

# 應用脈衝響應積分法於環境混響衰減估測研究

陳冠宇\*<sup>1</sup> 吳柏賢\*

\*國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

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

## 摘要

混響時間是指聲音強度由初始強度下降60dB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，並於大型演講堂、一般教室等環境中進行混響衰減估測分析，並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。本研究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，實驗於成大系統系拖航水槽中進行，結果顯示出各方法對於估測混響時間的一致性，但使用寬頻訊號能更有效率的縮短量測時間，並維持實驗結果的準確性。

<sup>1</sup> 聯絡作者 名字(author@sample.com.tw)

## 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污染問題，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污染問題需要得到重視。評估一個空間受到噪音污染的程度，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60dB所需的時間，為了控制室內空間的混響時間避免空間的混響時間過長而造成人們生活品質的影響，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。混響時間的測量過程中，最重要的部份是要先分析出聲音強度的衰減曲線，根據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]為是計算當音源關閉時，聲音強度下降60dB所經歷的時間，因為音源在關閉時容易伴隨著一段脈衝訊號，所以通常會取低於音源強度5dB，作為衰減曲線的初始值，取高於背景噪音10dB的點當作衰減曲線的終點，避免因為背景噪音影響結果，初始點連接到終點的部分即為聲音衰減曲線，不過在實際情形下，音源要產生高於背景噪音60dB以上的聲音，是比較難達成的，通常會計算 $T_{20}$ 或 $T_{30}$ 來推估 $T_{60}$ 。獲得衰減曲線後，可透過衰減曲線斜率分析混響時間。

另一種基於噪音中斷法而有所變化的方法稱為六點法[1]，和傳統噪音中斷法擷取衰減曲線的方式相同，不一樣的地方在於整條衰減曲線只挑選出前3個點及最後3個點總共6個點進行分析，匯集各筆資料、各通道內的6點衰減資訊，可擬合成衰減曲線斜率，進一步得出混響時間。優點是可以一次處理全部資料，分析數據較方便且快速。實驗可使用單頻或寬頻訊號應用於此方法之中。

脈衝響應積分法[2]，是藉由分析脈衝響應來描述系統的聲學性質，如房間的混響時間和清晰度參數等等在一個線性時不變系統(LTI)的性質可以完全被脈衝響應給定義，對於任何輸入，系統的輸出訊號 $y(t)$ 都可以根據輸入訊號 $x(t)$ 和脈衝響應 $h(t)$ 通過捲積的方式來計算出來，其中 $y(t)$ 代表麥克風接收到的訊號、 $x(t)$ 代表喇叭發出的訊號，想要對於一個LTI系統進行數據化量測，最好的方式是加入一個理想脈衝系統中，但是在現實生活中是不存在一個無限窄、且無限高峰值的脈衝，在聲學中，較近似這種脈衝的訊號有：鼓掌聲、槍聲、氣球爆破聲等等，但這些訊號在低頻上有缺失且每次量測到的訊號重複性較低，因此並不適合，採用了最大長度序列(MLS)訊號，此種訊號其自相關函數近似為脈衝訊號，用音源發出MLS訊號，並使用麥克風接收訊號，接收到的訊號就是MLS訊號和空間中的脈衝響應的捲積，整理可得，將輸出訊號 $y(t)$ 和時間反轉後的輸入訊號 $x(-t)$ 兩者進行捲積運算，即可獲得

系統的脈衝響應 $h$ ，另一種訊號指數掃頻訊號也能使用類似的作法獲得脈衝響應 $h$ ，在實驗訊號理論的章節中會做更詳細的介紹，為在一定的頻段範圍內頻率逐漸變高的正弦波，優點是更好的訊號雜訊比(SNR)和強大的非線性抑制能力[3]。

得到脈衝響應的值之後，將脈衝響應做積分處理後會得到一條由非線性的脈衝響應積分及線性的雜訊所組成的衰減曲線，整條衰減曲線變成非線性的型態，使用非線性回歸的方式，擬合成非線性回歸曲線，計算出非線性回歸曲線的斜率，就能進一步分析出混響時間。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。

利用上述介紹的兩者方法量測有吸音材料及空房間的混響時間，藉由這兩者的混響時間能進一步分析出材料的吸音率。吸音率是一個介於0到1之間的數值，當吸音率為0時，代表聲音能量經過材料時完全被反射，相反的當吸音率為1時，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。材料的吸音率會因為頻率的相同而改變，通常會利用材料的噪音減少係數NRC(Noise Reduction Coefficient)及吸音平均值SAA(Sound Absorption Average)來評估材料吸音性能，噪音減少係數(NRC)主要是測量材料在250HZ、500HZ、1000HZ、2000HZ四個頻率的吸音率做算術平均所得出，並已接近0.05的倍數表示，而吸音平均值(SAA)是比噪音減少係數有更高標準的方法，由所測量的頻率中以200HZ到2500HZ中選擇出12個不同的頻率並四捨五入到0.01表示。

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，並於大型演講堂、一般教室及混響室等環境中進行混響衰減估測分析，並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。本研究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，實驗於成大系統系拖航水槽中進行。

## 聲學理論

### 1. 擴散聲場模型

假設高頻聲波模態現象較不明顯，可將聲波視為聲線，聲線經過多次的反射及透射後，聲場達到穩定狀態，即聲場內的任意點能量密度幾乎相同，且任一聲線傳遞至各方向的機率幾乎一樣，稱此狀態為擴散聲場或迴響聲場。令空間中微小能量體積為 $dV$ ，如圖1所示，以球座標 $(r, \theta, \phi)$ 表示，得到微小的能量體積 $dV$ 可表示為：

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

以法線角度 $\theta$ 入射到邊界微小面積 $\Delta S$ ，假設聲場能量密度為 $\epsilon$ ，則面積 $\Delta S$ 收到的能量為：

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

考慮半球體內，所有能量入射到面積 $\Delta S$ 的能量總和為：

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

可得知單位時間入射到單位面積邊界上的能量(隨機入射聲強)為：

$$I_r = \frac{1}{\Delta S} \cdot \frac{dE}{dt} = \frac{ec}{4} \quad (4)$$

單位時間內，空間邊界上吸收到的總能量為：

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

其中 $A$ 為總吸音量 $A = \bar{\alpha}S$ 、 $\bar{\alpha}$ 為平均吸音率，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：

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

其中 $\frac{d\varepsilon}{dt}$ 為單位時間增加的能量、 $A$ 為單位時間吸收的能量、 $W$ 為產生的能量，假設聲源於 $t = 0$ 時開啟：

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

擴散聲場的解為：

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

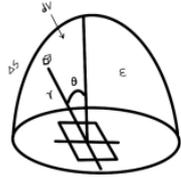


圖1、擴散聲場中微小能量與吸收面示意圖  
當擴散聲場達穩態時：

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

假設聲源於 $t = 0$ 時關閉：

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

擴散聲場的解為：

$$\varepsilon(t) = \frac{W}{Ac} e^{-\frac{Ac}{4V}t} \quad (11)$$

其中平均自由路徑(Mean Free Path):

$$MFP = \frac{4V}{S} \quad (12)$$

根據 $T_{60}$ 定義，聲壓位準降低60dB，聲場能量密度降低 $10^{-6}$ 倍

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

上式又稱為沙賓公式(Sabine's Formula)。

## 2. 艾寧公式(Eyring's Formula)

聲音在矩形空間中，每秒的反射次數為：

$$N = \frac{c}{MFP} = \frac{cS}{4V} \quad (14)$$

其中 $c$ 為聲速，假設空間中的平均吸音率為 $\alpha$ 及時間 $t = 0$ 的聲強為 $I_0$ ，當聲音經過 $n$ 次反射後，聲強可表示為：

$$I_n = (1 - \alpha)I_{n-1} = (1 - \alpha)^n I_0 \quad (15)$$

根據 $T_{60}$ 定義，聲音經過 $n$ 次反射後，聲壓值降低60dB，聲強值降低 $10^{-6}$ 倍

$$I_n = (1 - \alpha)^n I_0 = 10^{-6} I_0 \quad (16)$$

經過整理後可得：

$$n = \frac{-6 \ln 10}{\ln(1-\alpha)} \quad (17)$$

聲音經過 $n$ 次反射後，所需花費的時間：

$$T_{60} = \frac{n}{N} = \frac{-55.3V}{cS \ln(1-\alpha)} \quad (18)$$

其中 $N$ 為每秒的反射次數

## 3. 吸音率估算

測有吸音材料及空房間的混響時間，利用這兩者的混響時間進一步分析出材料的吸音率

$$T_{60}_1 = \frac{55.3V}{cA}, T_{60}_2 = \frac{55.3V}{c(A+\delta A)} \quad (19)$$

$$\delta A = \alpha S \quad (20)$$

其中 $V$ 代表混響室容積( $m^3$ )、 $A$ 代表混響室總吸音量、 $\delta A$ 代表材料的吸音、 $S$ 代表吸音材表面積、 $T_{60}_1$ 代表空房間時的混響時間、 $T_{60}_2$ 代表放置吸音材後的混響時間，由上兩式可得：

$$\alpha = \frac{\delta A}{S} = \frac{55.3V}{cS} \left( \frac{1}{T_{60}_2} - \frac{1}{T_{60}_1} \right) \quad (21)$$

## 訊號處理理論

### 1. 帶通濾波器(Band-pass filter)

將量測到的訊號經過濾波器的處理擷取需要分析的頻段，單頻訊號在濾波器的過程中，依照音源發出的頻率對應濾波器的上下限進行濾波，而MLS訊號是寬頻訊號，濾波過程為對照各頻率的上下限，把訊號一段一段的擷取下來。選擇的濾波器是使用帶通濾波器，它的優點是具有選擇性，僅允許特定頻率通過，對於其餘頻率的訊號進行抑制，能有效排除噪音的部分，而帶通濾波器的原理是由一個較大頻帶的低通濾波器減去另一個較小頻帶的低通濾波器所組成的，所以以下先進行低通濾波器的公式推導。

$$H(\omega) = \{1 \mid \omega \leq \omega_c \mid \omega > \omega_c \quad (22)$$

理想的低通濾波器可表示成式(25)，經過傅立葉反轉換可得：

$$h(t) = \frac{\omega_c}{\pi} \times \text{sinc} \left( \frac{\omega_c}{\pi} t \right) \quad (23)$$

帶通濾波器即可表示為：

$$h(t) = 2[f_2 \times \text{sinc}(2f_2 t) - f_1 \times \text{sinc}(2f_1 t)] \quad (24)$$

其中 $f_1$ 為上限頻率、 $f_2$ 為下限頻率，各頻帶的中心頻率 $f_c$ ，可由該頻帶的頻率上限及下限計算，定義為：

$$\begin{aligned} f_c &= \sqrt{2f_{min}} = \frac{f_{max}}{\sqrt{2}} \\ &= \sqrt{f_{min} \times f_{max}} \end{aligned} \quad (25)$$

而實驗所使用的是三分之一八度音，定義為：

$$2^{\frac{1}{3}} = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (26)$$

$$f_c = 2^{\frac{1}{6}} \times f_{min} = \frac{f_{max}}{2^{\frac{1}{6}}} \quad (27)$$

## 2. 聲壓為準

一般情況下，量測出的聲壓值會呈現大小及正負的變化，通常會取均方根值來量化聲壓，定義如下：

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (28)$$

強度為準可表示為：

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \quad (29)$$

因 $I = P_{rms}^2$ ，式(29)可改寫為：

$$SPL = 20 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (30)$$

其中 $P_{ref}$ 為參考聲壓

## 3. 最小平方誤差法(Least Squares Method)

使用噪音中斷法所量測訊號經過聲壓位準的轉換後，取低於音源強度5dB當作衰減曲線的初始點，取高於背景噪音10dB當作衰減曲線的終點，初始點到終點的曲線我們稱作衰減曲線，產生了衰減曲線後，就會使用本章節介紹的最小平方誤差法(LMS法)線性擬和出和衰減曲線擁有最小誤差的直線，稱之為線性回歸曲線，計算出線性回歸曲線的斜率，就能進一步分析出混響時間。

假設聲強呈指數衰減，聲強與時間關係可表示成：

$$I(t) = I_0 \times e^{-\tau t} \quad (31)$$

上式等號左右兩邊自然對數可得：

$$\ln \ln(I_t) = \ln \ln(I_0) - \tau t \quad (32)$$

以矩陣的形式可以表示為：

$$\begin{bmatrix} \ln(I_1) \\ \vdots \\ \ln(I_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -t_1 \\ \vdots \\ -t_N \end{bmatrix} \tau \quad (33)$$

矩陣可以簡化為 $Y = XA$ ， $A$ 可得：

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \rightarrow \tau = A(1, 1) \quad (34)$$

根據 $T_{60}$ 定義，聲音經過 $n$ 次反射後，聲壓值下降60dB

，聲強值下降 $10^{-6}$ 倍

$$\rightarrow T_{60} = \frac{6 \ln 10}{\tau} \quad (35)$$

其中 $\tau$ 為衰減曲線之斜率

## 3. 脈衝響應積分

將輸出訊號 $y(t)$ 和時間反轉後的輸入訊號 $x(-t)$ 兩者進行捲積運算，即可獲得系統的脈衝響應 $h$ ，接著將脈衝響應做積分處理後會得到一條由非線性的脈衝響應積分及線性的雜訊所組成的衰減曲線，整條衰減曲線變成非線性的型態，使用非線性回歸的方式，擬合出非線性回歸曲線，計算出非線性回歸曲線的斜率，就能進一步分析出混響時間。

衰減曲線可以通過平方的脈衝響應 $h(t)^2$ 從上下限為 $t$ 到無限的積分獲得：

$$D(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (36)$$

其中 $D(t)$ 為衰減函數，可近似表示為：

$$D(t_k) = \sum_{s=t_k}^L h(s)^2 \quad (37)$$

其中 $t_k$ 代表離散時間、 $L$ 代表真實響應函數 $h(s)$ 的有限長度，聲音衰減也可以用聲音累積的形式來推導：

$$d(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{s=t_k}^L h(s)^2 = 1 - \sum_{s=0}^{t_k} h(s)^2 \quad (38)$$

其中 $N$ 為比例常數，可表示為：

$$N = \sum_{s=0}^L h(s)^2 \quad (39)$$

其中 $d(t_k)$ 是標準化的衰減函數，一般情況下，脈衝響應 $h(s)$ 總是會受到背景噪音的影響，假設背景噪音為雜訊，實際的脈衝響應可視為：

$$h(s) = h_i(s) + n(s) \quad (40)$$

實際的脈衝響應可以表示為一個理想的脈衝響應 $h_i(s)$ (無雜訊)加上一個雜訊 $n(s)$ ，將上式代入式(38)，可忽略 $h_i(s)n(s)$ [4]

$$d(tk) \approx \frac{1}{N} \sum_{s=tk}^L h_i^2(s) + \frac{\tau^2}{N} (L - tk) \quad (41)$$

式(41)右邊的第一項，對應於理想實時響應函數 $h_i(s)$ 的貢獻，可以簡單地建模為：

$$f_1(tk) = x_1 e^{-x_2 tk} \quad (42)$$

當考慮的混響過程假設為指數性質時； $x_1$ 和 $x_2$ 是係數。背景噪音對應於式(41)右側的最後一項的一個分量，可以被表示為一個線性遞減的函數：

$$f_2(t_k) = x_3 (L - t_k) \quad (43)$$

因此可以建立一個系統的衰減曲線模型：

$$(x, tk) = x_1 e^{-x_2 tk} + x_3 (L - t_k) \quad (44)$$

其中 $0 \leq t_k \leq L$

其中 $x_1$ 代表振幅、 $x_2$ 代表衰減曲線之斜率，由公式(35)可得：

$$T_{60} = \frac{6 \ln 10}{x_2} \quad (45)$$

#### 4.最大長度序列MLS訊號(Maximum Length Sequence)

為一個偽隨機的週期性序列訊號，選擇MLS訊號當作脈衝響應法的音源是因為MLS訊號的自相關函數可近似為脈衝函數，且把輸入訊號做時間倒轉和輸出訊號兩者做卷積，可以獲得脈衝響應 $h$ ，利用 $h$ 可以進一步分析混響時間。訊號的優點是可以精確重複，且很方便進行多次平均，可以降低背景雜訊對測量的影響。MLS是週期性訊號，長度為 $2^n - 1$ ， $n$ 為最大長度序列的階數，階數越高，訊號的長度越長，最大長度序列可以由遞迴公式計算得出，公式可表示為：

$$s_{k+n} = a_{n-1} s_{k+n-1} + \dots + a_0 s_k \quad (46)$$

計算出的遞迴公式可表示為：

$$s_{k+3} = s_{k+1} + s_k \quad (47)$$

#### 5.指數正弦掃頻訊號(Exponential Swept-Sine Signal)

為在一定的頻段範圍內頻率逐漸變高的正弦波，優點是更好的訊號雜訊比(SNR)和強大的非線性抑制能力[3]，ESS訊號具有以下特性[5]：從輸入訊號 $s(t)$ 經過時間反轉可以得到逆濾波器 $\tilde{s}(t)$ ，使得輸出訊號 $y(t)$ 和 $\tilde{s}(t)$ 之間的捲積可以獲得脈衝響應 $h$ ，再經由脈衝響應積分即可近一步獲得混響時間。輸入的掃頻訊號可以表示為：

$$s(t) = \sin \sin \left\{ 2\pi f_1 L \left[ \exp \exp \left( \frac{t}{L} \right) - 1 \right] \right\} \quad (48)$$

其中 $f_1$ 代表初始頻率，逆濾波器 $\tilde{s}(t)$ 可表示成：

$$\tilde{s}(t) = \frac{f_1}{L} \exp \exp \left( -\frac{t}{L} \right) x(-t) \quad (49)$$

#### 實驗訊號理論

##### 1.參數設定

##### 1.1. $d_{tk}$ (步階長度)

本實驗所使用的兩種方法噪音中斷法及脈衝響應積分法的分析方式為會利用訊號長度較短的 $L$ (訊號週期長度)分析整段量測到的訊號，一段訊號週期長度分析完之後會移動一個 $d_{tk}$ (步階長度)繼續下一次的分析，如圖2，所以本章節會分別針對 $d_{tk}$ (步階長度)及 $L$ (訊號週期長度)做調整，設定出最適合的參數。

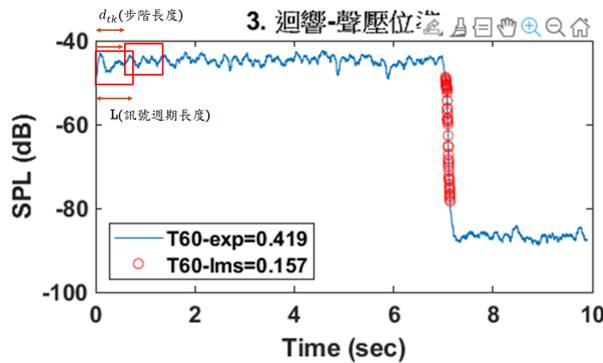


圖2、分析時 $L$ (訊號週期長度)及 $d_{tk}$ (步階長度)運作示意圖

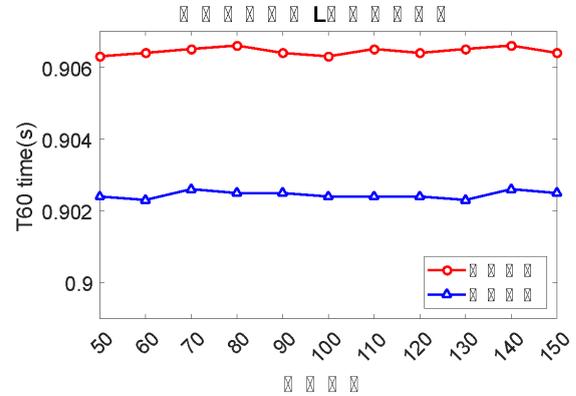


圖3、 $d_{tk}$ (步階長度)對混響時間的比較圖

首先針對 $d_{tk}$ 進行調整，調整區間為

$d_{tk} = 50, 70, 90, 100, 110, 130, 150$ (單位點數)從實驗數據圖3可得，不論是噪音中斷法或脈衝響應積分法 $d_{tk}$ 對於實驗的結影響並不大，最後是選擇

$d_{tk} = 100$ 進行分析。

##### 1.2. $L$ (訊號長度)

噪音中斷法針對 $L$ (訊號週期長度)進行調整， $L = N \times 51200$ ，其中51200為取樣頻率，調整區間為 $N = 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2$ ，從混響時間比較的話 $N$ 越小混響時間也會越小，不過差距並不大。而從分析出的標準差比較的話如圖4可以得到 $N = 0.2$ 時標準差會開始變的巨大，最後噪音中斷法是選擇 $N=0.1$ 進行分析。

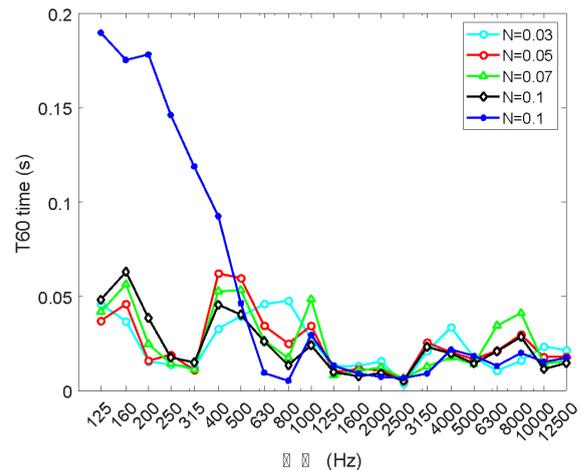


圖4、噪音中斷法各參數 $L$ (訊號長度)的標準差比較

脈衝響應積分法針對 $L$ (訊號週期長度)進行調整， $L = N \times 51200$ ，其中51200為取樣頻率，調整區間為 $N = 0.1, 0.5, 1$ ，當 $N = 0.1$ 時，從圖5可以觀察出脈

衝響應法混響時間會和噪音中斷法的結果相差巨大，當  $N = 1$  以上時，從圖8可以觀察出在低頻方面標準差會開始變的巨大，最後脈衝響應積分法是選擇  $N=0.5$  進行分析。

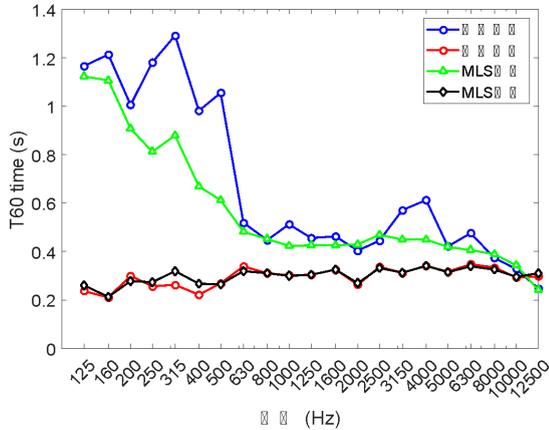


圖5、脈衝響應積分法  $N=0.1$  時和噪音中斷法混響時間比較

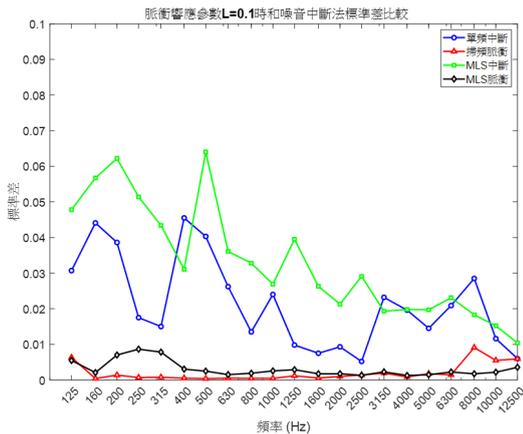


圖6、脈衝響應積分法  $N=0.1$  時和中斷法標準差比較

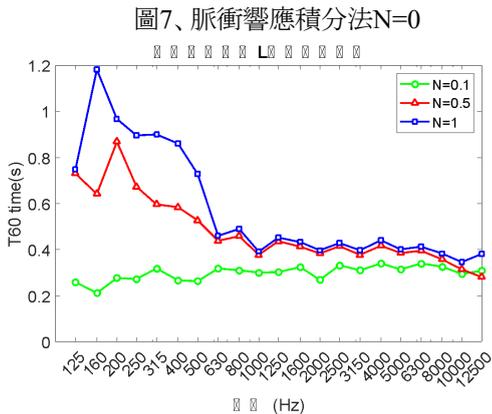


圖7、脈衝響應積分法  $N=0.1, 0.5, 1$  時混響時間比較

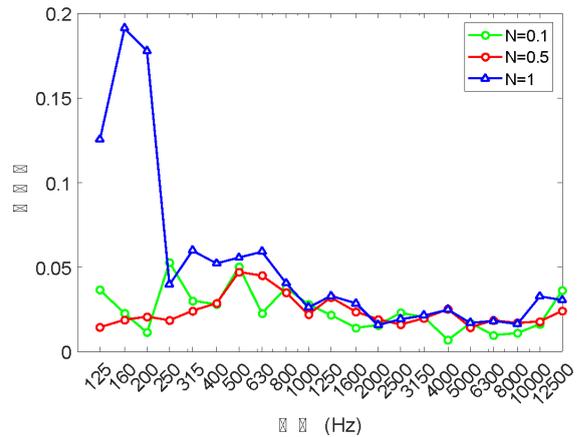


圖8、脈衝響應積分法  $N=0.1, 0.5, 1$  時標準差比較

## 2. 實驗結果

本實驗使用單頻、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，發出三分之一八度音頻率(125Hz到12500Hz)持續發出音源7秒，於大型演講堂、一般教室及混響室等環境架設9支麥克風接收10秒訊號，進行混響時間及吸音率分析實驗。本研究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，實驗於成大系統系拖航水槽中進行。

### 2.1. 一般教室

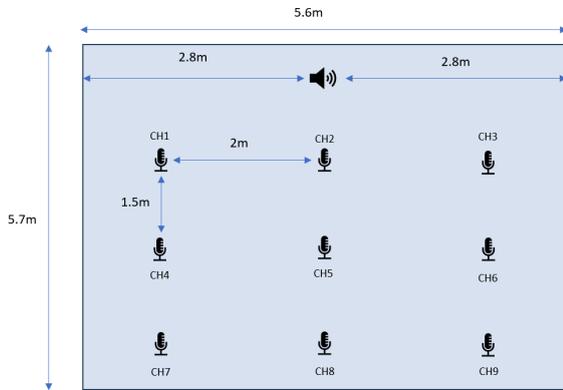
於一個長5.7公尺、寬5.6公尺、高2.7公尺的一般教室中進行實驗，麥克風總共架設9支，每支麥克風左右距離相距2公尺、前後相距1.5公尺，麥克風擺放位置模擬實際上課中同學坐位位置如圖9，實驗分為兩部分，第一部份為教室中的窗簾收起來、第二部分為教室中的窗簾拉開，經過量測有、無吸音材料的混響時間，進一步分析出吸音材料的吸音率。

從圖10、11可以看出除了單頻訊號使用噪音中斷法在低頻情況下混響時間較其他方法長之外，其餘頻率下的混響時間不管使用何種訊號或何種方法皆蠻一致的，而單頻噪音中斷法在低頻時混響時間會高於其他分析分法，原因可能是教室空間不夠大，模態造成的影響較大，而寬頻則是因為每個寬頻的模態干擾相互抵銷，以至於模態造成的影響較小，空間大小的公式可以使用下式判斷[1]。

$$l_{max} < 1.9 \times V^{\frac{1}{3}}$$

從圖12到圖15顯示出不論使用何種方法，在加入吸音材料之後，混響時間能有效縮短，並可利用加入吸音材料前後的混響時間，利用艾寧吸音率公式(21)，計算出吸音率，如表1。從表1可以看出，當吸音率使用NRC計算時，各方法的吸音率會有些差異，不過當使用更高標準的SAA計算時，各方法計算出的吸音率差異就不大。從圖16可以看出各方法計算出的吸音率大致會隨著頻率變高而變大，其中噪音減少係數(NRC)主要是測量材料在250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz 四個頻率的吸音率做算術平均所得出，並已接近0.05的倍數表示，而吸音平均值(SAA)是比噪音

減少係數有更高標準的方法，由所測量的頻率中以 200Hz到2500Hz中選擇出12個不同的頻率並四捨五入到0.01表。



教室高度2.7m

圖9、一般教室實驗佈置圖

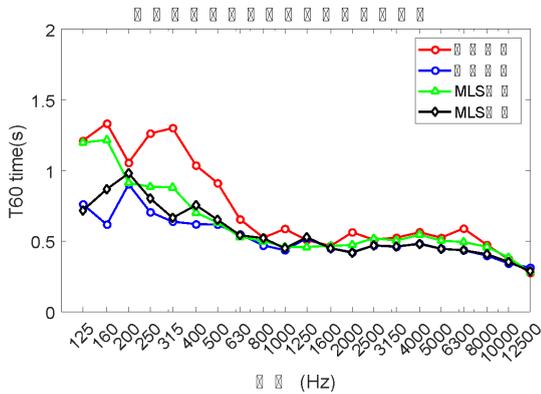


圖10一般教室未放置吸音材時各訊號、方法混響時間比較

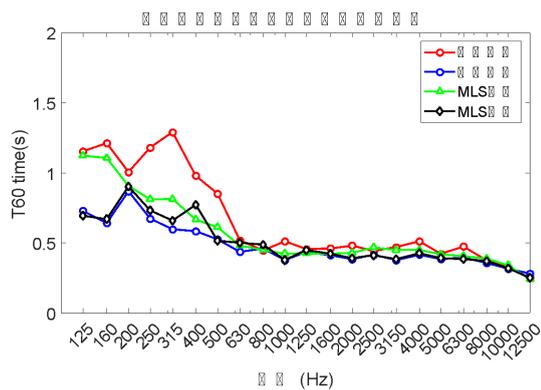


圖11一般教室放置吸音材時各訊號、方法混響時間比較

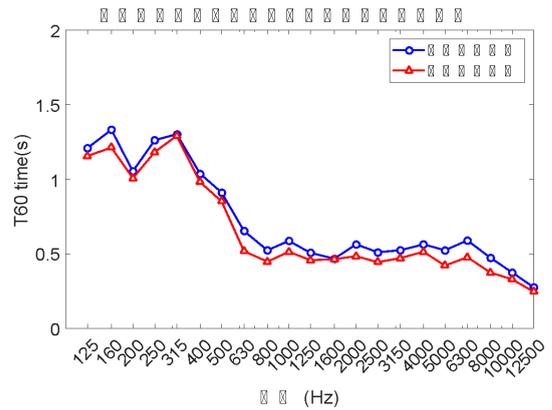


圖12、單頻訊號噪音中斷法有、無吸音材混響時間比較圖

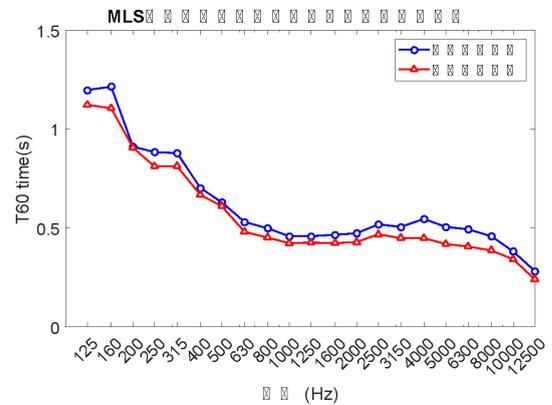


圖13、MLS訊號噪音中斷法有、無吸音材混響時間比較

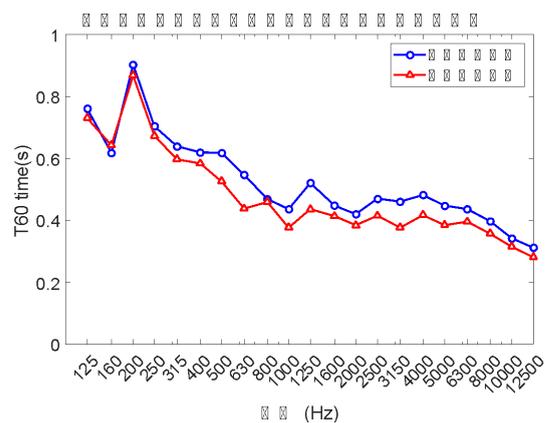


圖14、掃頻訊號脈衝響應積分法有、無吸音材混響時間比較

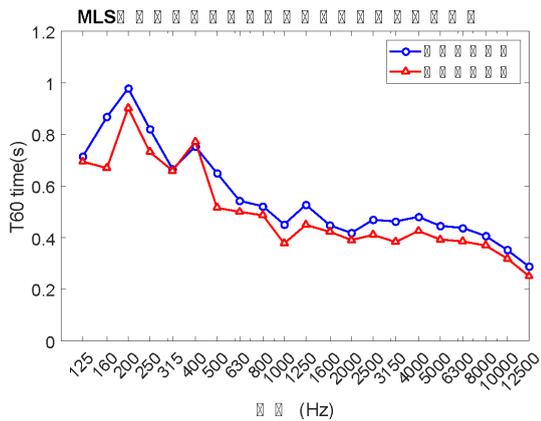


圖15、MLS訊號脈衝響應積分法有、無吸音材混響時間比較

表1、各方法使用NRC、SAA吸音率比較

	NRC	SAA
單頻中斷	0.10	0.13
掃頻脈衝	0.20	0.16
MLS中斷	0.10	0.11
MLS脈衝	0.20	0.14

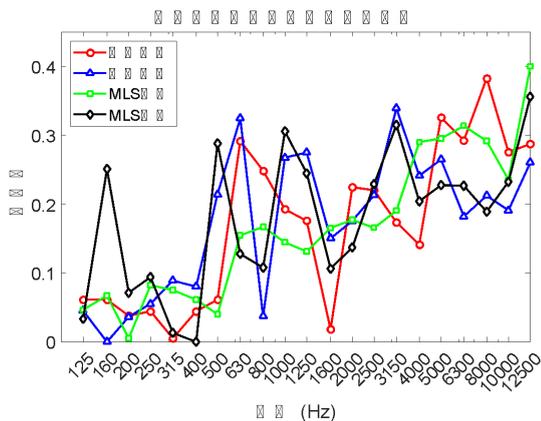


圖16、各方法在各頻率下的吸音率比較

#### 4.2.2. 大型演講堂

於一個長23.5公尺、寬5.6公尺、高2.7公尺的大型演講堂中進行實驗，麥克風總共架設9支，環境佈置如圖17。從圖18可以看出，不論使用何者方法，混響時間在各頻率下混響時間皆很一致，原因可能是因為演講堂是體積較大的房間，聲場較均勻、模態影響也較輕微，且講堂的設計在人類的說話頻率間吸音效果明顯、混響時間最短。

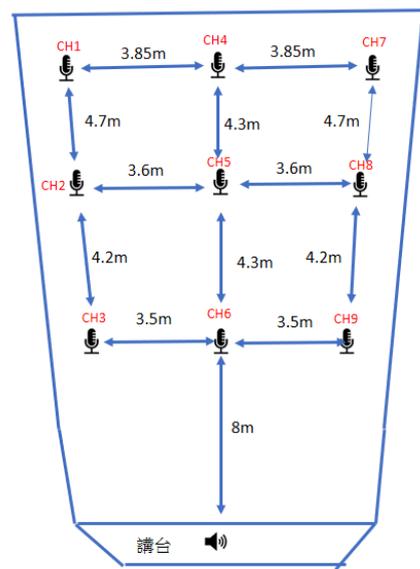


圖17、大型演講堂實驗佈置

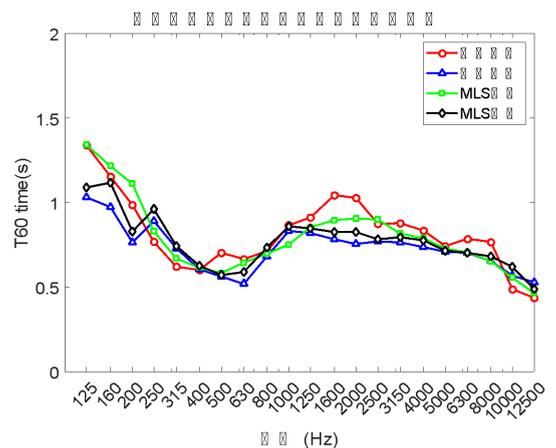


圖18、大型演講堂各訊號、方法混響時間比較

#### 結論

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，並於大型演講堂、一般教室及混響室等環境中進行混響衰減估測分析，本研究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，實驗於成大系統拖航水槽中進行，分析過程中發現，噪音中斷法在實驗時需要發出很大聲的聲源才能有效的擷取出聲音衰減曲線，可能會影響到實驗環境的周遭，而脈衝響應積分法則沒有這樣的問題。結果顯示，只要空間足夠大，各方法對於估測混響時間具有良好的一致性，若空間較小時，使用單頻訊號較容易受到模態的影響，而使用寬頻或掃頻訊號時寬頻則是因為每個頻率的模態干擾相互抵銷，以至於模態造成的影響較小，還能更有效率的縮短量測時間，並維持實驗結果的準確性，得出結論以寬頻或掃頻訊號當作音源使用脈衝響應積分法會是

最適合的選擇。空間足夠大,各方法對於估測混響時間具有良好的一致性,若空間較小時,使用單頻訊號較容易受到模態的影響,而使用寬頻或掃頻訊號時寬頻則是因為每個頻率的模態干擾相互抵銷,以至於模態造成的影響較小,還能更有效率的縮短量測時間,並維持實驗結果的準確性,得出結論以寬頻或掃頻訊號當作音源使用脈衝響應積分法會是最適合的選擇。

#### 參考文獻

1. Massimo Viscardi and 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)

# Analyze Environmental Reverberant Attenuation By Using Impulse Response Integration Method

*K. Y. Chen \* B. H. Wu \**

\* Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

*Keywords: Reverberation Time, Maximum Length Sequence, Exponential Swept-Sine Signal, Impulse Response Integration Method*

## ABSTRACT

The reverberation time refers to the time it takes for the sound intensity to decrease by 60 dB from its initial level. It is one of the key parameters for assessing the acoustic characteristics within enclosed spaces. Depending on the generation method of the sound intensity decay curve, the methods can be roughly divided into the direct measurement method of noise interruption and the indirect measurement method of impulse response integration. This paper applies single-frequency and maximum length sequence (MLS) signals to the noise interruption method, MLS and exponential sweep signals (ESS) are applied in the impulse response integration method. Conduct reverberation attenuation estimation analysis in environments such as large auditoriums, regular classrooms, and reverberation chambers. And discuss the influence of various signal processing parameters (such as signal period length, step length) on the estimation of reverberation time. In addition to conducting experiments in air environments, this study further applies to estimating reverberation time in water and measuring absorption coefficients of underwater materials. The experiments were conducted in a towing tank in Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University. The results demonstrate the consistency of each method in estimating reverberation time. The use of broadband signals can effectively shorten the measurement time while maintaining the accuracy of the experimental result.