



應用混響衰減估測於拖航水槽之材料吸音率評估

吳柏賢* / 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 助理教授

陳冠宇 / 國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

混響時間是指聲音強度由初始強度下降 60 dB 所需的時間，為評估封閉空間內部聲學特性的重要參數之一，根據聲音強度衰減曲線的生成方式不同，大致可區分為直接量測之噪音中斷法以及間接量測之脈衝響應積分法。本研究針對單頻、最大長度序列 (MLS) 訊號應用於噪音中斷法，以及 MLS、指數掃頻 (ESS) 訊號應用於脈衝響應積分法，於拖航水槽之水下環境中進行混響衰減估測分析，討論各種訊號處理參數（如：訊號週期長度、步階長度）對混響時間估算的影響。此外，更進一步將混響衰減估測技術應用於水下材料吸音率評估，實驗於成功大學大系統及船舶機電工程學系之拖航水槽中進行，結果顯示出各種方法對於估測混響時間的一致性，皆可有效運用於水中材料之吸音率評估，但使用寬頻訊號可在相同準確性下，大幅縮短量測時間，提高整體試驗效率。

關鍵詞：混響時間、最大長度序列訊號、指數掃頻訊號、脈衝響應積分法

前言

科技快速發展雖然帶來了國人生活水準的提高，不過也同時帶來了噪音汙染問題，一些科技產品與設備可能會產生噪音，例如：車輛噪音、建築工地、機械設備等，人們在生活與工作的環境中充斥著各種噪音源，這可能對他們的生活品質和健康造成負面影響，因此，科技發展帶來的噪音汙染問題需要得到重視。評估一個空間受到噪音汙染的程度，除了直接量測噪音分貝數之外，另一個方法就是分析該環境的混響時間 (Reverberation Time, RT)，混響時間是指聲音強度由初始強度下降 60 dB 所需的時間 (T_{60})，為了控制室內空間的混響時間，避免混響時間過長對人們生活品質造成影響，最常見的方式就是在空間中配置吸音材料，而要得知吸音材料的吸音效果，也可以透過測量混響時間來評估其吸音率。混響時間的量測過程，一般可透過分析聲音強度的衰減曲線，根據聲衰減曲線

的生成方式不同，大致可區分為直接量測之噪音中斷法 (Noise Interrupt Method) 以及間接量測之脈衝響應積分法 (Impulse Response Integration Method)。

噪音中斷法^[1]是計算當音源關閉時，聲音強度下降 60 dB 所經歷的時間，由於音源關閉瞬間容易伴隨著一段脈衝訊號，因此通常會擷取低於音源強度 5 dB，作為衰減曲線的初始值，並設定高於背景噪音 10 dB 作為衰減曲線的終點，避免背景噪音影響量測結果。初始點連接到終點的部分即為聲音衰減曲線，不過實際情形下，音源要產生高於背景噪音 60 dB 以上的聲音，是比較難達成的，通常可計算 T_{20} 或 T_{30} 來反推 T_{60} 。獲得衰減曲線後，可透過衰減曲線斜率分析混響時間。

六點法^[1]是另一種以噪音中斷法為基礎的分析方法，該方法由衰減曲線中選取前 3 點及後 3 點（共 6 個點），並匯集各筆資料、各通道內的 6 點衰減參數，利用最小平方誤差法 (LMS) 進行線性回歸曲線擬合，分析衰減曲線斜率與混響時間。該方法優點是一次處理全部資料，分析數據較方便且快速。

* 通訊作者，z11008010@ncku.edu.tw

脈衝響應積分法^[2]是假設空間聲場為一個線性非時變系統 (Linear Time-Invariant Systems, LTI)，系統的輸出訊號 $y(t)$ 是根據輸入訊號 $x(t)$ 和脈衝響應 $h(t)$ 通過捲積方式計算出來，其中 $y(t)$ 代表麥克風接收訊號、 $x(t)$ 代表喇叭輸出訊號，通過量測空間脈衝響應可分析空間中的聲學性質，如房間的混響時間和清晰度參數等。對於一個 LTI 系統進行量測，最理想方式是產生一個理想脈衝於系統中，但現實中不存在一個無限窄、且無限高峰值的脈衝，聲學常用的脈衝訊號有：鼓掌聲、槍聲、氣球爆破聲，但這類訊號仍非無限寬頻，通常會在低頻上有缺失，且不易產生相同訊號，不利於重複性實驗。

本研究採用兩種寬頻訊號於脈衝響應積分法，第一種寬頻訊號為最大長度序列 (Maximum length sequence, MLS)，MLS 具有自相關函數 (Auto correlation function) 近似於脈衝訊號的特性，當喇叭輸出為 MLS，藉由將麥克風接收訊號與喇叭輸出訊號進行交相關運算 (Cross correlation)，理論上即可獲得系統的脈衝響應。第二種寬頻訊號為指數正弦掃頻訊號 (Exponential Swept-Sine, ESS)，ESS 可在任意選定頻寬範圍內形成調頻波，並且其反函數濾波器具有解析解，文獻表示該訊號對於雜訊與非線性效應具有良好的抑制能力^[3]。

獲得空間聲場之脈衝響應後，對其做積分處理可得到聲場衰減曲線，其中脈衝響應積分的衰減模式近似於指數衰減，雜訊則會隨時間積分長度縮短而減少，因此聲場衰減曲線由非線性聲場衰減與線性雜訊衰減兩條曲線共同組成，需使用非線性回歸進行曲線擬合，分離出非線性聲場衰減曲線斜率與混響時間。其中脈衝響應積分的衰減模式近似於指數衰減，雜訊則會隨著時間經過所剩的訊號長度縮短而減少。

吸音率的量測方法主要分成兩種，分別是阻抗管法及迴響時間法，阻抗管法主要測量正向入射吸音率，混響時間法則可測量平均吸音率。本研究將使用混響時間法於水下環境，藉由量測吸音材料置入拖航水槽前後的混響時間變化，評估水中材料的吸音率。此外，研究中也將導入噪音減少係數 (Noise reduction coefficient, NRC)

與吸音平均值 (Sound absorption average, SAA) 作為水中材料吸音效率的量化指標。

聲學理論

擴散聲場模型

根據簡正模態理論，當聲源頻率越高，需要更多簡正模態相互疊加來描述聲場，此時聲場近似均勻分布，可改以聲線方式描述聲場。當聲線經過數次反射與透射後，聲場達到穩定狀態，聲場內任一點能量密度幾乎相同，且任一條聲線傳遞至各方向的機率幾乎相同，此狀態稱為「擴散聲場」或「迴響聲場」。假設聲場中一個能量包，其體積為 dV ，以球座標 (r, θ, ϕ) 表示，如圖 1 所示。

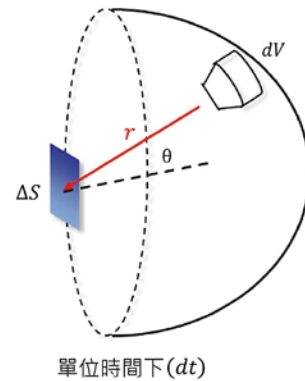


圖 1 擴散聲場模型示意圖

$$dV = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \, dr \quad (1)$$

上式中， $r = Cdt$ ， C 為聲速， dt 為單位時間。若能量以法線角度 θ 入射到邊界微小面積 ΔS ，則面積 ΔS 接收到的能量為：

$$\Delta E = \frac{\varepsilon dV}{4\pi r^2} \cos\theta \, \Delta S \quad (2)$$

上式中， ε 為聲場能量密度。考慮半球體內，所有能量入射到面積 ΔS 的能量總和為：

$$dE = \int \Delta E = \frac{\varepsilon C}{4} \Delta S dt \quad (3)$$

單位時間入射到單位面積邊界上的能量 (隨機入射聲強) 可表示如下：

$$I_r = \frac{dE}{\Delta S dt} = \frac{\varepsilon C}{4} \quad (4)$$

單位時間內，空間邊界上吸收到的總能量 (聲功率) 可表示如下：

$$E = \frac{\varepsilon C}{4} A \quad (5)$$

上式中， $A = \bar{\alpha} S$ 為總吸音量 (或稱有效吸音量)， $\bar{\alpha}$ 為平均吸音率，其範圍介於 0 到 1 之間的數值，當 $\bar{\alpha} = 0$ 代表聲音能量經過材料時完全被反射，相反的， $\bar{\alpha} = 1$ 代表聲音能量完全被材料給吸收，吸音率越高，代表材料吸收聲音的能量越強。根據能量守恆關係，擴散聲場的動態方程式可近似為一階微分方程：

$$V = \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{AC}{4}\varepsilon = W \quad (6)$$

上式中，等號左側第一項表示聲場能量增加的部分，等號左側第二項表示邊界吸收能量的部分，等號右側為音源輸出功率。假設聲源於 $t = 0$ 時刻開啟，式 (6) 可表示為：

$$V\dot{\varepsilon} + \frac{AC}{4}\varepsilon = Wu(t) \quad (7)$$

擴散聲場的一階微分方程解為：

$$\varepsilon(t) = \frac{W}{AC} \left(1 - e^{-\frac{AC}{4V}t} \right) \quad (8)$$

當時間 $t \rightarrow \infty$ ，擴散聲場達到：

$$\varepsilon(\infty) = \frac{W}{AC} \quad (9)$$

假設聲源於 $t = 0$ 時刻關閉，式 (6) 可表示為：

$$V\dot{\varepsilon} + \frac{AC}{4}\varepsilon = V\varepsilon(\infty)\delta(t) \quad (10)$$

擴散聲場的一階微分方程解為：

$$\varepsilon(t) = \frac{W}{AC} \exp\left(-\frac{AC}{4V}T_{60}\right) = \frac{W}{AC} \exp(-\bar{\alpha}Nt) \quad (11)$$

上式中， $N = C/MFP$ 為聲音在空間中每秒的反射次數， $MFP = 4V/S$ 為平均自由路徑 (Mean Free Path)， V 為聲場體積， S 為聲場表面積。在空間中，聲波撞擊到邊界時，一部份的聲音會被邊界吸收，另一部份的聲音會被邊界反射，經過多次反射後，聲波會以各種不同角度持續撞擊邊界且均勻分佈於空間，此時關閉音源，可測得混響時間。根據 T_{60} 定義，聲壓位準降低 60 dB (或聲場能量密度降低 10^{-6} 倍) 所需時間，代入式 (11)：

$$\exp\left(-\frac{AC}{4V}T_{60}\right) = 10^{-6} \quad (12)$$

式 (12) 經整理，得混響時間：

$$T_{60} = \frac{24V \ln 10}{CA} = \frac{55.262V}{CA} \quad (13)$$

上式又稱為沙賓公式 (Sabine's Formula)。

艾寧公式

假設空間中的平均吸音率為 $\bar{\alpha}$ ，時間 $t = 0$ 時聲強為 I_0 ，當聲音經過 n 次反射後，聲強可表示為：

$$I_n = (1 - \bar{\alpha})I_{n-1} = (1 - \bar{\alpha})^n I_0 \quad (14)$$

根據 T_{60} 定義，聲壓位準降低 60 dB (或聲場能量密度降低 10^{-6} 倍) 所需時間，代入式 (14)：

$$(1 - \bar{\alpha})^n I_0 = 10^{-6} I_0 \quad (15)$$

$$n = \frac{-6 \ln 10}{\ln (1 - \bar{\alpha})} \quad (16)$$

則混響時間：

$$T_{60} = \frac{n}{N} = \frac{-55.262V}{CS \ln (1 - \bar{\alpha})} \quad (17)$$

上式又稱為艾寧公式 (Eyring's Formula)。

平均吸音率估算

材料之平均吸音率可透過混響時間進行估測，假設 T_{60}^I 代表空環境下的混響時間， T_{60}^{II} 代表環境加入吸音材料後的混響時間，當待測聲場邊界的平均吸音率很低時 ($\bar{\alpha} < 0.2$)，可使用式 (13) 之沙賓公式估算材料的平均吸音率，表示如下：

$$\bar{\alpha}_M = \frac{55.262V}{CS_M} \left(\frac{1}{T_{60}^{II}} - \frac{1}{T_{60}^I} \right) \quad (18)$$

上式中， S_M 為吸音材料的表面積。當待測聲場邊界具又一定吸音率時，則需要考慮邊界二次以上反射吸音所造成的影響，聲場邊界的平均吸音可使用式 (17) 之艾寧公式進行估算，表示如下：

$$\bar{\alpha}_B = 1 - \exp\left(\frac{-55.262V}{CS_B T_{60}^I}\right) \quad (19)$$

上式中， S_B 為聲場的表面積。材料之平均吸音率可使用 Milington-Sette 公式進行估算，表示如下：

$$T_{60}^{II} = \frac{-55.262V}{C[S_B \ln (1 - \bar{\alpha}_B) + S_M \ln (1 - \bar{\alpha}_M)]} \quad (20)$$

$$\bar{\alpha}_M = 1 - \exp\left(\frac{A^{II} - A^I}{S_M}\right) \quad (21)$$

其中

$$A^I = S_B \ln (1 - \bar{\alpha}_B) = \frac{-55.262V}{CT_{60}^I} \quad (22)$$

$$A^{II} = \frac{-55.262V}{CT_{60}^{II}} \quad (23)$$

訊號處理分析

聲壓位準

水聽器可接收水下聲波所產生的微小壓力變化，通常取一定週期內的均方根值 (Root mean square, RMS) 來量化聲壓大小，表示如下：

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (24)$$

上式中， $p(t)$ 為水聽器接收訊號， T 為週期時間長度。對聲壓均方根值進行對數運算，聲壓位準 (Sound pressure level, SPL) 定義如下：

$$\text{SPL} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right) \quad (25)$$

上式中， P_{ref} 為參考聲壓，空氣中定義為 2×10^{-5} (Pa)，水中定義為 1×10^{-6} (Pa)，聲壓位準之單位為 dB。

最小平方法

經由噪音中斷法測量聲場的混響衰減聲壓訊號，再透過聲壓位準計算，並參考衰減曲線擷取法則，擷取低於音源強度 5 dB，作為衰減曲線的初始值 (SPL_0)，並設定高於背景噪音 10 dB 作為衰減曲線的終點 (SPL_N)，即可獲得混響衰減曲線，如圖 2(a) 所示。假設聲強呈指數衰減，聲強與時間關係可表示成：

$$I(t) = I_0 \times e^{-\tau t} \quad (26)$$

上式中， $I = P_{RMS}^2$ ， τ 為衰減曲線斜率。對式 (26) 進行對數運算，得：

$$10 \times \log_{10} \left(\frac{I(t)}{I_{ref}} \right) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{I_0 \times e^{-\tau t}}{I_{ref}} \right) \quad (27)$$

或

$$\text{SPL}(t) = \text{SPL}_0 - 10\tau t \times \log_{10}(e^\tau) \quad (28)$$

其中， $\text{SPL}_0 = 10 \times \log_{10}(I_0/I_{ref}) = 20 \times \log_{10}(P_0/P_{ref})$ 。

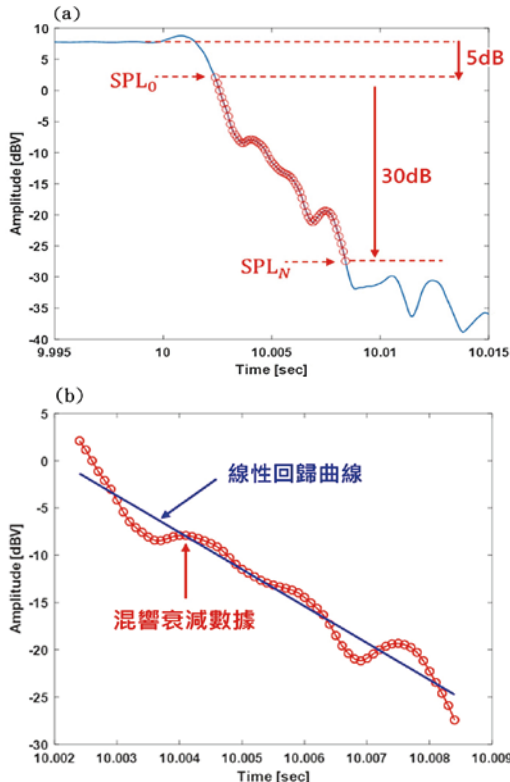


圖 2 最小平方法示意圖：(a) 混響衰減數據擷取；(b) 混響衰減曲線擬合

實際量測之混響衰減曲線可以向量與矩陣形式表示：

$$\begin{Bmatrix} \text{SPL}_0 \\ \vdots \\ \text{SPL}_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 10t_0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 10t_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{SPL}_0 \\ \log_{10}(e^\tau) \end{Bmatrix} \quad (29)$$

或

$$\{\text{SPL}\} = [\mathbf{T}]\{\mathbf{X}\} \quad (30)$$

當向量 $\{\text{SPL}\}$ 與矩陣 $[\mathbf{T}]$ 為已知時，可利用最小平方法 (Least squares method, LSM) 對混響衰減曲線進行線性回歸曲線擬合，如圖 2(B)，表示如下：

$$\{\mathbf{x}\} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ x_1 \end{Bmatrix} = ([\mathbf{T}]^T [\mathbf{T}])^{-1} [\mathbf{T}]^T \{\text{SPL}\} \quad (31)$$

則混響衰減時間，計算如下：

$$T_{60} = 6 \ln(10/\tau) \quad (33)$$

上式中，衰減曲線斜率 $\tau = \ln(10^{x_1})$ 。

脈衝響應積分

當聲場的聲音強度呈指數衰減，表示聲場的脈衝響應亦為指數衰減，考慮實際量測之脈衝響應序列包含雜訊，定義如下：

$$h(s) = h_i(s) + n(s) \quad (34)$$

上式中， $h_i(s)$ 為理想脈衝響應函數，為 $n(s)$ 雜訊。定義離算化衰減函數如下：

$$D(t_k) = \sum_{s=t_k}^L h^2(s) \quad (35)$$

上式中， t_k 代表離散時間，單位離散時間 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 可以盡量小已獲得精確的衰減函數，但不可小於取樣率分之一 ($1/F_s$)， L 代表積分長度且必須足夠長，確保 $h(L)$ 中混響脈衝能量可以被雜訊能量所覆蓋。對式 (35) 進行正規化處理^[4]：

$$d(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{s=t_k}^L h^2(s) = 1 - \sum_{s=0}^{t_k} h^2(s) \quad (36)$$

其中

$$N = \sum_{s=0}^L h^2(s) \quad (37)$$

將式 (34) 代入式 (36)，並假設 $h_i(s)$ 與 $n(s)$ 為統計不相關，得：

$$d(t_k) \approx \frac{1}{N} \sum_{s=t_k}^L h_i^2(s) + \frac{\overline{n^2}}{N} (L - t_k) \quad (38)$$

上式中，等號右邊第一項對應於理想脈衝響應函數之衰減函數，可由以下模型表示：

$$f_1(t_k) = a_1 \exp(-a_2 t_k) \quad (39)$$

式(38)，等號右邊第二項為線性遞減的雜訊功率函數模型：

$$f_2(t_k) = a_3 (L - t_k) \quad (40)$$

將式(39)、(40)代入式(38)，衰減函數可表示為一個非線性函數：

$$F(a, t_k) = a_1 \exp(-a_2 t_k) + a_3 (L - t_k) \quad (41)$$

上式中， $0 \leq t_k \leq L$ ， $a = \{a_1, a_2, a_3\}$ 。式(41)之非線性函數可利用 MATLAB 軟體中的非線性最小平方方法套件 (lsqnonlin) 進行求解，脈衝響應積分流程如圖 3 所示。根據式(33)定義，混響時間可由下式計算：

$$T_{60} = 6 \ln(0/a_2) = 13.8/a_2 \quad (42)$$

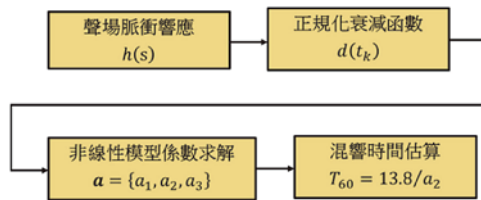


圖 3 脈衝響應積分流程圖

最大長度序列

最大長度序列 (Maximum length sequence, MLS) 屬於一種偽隨機的週期序列訊號，由於其具有自相關函數近似於脈衝函數的性質，因此經常被使用於系統模型鑑別。本研究選擇 MLS 作為音源輸出訊號，通過將麥克風接收訊號與 MLS 進行交相關運算 (Cross-Correlation)，即可獲得聲場脈衝響應，如圖 4(a) 所示，優點是 MLS 具有規律公式，有利於重複性實驗，以降低背景雜訊對於量測的影響。考慮一多項式運算：

$$P(z) = z^n + b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0 \quad (43)$$

MLS 可由以下遞迴公式計算得出：

$$s_{k+n} = a_{n-1}s_{k+n-1} + \dots + a_0s_k \quad (44)$$

例如，使用多項式 $x^3 + x + 1$ 為基礎，則遞迴公式為 $s_{k+3} = s_{k+1} + s_k$ ，並生成以下序列：

$$\{1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, \dots\} \quad (45)$$

應用於音訊處理，0 和 1 的二進制狀態將變更為 ± 1 ，將 0 用 1 取代、1 用 -1 取代，就能得到一段週期長度為 7 的 MLS 訊號：

$$s(t) = \{-1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, \dots\} \quad (46)$$

指數正弦掃頻序列

指數正弦掃頻序列 (Exponential swept-sin, ESS) 屬於一種頻率調變訊號，通常設計在一定頻寬範圍內，由低頻逐漸往高頻增加的正弦波，由於有規律公式，因此有利於重複性實驗。此外，ESS 較 MLS 具有更佳的雜訊比與非線性抑制能力，脈衝函數計算流程如圖 4(b) 所示。ESS 定義如下：

$$\begin{aligned} s(t) &= \sin \left[2\pi f_1 \int_0^t \exp \left(\frac{t'}{L} \right) dt' \right] \\ &= \sin \left\{ 2\pi f_1 K \left[\exp \left(\frac{t}{K} \right) - 1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (47)$$

上式中， f_1 為 $t = 0$ 時的起始頻率、 K 為頻率指數增加率。根據瞬時頻率 (Instantaneous frequency) 與群延遲時間 (Group delay time) 定義：

$$\begin{aligned} f_i(t) &= f_1 \exp \left(\frac{t}{K} \right) \\ t_f(f) &= K \log \left(\frac{f_i}{f_1} \right) \end{aligned} \quad (48)$$

假設起始頻率 f_1 與結束頻率 f_2 間的時間長度為 T ，根據式(48)，得：

$$\begin{aligned} T &= K \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \\ K &= T / \log \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

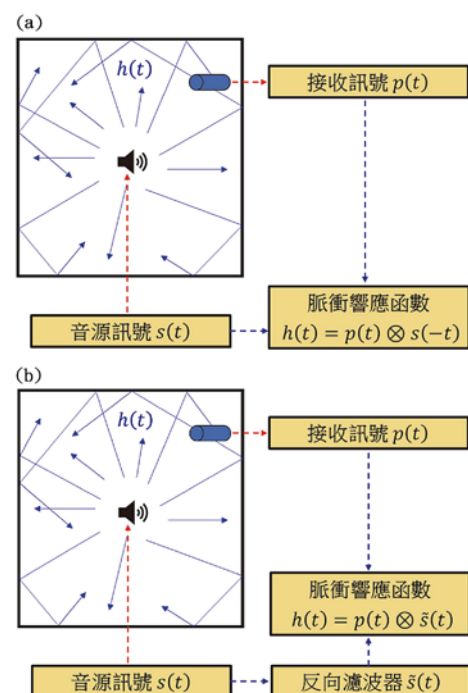


圖 4 脈衝響應計算流程：(a) MLS 訊號；(b) ESS 訊號

參考文獻^[5]，ESS 的反向濾波器可表示為：

$$\tilde{s}(t) = \frac{f_1}{K} \exp\left(-\frac{t}{K}\right) s(-t) \quad (50)$$

數位帶通濾波器設計

由於 MLS 與 ESS 訊號皆屬於寬頻訊號，所求解得到的脈衝響應函數亦為寬頻下的聲場反應，若要了解特定頻寬下的混響時間，則需針對寬頻脈衝響應進行濾波處理。本研究使用數位帶通濾波器進行處理，以下簡述數位濾波器原理，理想低通濾波器之頻率響應定義如下：

$$H(\omega)_{\text{low-pass}} = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (51)$$

上式中， ω_c 為頻率上限。式 (51) 經由反傅立葉轉換 (Inverse Fourier transform, IFT)，可得到理想低通濾波器：

$$h(t)_{\text{low}} = \frac{\omega_c}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_c}{\pi} t\right) \quad (52)$$

帶通濾波器可由兩個不同頻率之低通濾波器相減獲得：

$$h(t)_{\text{band}} = \frac{\omega_2}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_2}{\pi} t\right) - \frac{\omega_1}{\pi} \times \text{sinc}\left(\frac{\omega_1}{\pi} t\right) \quad (53)$$

上式中， ω_1 為頻率下限， ω_2 為頻率上限。本研究參考三分之一八度音階 (One third octave band) 進行帶通濾波器的頻率上、下限設定，頻率上、下限與中心頻率定義如下：

$$f_c = 2^{\frac{1}{6}} \times f_{\min} = 2^{-\frac{1}{6}} \times f_{\max} \quad (54)$$

例如，中心頻率 $f_c = 125$ Hz，則頻率上限 $f_{\max} = 140.6$ Hz，則頻率下限 $f_{\min} = 111.6$ Hz。

混響聲學實驗

本實驗分別使用單頻弦波、MLS 訊號應用於噪音中斷法，以及 MLS、ESS 訊號應用於脈衝響應積分法，比較不同實驗聲源訊號、實驗方法上的差異。實驗將先於空氣中進行量測與驗證，確認實驗方法可行性後，再於水中環境進行試驗。空氣中，實驗場景包括：一般教室、大型演講堂，聲源頻率涵蓋 125 Hz ~ 12,500 Hz，實驗過程與結果詳述如下。

一般教室

實驗於長 5.7 公尺、寬 5.6 公尺、高 2.7 公尺的一般教室中進行實驗，共架設 9 支麥克風，麥克風擺放

位置於實際課程之同學坐位，各麥克風左右距離 2 公尺、前後相距 1.5 公尺、距離地面 1.3 公尺，如圖 5、圖 6 所示。本實驗包含兩個場景，場景一為無窗簾聲場，場景二為有窗簾聲場，預期可通過混響時間量測，評估窗簾的吸音率。

實驗結果如圖 7 所示，不同實驗聲源訊號與實驗方法，在中、高頻 (630 Hz ~ 1,250 Hz) 皆呈現出一致性，但在低頻範圍則噪音中斷法與脈衝響應積分法開始出現明顯差異，其中又以噪音中斷法之單頻訊號差異最大。可能原因在於教室空間限制，因此低頻的聲場分布主要仍由空間模態主導，與擴散聲場理論假設不符，但使用寬頻訊號 (MLS, ESS) 仍會因各模態相互干擾，降低單一模態造成的影響，因此有較準確的混響時間估算結果。

圖 8 為窗簾開啟前後之各量測方法比較，結果顯示各方法在窗簾開啟後所測得的混響時間，皆低於窗簾開啟前的混響時間，符合實際結果，僅脈衝響應積分法之 ESS 訊號於 160 Hz 及脈衝響應積分法之 MLS 訊號於 400 Hz 出現不合理的估測結果，應為低頻模態影響所導致。

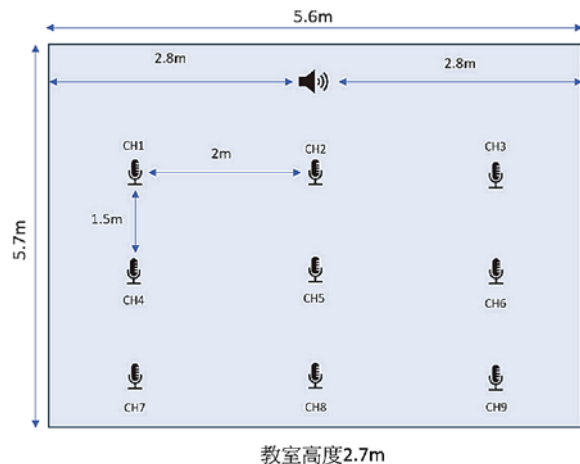


圖 5 一般教室實驗配置示意圖

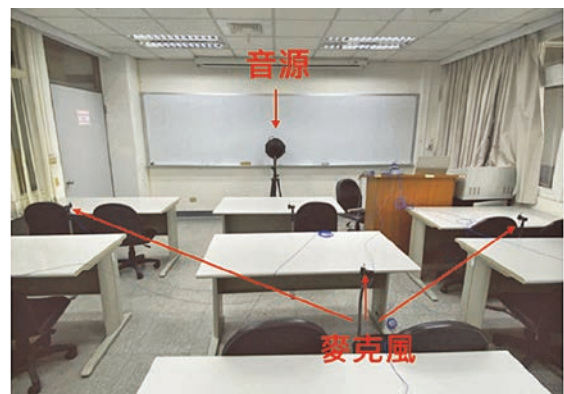


圖 6 一般教室實驗設備配置

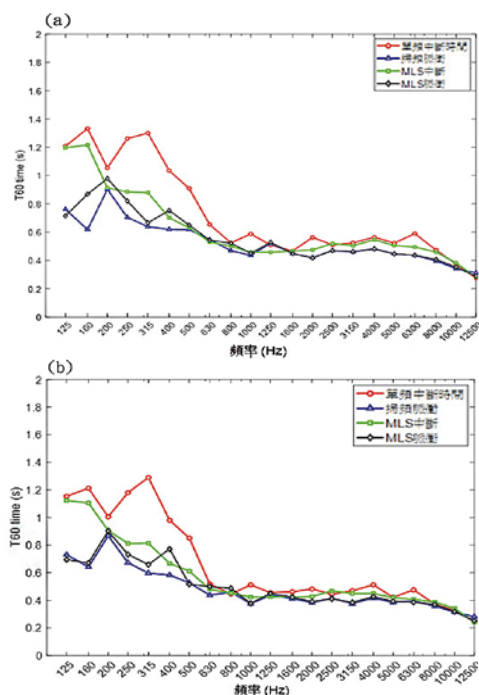


圖 7 一般教室之混響時間分析：(a) 無窗簾；(b) 有窗簾

由式 (18) 可以估算出窗簾的吸音率，如圖 9 所示。

根據 NRC 與 SAA 定義，NRC 是測量材料在 250 Hz、500 Hz、1,000 Hz、2,000 Hz 四個頻率下的平均吸音率，並已接近 0.05 的倍數表示，SAA 則是取 200 Hz ~ 2,500 Hz 共 12 個頻率下的平均吸音率，並已接近 0.01 的倍數表示。窗簾之吸音性能結果如表 1 所示，使用 NRC 時，各方法所評估的吸音率有些微差異，當使用更高標準 SAA 時，各方法結果則更為接近。

表 1 一般教室之 NRC、SAA 吸音率比較

量測方法	音源訊號	NRC	SAA
噪音中斷法	單頻	0.10	0.13
	MLS	0.10	0.11
脈衝響應積分法	MLS	0.20	0.14
	ESS	0.20	0.16

大型演講堂

本實驗單純量測演講堂的聲場混響狀態，實驗於長 23.5 公尺、寬 5.6 公尺、高 2.7 公尺的演講堂中進行，共架設 9 支麥克風，佈置如圖 10 和圖 11 所示。一般而言，以語音為主的環境，需要設計成較短的混響時間，以提升語言的清晰度，以音樂為主的環境，需要設計成較長的混響時間，以增加聽覺的豐富度。因此，播音室、錄音室通常設計混響時間在 0.5 秒以內，講堂、電影院則設計在 1 秒左右，音樂廳會將混響時間拉長至 1.5 秒。

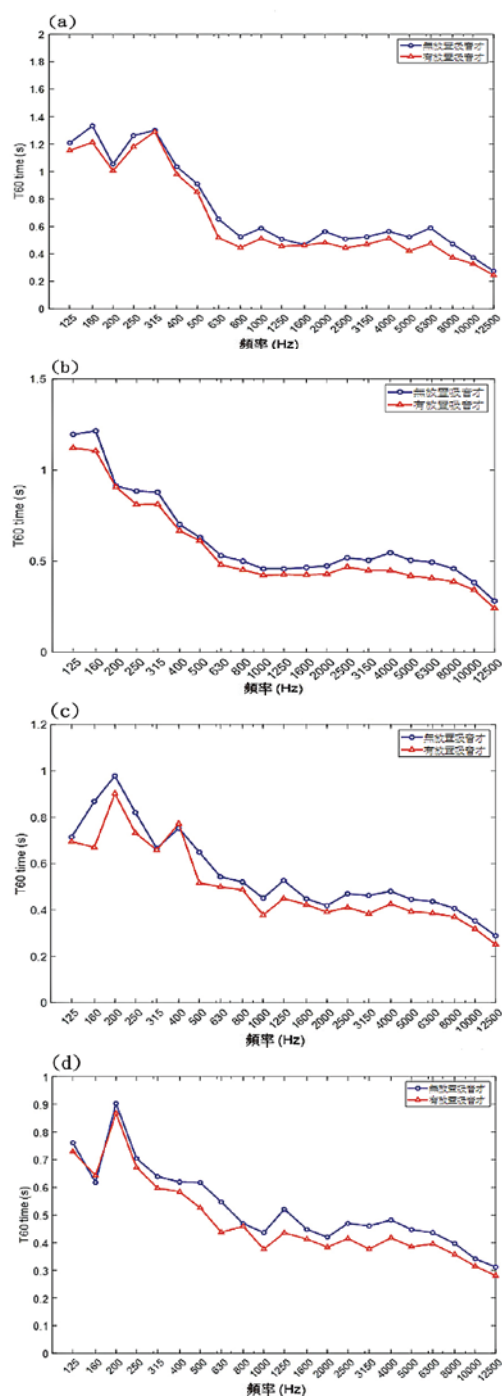


圖 8 一般教室之混響時間分析：(a) 噪音中斷法－單頻；(b) 噪音中斷法－MLS；(c) 脈衝響應積分法－MLS；(d) 脈衝響應積分法－ESS。

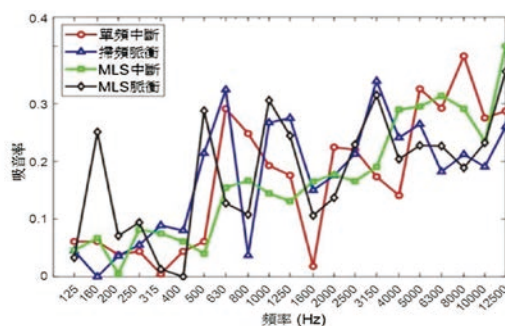


圖 9 一般教室之窗簾吸音率分析

實驗包含兩個場景，場景一為無材料聲場，場景二為有材料聲場，預期可通過混響時間量測，評估水下材料的吸音率。實驗結果如圖 16 所示，不同實驗聲源訊號與實驗方法，在 1,000 Hz ~ 10,000 Hz 皆呈現出一致性，但值得注意的是，水槽在低頻範圍 (1,000 Hz ~ 1,600 Hz) 的混響時間較低，此現象與一般認知 (混響時間隨頻率降低而增加) 有差異，需待後續進一步了解。

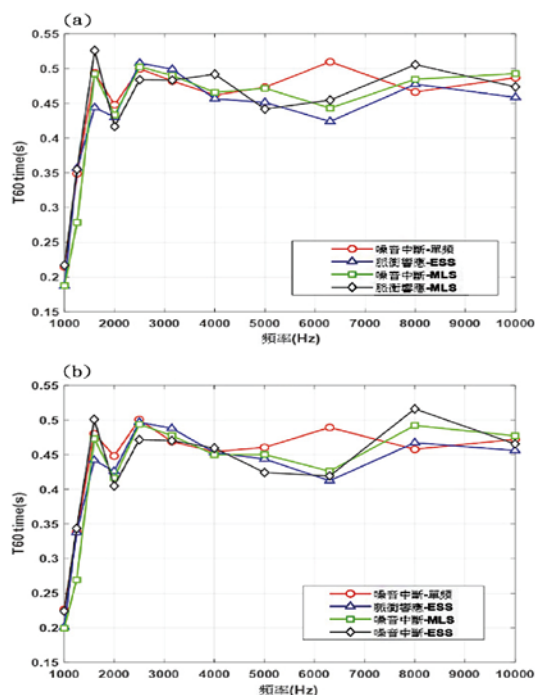


圖 16 拖航水槽之混響時間分析；(a) 無放置材料；(b) 有放置材料。

圖 17 ~ 20 為材料放置於聲場前後之各量測方法比較，圖 21 ~ 24 為混響時間差值分析，結果顯示各方法在低頻 1,000 Hz 皆呈現負的混響時間差，表示材料放置後的聲場吸音率不增反減，此為不正確的量測結果。推測原因仍與聲場模態有關，由於水中聲速較快 (約為空氣的 4.4 倍)，水中 1,000 Hz 與空氣中 226 Hz 的聲波具有相同波長，因此該現象符合一般教室的實驗結果。此外，噪音中斷法-單頻訊號 (2,000 Hz / 2,500 Hz)、噪音中斷法-MLS 訊號 (8,000 Hz)、脈衝響應積分法-MLS 訊號 (8,000 Hz) 也出現負的混響時間差，而脈衝響應積分法-ESS 在 1,250 Hz ~ 10,000 Hz 皆呈現正的混響時間差，較其他三種方式具有更正確的混響時間估算結果。

本實驗使用脈衝響應積分法之 ESS 訊號估算的混響時間差值進行吸音率估算，在水槽體積聲速材料表面積已知條件下，可利用式 (19)-(23) 估算材料吸音率，結果如圖 25 所示。

結論

本研究針對單頻、最大長度序列 (MLS) 應用於噪音中斷法，以及 MLS、指數掃頻序列 (ESS) 應用於脈衝響應積分法，於一般教室、大型演講堂等環境中進行混響衰減估測分析，研究中除了於空氣環境中進行實驗，更進一步應用於水中混響時間估測與水下材料吸音率量測，水下實驗於成大系統拖航水槽中進行。

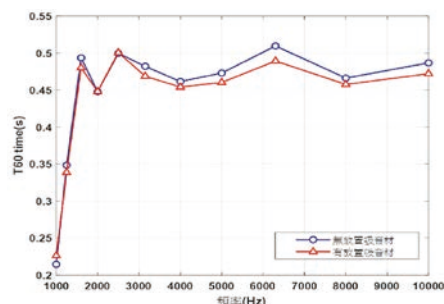


圖 17 水槽之混響時間分析
(噪音中斷法-單頻)

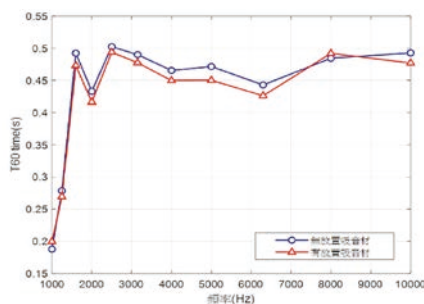


圖 18 水槽之混響時間分析
(噪音中斷法-MLS)

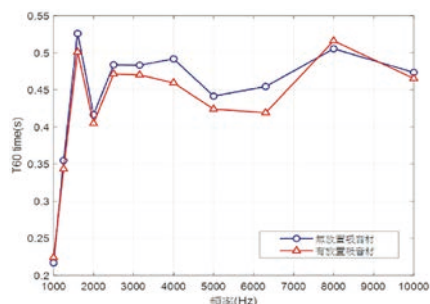


圖 19 水槽之混響時間分析
(脈衝響應積分法-MLS)

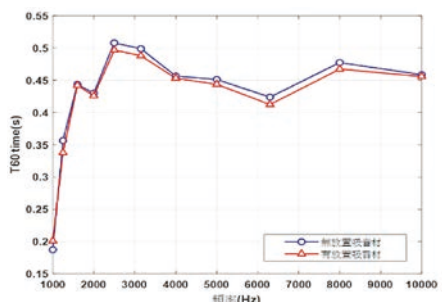


圖 20 水槽之混響時間分析
(脈衝響應積分法-ESS)

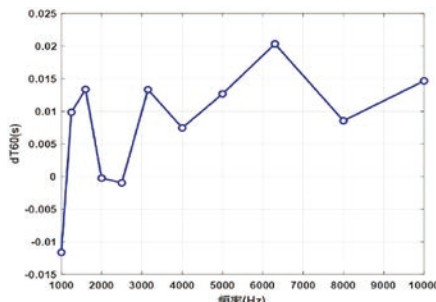


圖 21 水槽之混響時間差值分析
(噪音中斷法-單頻)

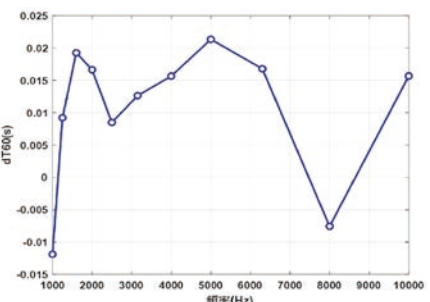


圖 22 水槽之混響時間差值分析
(噪音中斷法-MLS)

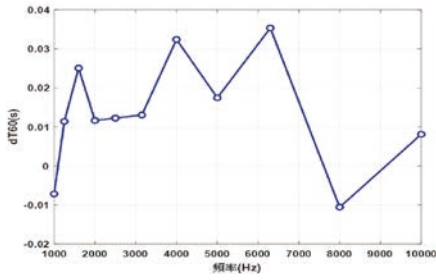


圖 23 水槽之混響時間差值分析
(脈衝響應積分法-MLS)

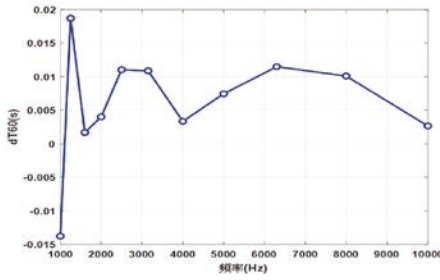


圖 24 水槽之混響時間差值分析
(脈衝響應積分法-ESS)

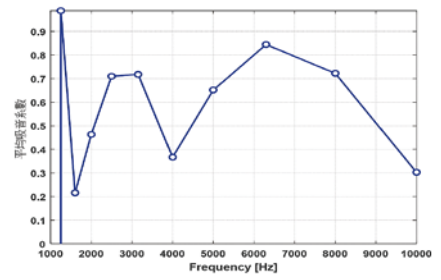


圖 25 水槽之材料吸音率估算
(脈衝響應積分法-ESS)

根據空氣實驗結果，量測環境空間需足夠大，各種方法的混響時間估測結果才能具有良好的一致性，當空間較小時，估測結果容易受聲場模態所影響，其中又以單頻訊號受影響的程度最大，寬頻訊號（MLS, ESS）則因各頻率間的模態相互抵銷，以至於受影響程度較小，因此實驗建議使用寬頻訊號，可維持實驗結果的準確性並縮短量測時間。

根據水槽實驗結果，同樣呈現寬頻訊號具有較佳的估測準確性，此外，根據混響時間差值與材料吸音率估算結果，又以脈衝響應積分法結合 ESS 具有最佳的量測結果。因此，本研究建議使用脈衝響應積分法與 ESS 音源訊號，作為空氣、水下之混響時間量測方法。

參考文獻

1. Massimo Viscardi, Maurizio Arena, "Determination of the Reverberation Time Using the Measurement of Sound Decay Curves," *Appl. Sci.*, **13**(15), 8607 (2023).
2. Ning Xiang, "Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach," *J. Acoust. Soc. Am.* **98**, 2112-2121 (1995).
3. P.Guidorzi, L. Barbaresi, D. D'Orazio, M. Garai, "Impulse Responses Measured with MLS or Swept-Sine Signals Applied to Architectural Acoustics: An In-depth Analysis of the Two Methods and Some Case Studies of Measurements Inside Theaters," *Energy Procedia*, **78**, 1611-1616 (2015).
4. W.T.Chu, "Comparison of reverberation measurements. using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method" *J. Acoust. Soc. Am.* **63**, 1444-1450 (1978).
5. Antonin Novak, Laurent Simon, Frantisek Kadlec, Pierrick Lotton "Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal," *IEEE*, **59**, 2220-2229 (2009).



GTI TEAM

巨廷工程顧問股份有限公司

G T International

監造服務作業
文宣及動畫製作
工程可行性規劃
總顧問及諮詢服務
工程基本及細部設計
技術轉移及教育訓練
計畫許可申請及審查資料
研討會/座談會/工作坊

關於巨廷

台北公司

台北市中山區南京東路三段
215號2樓
(02)8712-8966

台中公司

台中市西屯區大墩十九街
186號2樓之1
(04)2328-3866

服務
領域

防災預警
水質處理
水文技術
設施營運

管路系統
綜合治水
施工管理
河道治理

永續水庫
防洪排水
海綿城市
水力發電

環境影響
水資源規劃
水環境營造
集水區治理