以相同的原理方法模擬側掃聲納的訊號發射、海床反應及如何達到測深目的的過程。

介 紹

根據工研院於民國八十四年委託海下技術協會進行的「海下聲學儀器使用現況調查」顯示，目前國內不論工程或學術機構所使用之聲納工具幾乎完全仰賴進口，不但研發製造的能力付諸闕如，連代工生產或儀器維修的能力都十分有限。在此情況下聲納使用機構往往需編列大筆預算購買昂貴的儀器及資料處理軟體；稍後還需派員至國外原廠接受人員訓練；一旦使用上有了困難或儀器故障，又必須再花費大量的金錢時間送往國外維修。而基於商業考量，製造廠商對於關鍵技術總會有所保留，這使得使用者即使花下大筆的金錢仍對儀器及資料品質難以充分的掌握了解。

以筆者近年來接觸多種聲納工具及相關處理軟體之經驗，發現越是新穎精密的儀器或軟體，不但價格昂貴也正是最易出錯的東西。一種戲謔的說法是：「精密儀器買了就能用，這種事從未發生過！」但是這種現象其實非常合理，因為精密先進之軟硬體必然帶有相當的研發性質，衍生的現象是：第一、研究過程投入的成本必然會在銷售時以高於儀器製作成本數倍的價格取回；第二、研發過程中的軟硬體必然還存在許多設計者未預期或未發現的錯誤，而廠商為了商機通常不會為此延後推出產品的時機。筆者便曾發現過某國外廠商竟然因本身軟體設計錯誤造成不能使用而向使用者收費修改的情形！

面對此類情況，筆者以為根本解決之道在**推動本土的聲納工具研發製造**。如果我們能將高額的購置經費，部份轉為投資國內學術機構進行研

發，以國內目前之學術研究水準加上產業界的製造能力，在技術面上要達成研發目標並不困難。以往未積極投入之主要考量應為國內市場狹小，若研發成果不能與國外水準相抗衡，則研發成本恐難以回收。但近年來由於聲納硬體的發展已面臨瓶頸，相對的電腦資料處理能力則大幅提昇，許多新系統（如本文將探討的干涉式測深聲納）的關鍵技術已由硬體的設計製造轉變為軟體的資料處理。即使聲納系統中硬體設計最精密的小型多頻道測深系統，也已大量採用類似多頻道震測的資料處理技術(如 **beam-forming** 及 **digital focusing**)以提高品質並降低硬體製造成本。在此趨勢下，國外各先進廠商所擁有的精密硬體製造技術已不再具有絕對的優勢，而研發的關鍵硬體投資只是價格已日趨低廉的電腦設備。應該值得一試！

對於這個目標，個人以為第一個步驟應為對聲納施測過程的理論研究。如果學者專家們能徹底解析現有工具的施測過程，再配合產業界的製造技術，必能製出符合需求之硬體。同時也因為能夠掌握訊號收發的理論基礎，便可據以發展出合理的資料處理軟體。本文即以此理念為基礎，以理論的角度深入解析干涉式多點測深儀之施測過程，如果我們對該系統的認識能更為深入，自行製造研發之日應不在遠。事實上在寫作本文之前及期間，本人除了儘可能經由代理商取得相關資料，也趁少數的機會與原廠工程人員接觸討論其研發過程，更確認了其研究的理論基礎及技術知識並未凌駕於國內的水準，差別只是作與不作罷了。

由於傳統上多數聲納使用者或設計者皆習於以波線的觀點（**Ray Approach**）設計及了解聲納，而忽略了聲納工具的一些波動特性以及這些特性所隱含的資訊。本人此一系列之研究主要著眼於以「波動」（**Wave Approach**）而非「波線」的觀點重新解讀聲納工具的施測過程。如本文將介紹的干涉式測深系統正是運用了水下聲波的波動特性而達到測深的目的，雖然在技術層面上此系統尚有許多改進的空間，但個人以為此系統出現，最大的意義在於它以波動的觀點處理完整的海床反應訊號；相對於傳統測深機只辨認海床反射的初達時間，在資訊運用的效率上有極大的突破。這也是本文選擇此類系統為模擬對象的主要原因。

本文

1.音場模擬原理與方法

一般聲納探勘海床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，波動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，所幸其中包含的種種物理現象在學術界都已有相當深入的研究，以目前電腦工具的發達，我們可以用數值趨近的方式模擬此類過程。

以波動的角度來看，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。本文中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(請參考基本光學中之惠更斯原理)。空間中任意一點受單一波源*i*的振動反應可表示如下：

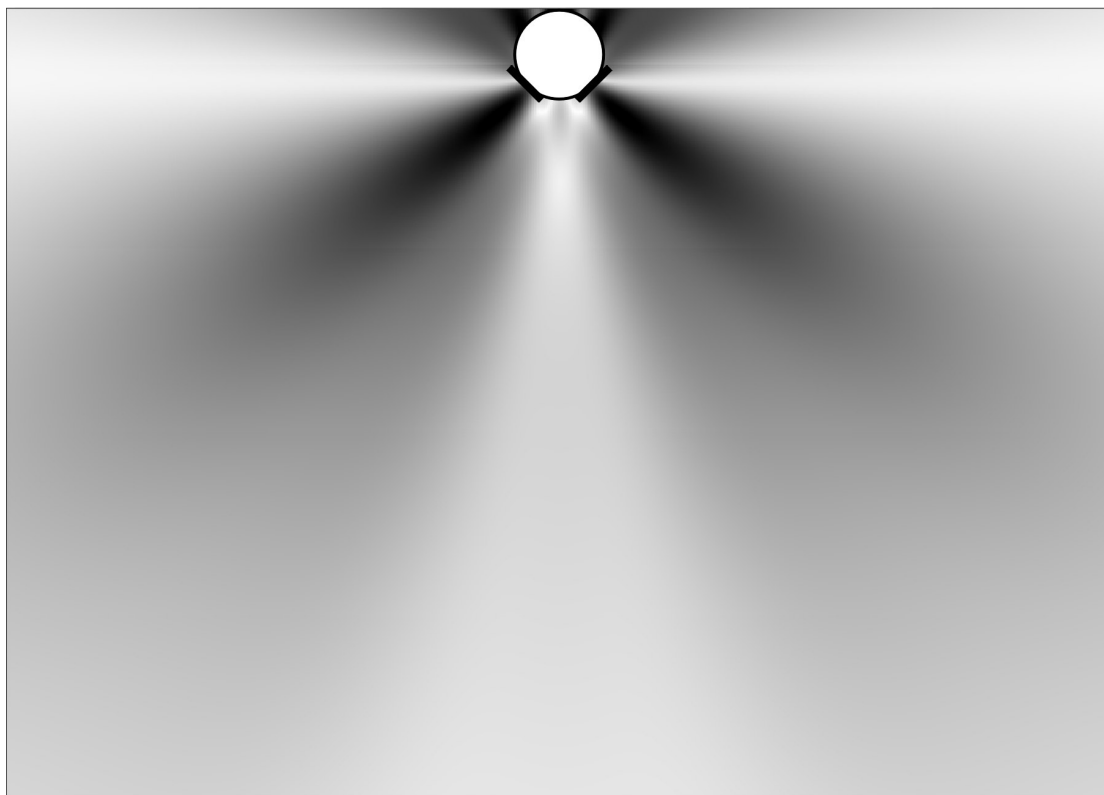
$$A_i = A_{i0} * f(d) * \sin(2\pi (f * t + d/\lambda))$$

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(heat dissipation)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)成正比。此函數在本文中以一簡單的自然對數衰減(exponential decay)加以代表。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。本文中的音場模擬即是先計算空間中各點受所有點波源影響的總和振幅($A = \sum A_i$)或能量($E = \int (\sum A_i^2) \cdot dt$)，再以數位影像的方式繪出。

2.側掃聲納發射音場的模擬

側掃聲納的基本結構為兩個分別位於機體左下及右下側的長條型聲納，如本人前文[1]所述，其音場類似線狀聲納所能產生的圓盤狀音束，在垂直機體方向來看束寬甚窄；但若從機體正前方觀測則束寬甚寬。稍有不同的是它們通常被設計成在垂直聲納軸方向也具有有一些指向性，而且通常有兩個分別指向聲納體的左右兩側。其原因是如果只有一個線狀聲納，則

來自聲納左右兩側的海床反應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，即可如圖 1 模擬出側掃聲納在空間中的音場。

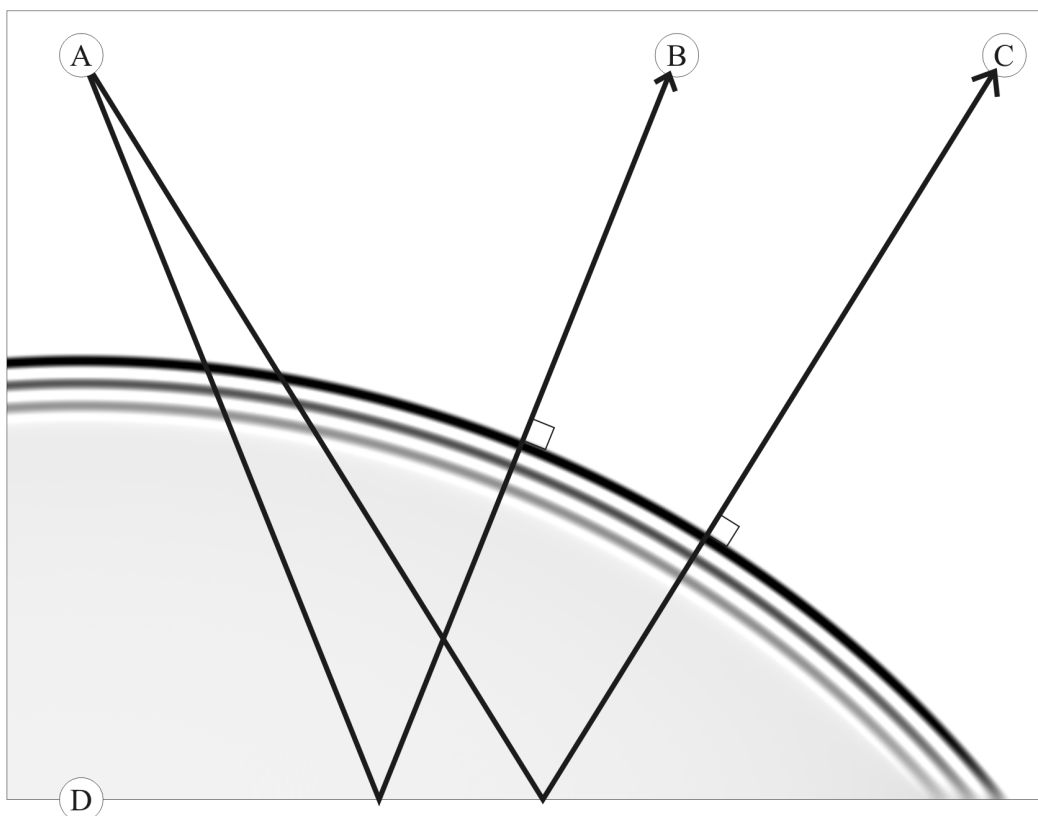


圖一. 側掃聲納音場強度之模擬

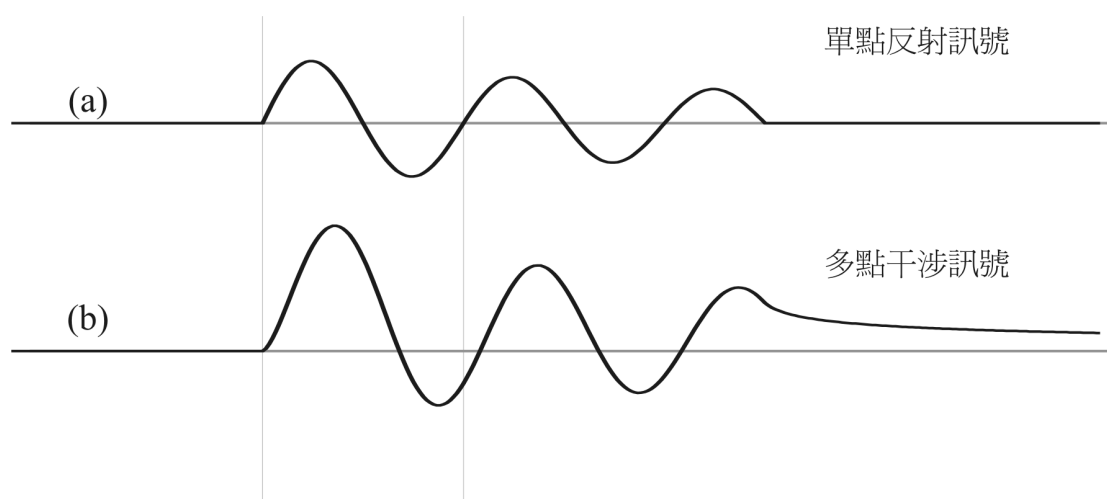
3.海床反應音場的模擬

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新的點波源以正比於入射波的振幅及相等於波源的頻率振動。因爲聲納音波到達海床上各點的時間不同，各個海床點新波源的相位也會不同，加上海床底質產生的散射強度不一，所謂的『海床反應』應該是這些「相位及強度都不同的新波源互相干涉的整體結果」。

在實際的探勘過程中，側掃聲納發出的是有限長度的聲波波串，與圖一所顯示的連續發射音場不同。我們以一線狀聲納在平坦海床上，發出一有限長之波串來模擬側掃聲納訊號。當聲波已觸及海底之後的某個時刻海床之反應應該如圖二所示。爲了方便敘述，自圖二以下的模擬影像皆假設側掃聲納位於各圖左上方標示爲 A 的一點，且在圖示平面上不具有指向性(如點波源)。



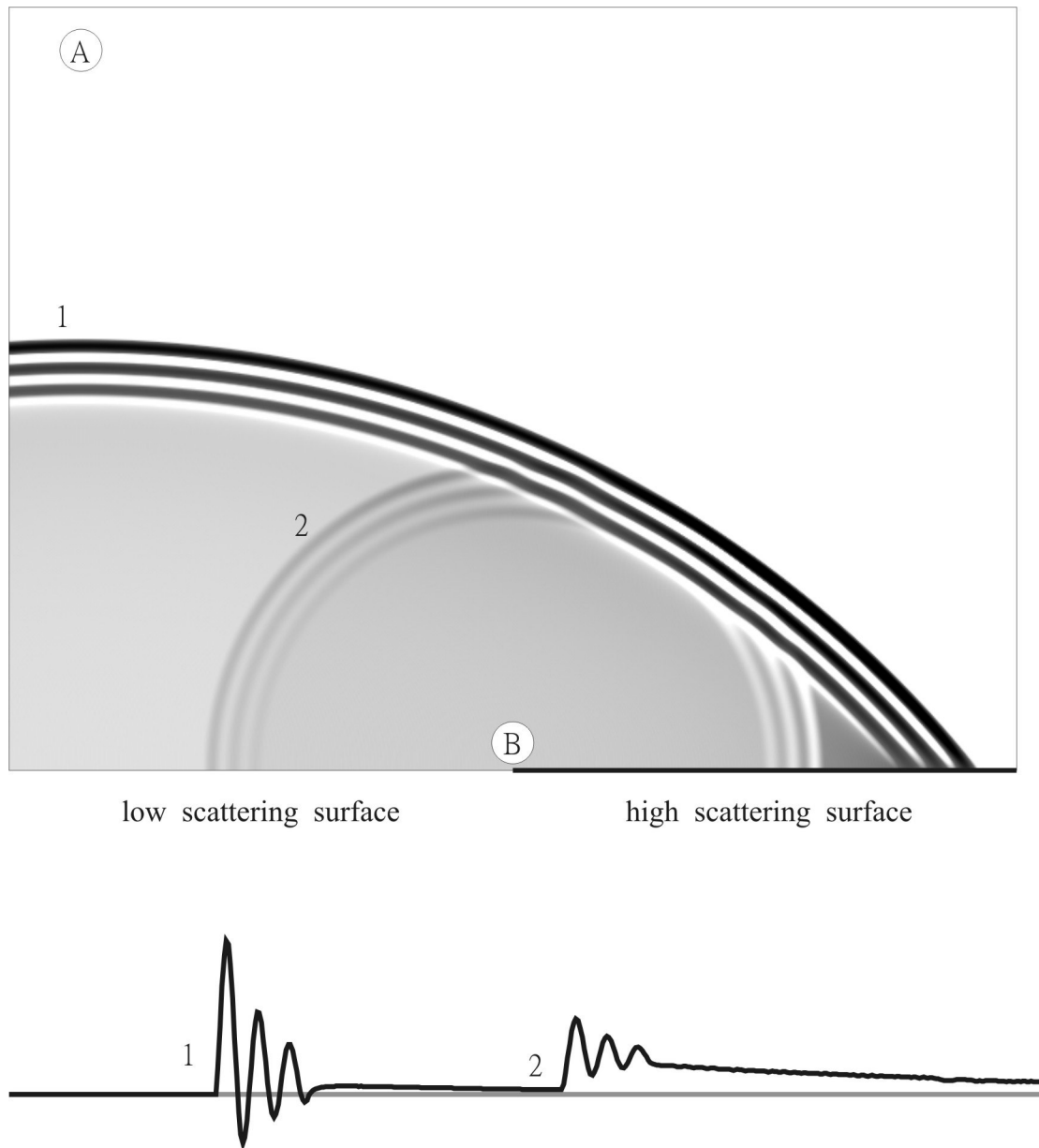
圖二. 平坦海床對側掃聲納訊號的反應



圖三. 波線與波動理論預測的接收訊號

圖二所示海床反應的波鋒(wave-front)成一弧形，其中 A 至 B 與 C 的射線乃根據波線反射定律所繪，我們可以看到反射波的波鋒與射線恰好垂直，這意味著以波動原理模擬的結果與波線反射的預測路徑相符。但如果

我們以單一反射波線預測在 B 或 C 點接收的訊號，結果將如圖三(a)所示，與多點干涉的結果圖三(b)相比訊號到達時間一致，但波形方面後者波長被略微拉長，訊號到達後的背景振幅也被略微抬高。這個結果表示波動與波線觀點對訊號的路徑與到達時刻預測一致，但波線觀點較難完整描述因多散射點互相干涉造成的訊號扭曲。但這些『扭曲』，如背景振幅被拉高的程度卻常代表著海床底質不同所造成的散射強度差異，是側掃聲納可獲得的基本資訊之一。

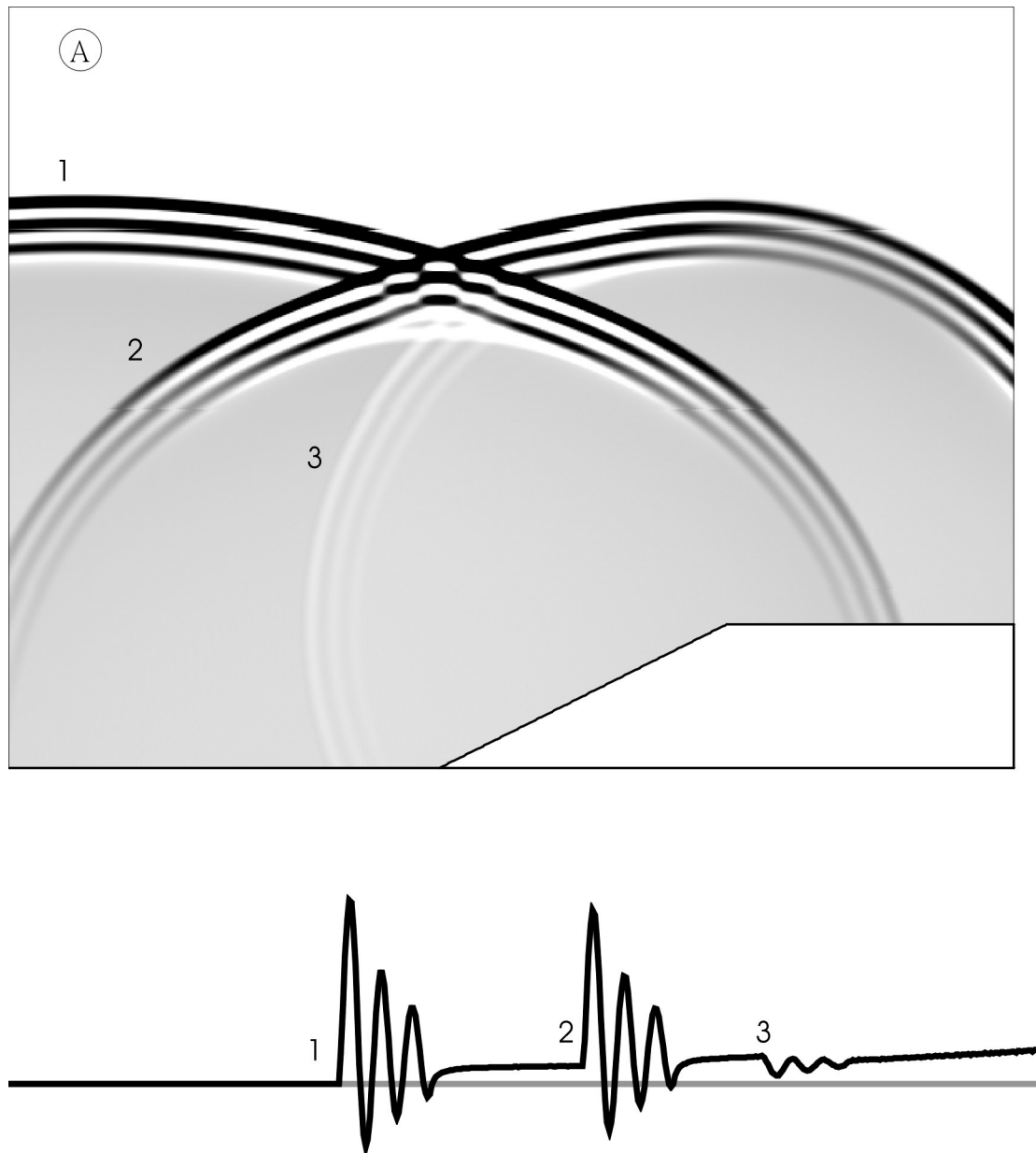


圖四. 海床底質改變時對側掃聲納訊號的反應

圖四便是假設海床散射強度有所變化的情況下所得的反應音場，及在 A 點將接收到的訊號。圖中以 B 點為界，右方底質散射強度大於左方。圖下方標示 1 與 2 兩訊號波串之間的背景振幅略大於零，代表的是 B 點以左的海床散射的結果；標示 2 之後的背景振幅更為抬高，代表的是 B 點右方的海床散射結果。有趣的是除了背景振幅確實跟著底質變化有所反應外，在底質改變的交界點上似乎產生了一個單一的『事件』，形成一個新的點波源！以惠更司原理的觀點來說，這是因為海床點波源在此地強度忽然改變，以致相鄰的各點無法完成破壞性干涉來抹平訊號，於是訊號原本的波動特性便顯露出來。

相似的情況是，如果地形上有任何的明顯轉折，則在轉折處也會產生一個獨立的訊號反應，如圖五所示的階梯狀地形就明顯的除了反射訊號外多出了兩個『事件』。而 A 點將收到的訊號如圖下方所示，反射訊號標示為 1；兩組轉折點的訊號標示為 2,3。值得注意的是不同的轉折(凹或凸)產生的訊號相位亦相反，這意味著如果接收訊號的解析度高到足以解析單一訊號的波形，則相位的變化也可以提供部份地形轉折型態的資訊。

對於多數的傳統側掃聲納來說，沿時間序列上的解析度通常都不足以辨認上述事件訊號的內容，我們在一般的聲納影像圖中看到的訊號強弱基本上只是反應以上模擬訊號中的背景振幅。事實上以獲得海底聲納影像的目的來說，在底質變化邊界或地形轉折點上有一個獨立的訊號產生也不是探勘者所需要的結果。但如果我們能將解析度提高到可以辨認這些個別事件的程度時，確實可以得到一些額外的收穫，「獲知事件點的水深」便是其中之一！

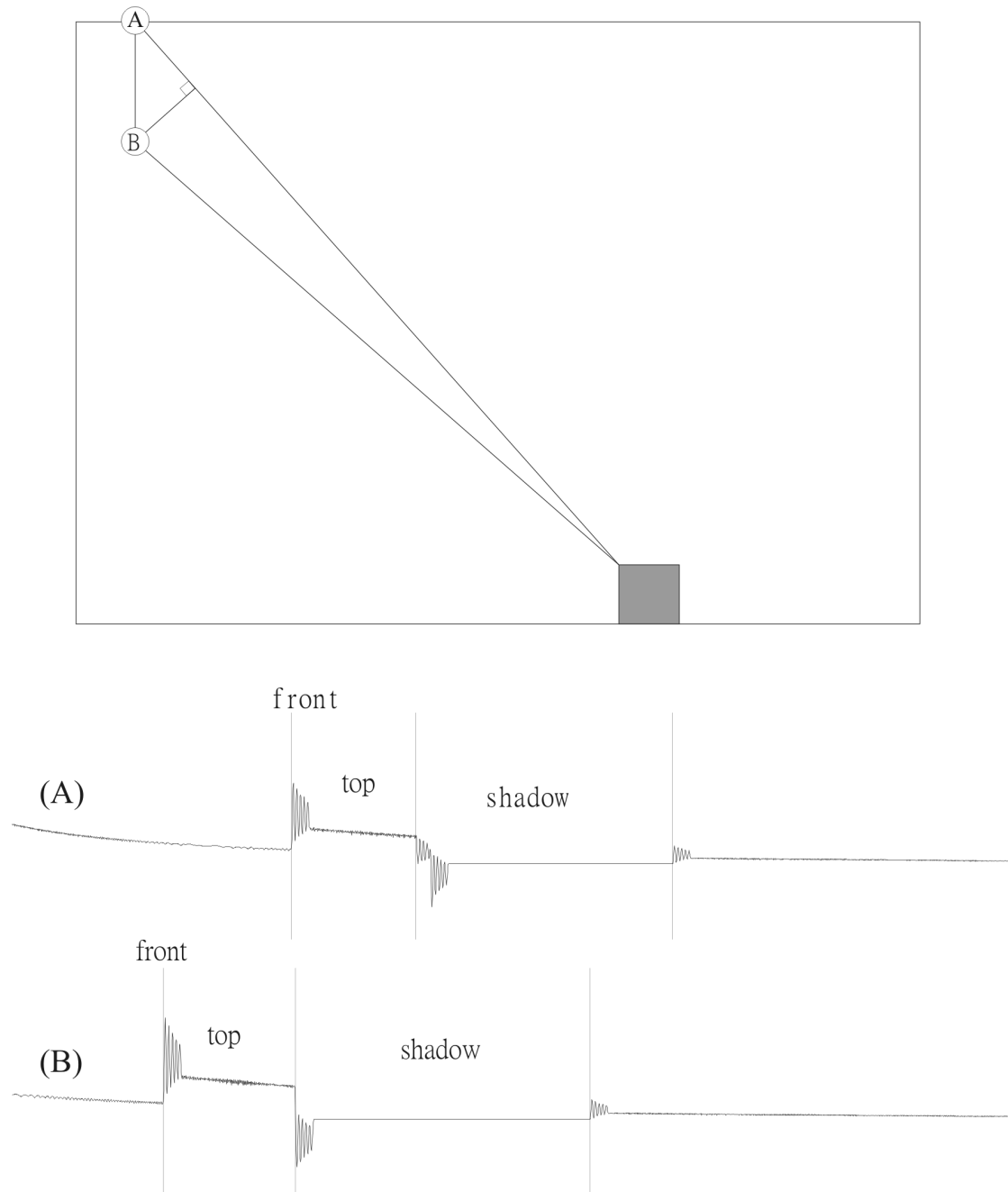


圖五. 階梯狀地形對側掃聲納訊號之反應

4. 側掃聲納多點測深之原理

由圖四和圖五的模擬中我們可以預期，空間中的任何一點或遲或早都會收到海床反射及各個底質變化或地形轉折事件傳來的事件訊號，因此如果我們在不同的位置設置多個接收器記錄海床反應，則它們接收到的事件數及各事件訊號的波形應該相似，但事件到達各接收器的時間卻有差異。

以圖六的情況來說，位於標示 A 與 B 的兩個接收點所得訊號將如該圖下方所示。由兩接收器的空間位置和同一事件訊號到達兩點的時間與時間差，我們可望經幾何運算得知事件發生點的確實座標(詳細的計算方式一如物理光學中的狹縫干涉實驗，在此不再贅述)，而這是一般側掃聲納系統無法做到的一點。



圖六. 側掃聲納測深原理之模擬

如果我們能在多個接收器的收訊中分辨出各個單獨事件產生的訊號及其到達時間，則理論上我們可以在每一次聲納掃瞄後，得到多個事件點的水深值。換言之，只要訊號的解析度足夠，再配合適當的辨識軟體，側掃聲納便可以發揮多點測深的功能！此類系統目前已進入商品化的階段，工研院能資所便已引進國內第一套由 Submetrix 公司製造的 ISIS100 系統。

但根據筆者研讀該系統內部資料[2-5]的結果顯示，基於處理速度（或其他筆者尚未得知的原因），該系統並未如以上理論推導中所說的，以完整的訊號波形進行處理辨識。相反的，它接收及辨識訊號的方式較近似於傳統的測深聲納。在接收器與電腦之間他們插入了一個前置處理器，將兩個頻道訊號起伏的時間差直接測出，再交由電腦做後續處理。換言之，波形的資訊在前置處理器中已被銷毀。這種做法可以大幅簡化資料處理流程，速度當然可以增加，測得點數也因此可以達到多波束聲納的數十倍之多。但是付出的代價是訊號被過度簡化後，兩訊號是否來自同一海床散射點的辨識成功率便大受影響，也因此有許多有關系統正確性的測試中，干涉式測深儀多半未能擊敗多波束測深儀。

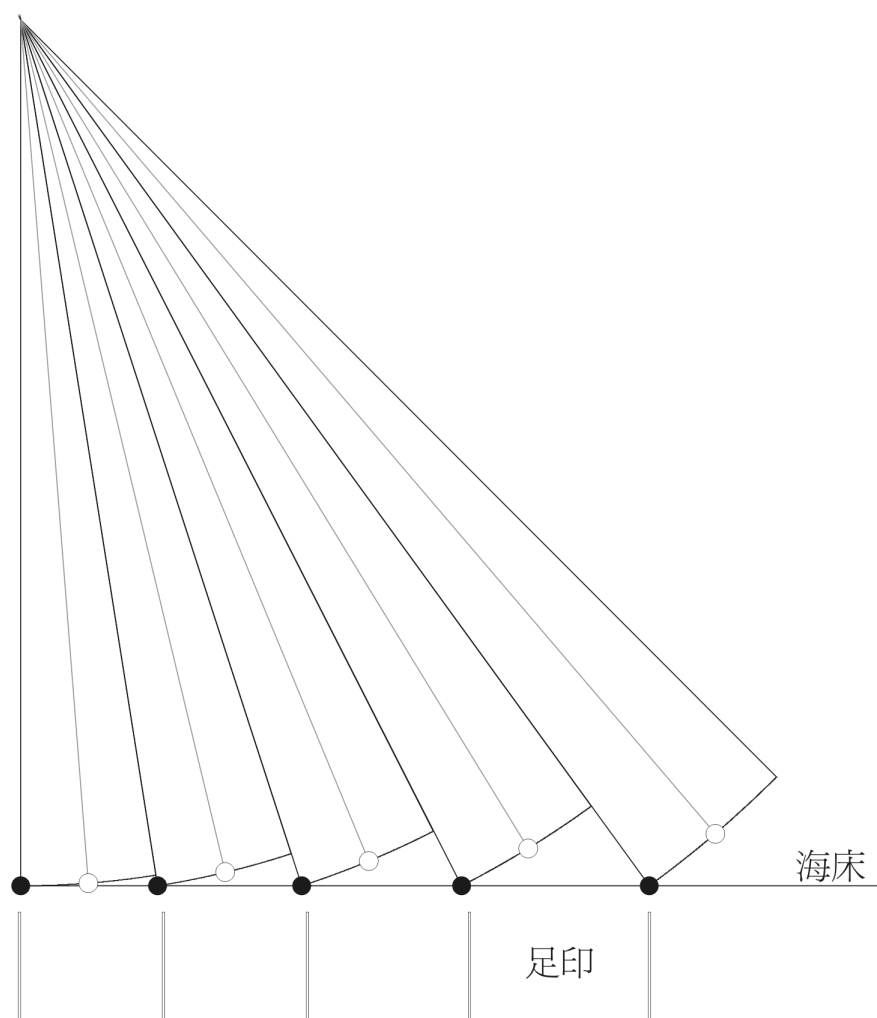
這也是本文並不以「模擬 ISIS 系統」為名的主要原因。可以預期如果該系統能完全依理論正確處理全波形訊號，不僅正確率可以大幅提昇，所得之海床資訊可能還不止於水深而已。當然要達到此目標不僅電腦處理速度可能不夠，且辨識軟體的複雜度也會大幅提高。電腦速度方面我們可以樂觀的期待不久之後便可達到需求；軟體方面則有待學者專家在學理及實驗上繼續研究。

5.ISIS 與 MBES 系統之比較

a.軟硬體架構方面

相較於多波束測深系統(MBES)，以側掃聲納為建構基礎的 ISIS 系統施測時所需的定位系統及湧浪補償器等等週邊儀器要求與 MBES 完全相同，但其聲納體較 MBES 所用的數十個波束的聲納陣列簡單許多。這通常意味著其硬體成本較低及系統維護較為容易。如前所述，ISIS 系統成敗的關鍵在於電腦硬體上是否有夠高的速率將收到的訊號數位化，以及訊號辨認軟體是否能有效的在不同接收器所得記錄中判斷各個獨立訊號何者為同一事件？何者不是！

簡言之，此類系統可以發揮多點測深功能的關鍵在於其『處理』訊號的方式，而不是使聲納產生更多的波束擊中更多的目標點！這使得整個系統要求最嚴苛的部份不是聲納體而是所配備電腦的軟硬體效能，相對於近年電腦軟硬體的快速發展，可以預期此系統的效能提昇及價格降幅都還有很大的空間。



圖七. 聲納束寬造成的足印示意圖

b. 聲納『足印』的問題

對於傳統的測深聲納，不論是單束是或多束式都有一個所謂『足印』(foot print)的問題。如圖七所示，任何聲納音束發射時皆有一定的束寬，在測深過程中，我們將音束射向海底時音束會涵蓋海床上一定面積的範圍，而非單一的點，此範圍被稱為足印。因為測深聲納通常只接收及辨認迴聲訊號的初達時間，所以理論上我們得到的水深值是足印範圍內距聲納體路徑最短的一點（如圖七中的實心圓點所示），並不能確定必然是聲納軸指向的點（圖七中的空心圓點）。

通常這種誤差在束寬縮小後可以大幅改善，尤其到了 MBES 系統的時代，束寬更已小到 1° 左右，似乎足印的問題已微不足道。但也是因為多波束時代的來臨，音束被要求同時以多方向斜射向海床，在此情況下即使束寬甚窄，角度太大時足印仍會擴大很多。因此一般展開的角度多在 $90-120$

°之間，以避免足印太大時水平誤差隨著劇增。

相對的，ISIS 系統在施測原理上並無這種問題，以個別訊號（如前文所述之『事件』）而言，訊號都來自海床上的單一事件『點』，而非一個音束映照的『區域』！因此資料的正確性與它來自什麼角度關係不大，這也是此系統號稱有超寬側向涵蓋面積的原因。但它的主要困擾在於事件是否夠清晰或事件訊號是否重疊得太厲害。例如，在理論上，一個如鏡面一樣均質平坦的海底，干涉式測深儀應該只能分析出一個水深值！事件密度太高時則很容易辨識錯誤而算出錯誤的水深值！

b.系統升級的前瞻性

由於聲納工具購置成本甚高，且近年來儀器系統進步幅度很大，多數的使用者都希望投入高額成本購置的儀器不會很快落伍，或者具有較高的升級（upgrade）潛力。以此觀點而言，多數 MBES 系統可以很容易的升級為具有側掃聲納功能的海床探勘系統，廠商索價約為五十萬元新台幣。原因無他，因為多數小型的『多音束測深系統』其發射訊號基本上與側掃聲納無異，都是寬而扁的扇狀音束！僅在接收器設計上使用了所謂 beam-forming 的資料處理技術！換言之，所謂『多音束』的概念僅及於訊號接收的部份！在此情況下所謂『升級』只是增加一無指向性接收器，並將資料顯示出來而已。但如果使用者期望的是測深點密度或廣度的增加，則非汰換聲納機體不可，其成本保守估計約為全系統之半，亦即數百萬元！

反觀 ISIS 系統，基本上它便是一個側掃聲納，當然能夠提供側掃聲納的聲波影像資料，但其測深能力則取決於電腦處理效率及訊號辨認軟體的有效與否。如果樂觀的看待此系統，爾後的升級也就是提昇測深正確率、密度或廣度，所需成本都與聲納機體無關，只需更換電腦及資料處理軟體，成本應甚為低廉。但前提是軟體的技術需有長足的進步，不確定因素較高。

從純粹物理的觀點來看，MBES 系統提昇效能的空間在於更高的聲納指向性，使波束寬度更小，音束數量更多。欲達到此目的，不二的選擇是提高音波頻率[1]，這也是測深聲納頻率從早年的數 kHz 到近年的數百 kHz 的主要原因。但是物理定律告訴我們，更高的頻率代表更快的能量衰減，測深深度將因此大幅減低；如果我們增強聲源能量作為彌補，又可能因為音鼓震動過快，再聲源附近產生類似水中氣泡的真空空隙(cavity)，使發射能量在聲源附近便散射殆盡[6]！可以預期此系統受制於物理定律，效能提昇應較為有限。相對的，ISIS 系統較沒有這種顧慮，但資料解析是否能達到理論預期則有待進一步的研究。

結 語

本文以物理學中的波動理論及數位影像技巧模擬了側掃聲納的測深原理及過程，也對 MBES 及 ISIS 兩個系統的測深能力及展望作了一些評估與討論。其主要目的不在評斷或推薦特定的系統，而是希望拋磚引玉，引起讀者們對聲納系統運作原理進一步探討的興趣。由於目前國內聲納系統多由國外進口，而廠商站在商業利益考量必定會強調其系統軟硬體的超強功能及無可取代的特性，以便推銷其全套的產品；也希望使用者因此更為依賴其維修服務。正如一般電腦銷售者會刻意強調許多組件的不相容性，以便賺取組裝電腦的高額服務費一樣。

如前文所述，如何節省經費、提高使用效能並免於國外廠商的挾制，解決之道在於自行研發。但以筆者觀察所得，國內廠商由於規模或自信心不足多不敢貿然投資於研發工作；而水深測量界之學者亦多專注於儀器之使用、校正及資料分析解釋等研究，甚少著力於聲納原理乃至自行組裝系統等工作。因此要打破聲納系統黑盒子的迷思，除了學界應注重聲納原理之研究及教育宣導外，更重要的是廣大使用者應有更強的自信心，相信自己有能力也樂於進一步了解自己使用的聲納。筆者期望在不久的將來，國內各學術機構或探勘公司能以「做」了好儀器為榮，而不僅以「買」了好儀器為滿足。

參考文獻：

- 1.張逸中，87 年 3 月，聲納探勘過程的數值影像模擬，海下技術季刊，第八卷第一期，p.18-25.
- 2.ISIS Technical View.
- 3.ISIS 100 Information Pack.
- 4.Jade Dam ISIS100 Survey August 1997 Report.
- 5.ISIS100 Teaching Pack, Issue1.0 August 1997.
6. Dowling, A.P. and J.E.F. Williams, 1983, Sound and Sources of Sound.