

進修出國報告

美國海軍研究院 博士進修報告

服務機關：海軍軍官學校

姓名職稱：少校教師譚子偉

派赴國家：美國

出國期間：民國 104 年 12 月至 108 年 12 月

報告日期：108 年 12 月 30 日

目次

目的暨研究摘要	3
過程：期刊著作及研討會發表	4
運用水下噪音干涉及時間扭換操作因子探測美國佛羅里達海灣底質.....5	
1. 傾聽噪音，被動接收信號	5
2. 噪音交叉相關函數 (Noise Cross-Correlation Function)	7
3. 時間扭換 (Time Warping)	9
4. 環境反演 (Geoacoustic Inversion)	13
心得及建議	15
參考文獻	16

目的暨研究摘要

職於 108 年 12 月奉派至美國海軍研究院 (Naval Postgraduate School, 以下簡稱 NPS) 攻讀水中聲學工程博士班四年，進修目的於培養我海軍官校未來師資，並專研於水中聲學淺海底質及水下環境模擬之應用，並以二項實驗數據驗證之。

職於奉派進修期間，得以瞭解 NPS 教育教學、研究機制及當地美軍軍官進修研究所之學風，進而開拓國際視野。NPS 學校架構、各系組成及學生概況，請參考台灣畢業校友載於同網頁的公務出國進修報告，在此不再贅述。

進修期間除鑽研本身所研究之領域，同時與美軍及其他國家的國際學生、專業文教職人員充分交流學習，建立良好情誼，四年間於美軍事學院的教學模式也能獲得一定的瞭解，在指導教授 Professor Oleg A. Godin 的教導下，得以實際研究理論、並運用於實驗數據，並以三篇期刊為根本完成博士論文。職將此四年學習經驗，為返我海軍軍官校學校之後續教學、服務及研究之基礎，以為我海軍培育第一等人才。

職博士論文之英文原文為「Application of Acoustic Noise Interferometry to Remote Sensing of Coastal Ocean」，中譯為「運用水中環境噪音之干涉性質，以遙測近岸淺海底質」，以環境噪音之正向干涉(Noise Interferometry, NI)為理論基礎，噪音於環境內所生成，故噪音的傳遞必然受環境的參數影響：如水中聲速、海底聲速及密度等。此研究以 NI 所產生的被動信號為環境探測的波導(Waveguide)信號，輔以淺海中對於點聲源場可以各號簡正波(Normal Mode)疊加之水中聲場基礎理論，再以時間扭換(Time Warping)操作應用到水中聲學，以分離各號簡正波參數，而每一簡正波參數的頻散曲線(Dispersion Curve)皆受上述的環境參數所影響，故可以環境地聲反演(Geoacoustic Inversion)反推上述的環境參數。反推的海底參數，可用於未來水下作戰之參考。

過程：期刊著作及研討會發表

期刊著作及研討會發表文章，皆可至 google scholar 網上搜尋下載。

四年期間發表期刊如下：

- 1) T. Tan, O.A. Godin, A. Lefebvre, W. Beaute, B.G. Katsnelson, and M. Yarina, “Characterizing the seabed by using noise interferometry and time warping,” *Proceedings of Meetings on Acoustics 176 ASA*. 35(1), Art. 070001 (2018).
- 2) T. Tan, O.A. Godin, M.G. Brown, and N.A. Zabotin, “Characterizing the seabed in the Straits of Florida by using acoustic noise interferometry and time warping,” *J. Acoust. Soc. Am.* 146(6), 2321-2334 (2019).
- 3) O. A. Godin, B.G. Katsnelson, and T. Tan , “Normal mode dispersion and time warping in the coastal ocean,” *J. Acoust. Soc. Am.* , vol. 146(3), pp. EL205-EL211 (2019)

二次於美國聲學研討會 Lectures & Lay-language paper at the 176th and 177th Acoustical Society of America Meetings 發表如下：

- 1) T. Tan, O.A. Godin, B.G. Katsnelson, and M. Yarina, “Passive acoustic characterization of the ocean bottom using a horizontal array of hydrophones,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 144(3), pp. 1973–1974, Nov 2018.
- 2) T. W. Tan and O. A. Godin. 5aUW7 – Using Noise to Probe Seafloor [Online] Available: <https://acoustics.org/5auw7-using-noise-to-probe-seafloor-tsuwei-tan/>
- 3) M. Yarina, B.G. Katsnelson, T. Tan, and O.A. Godin, “Geoacoustic Inversion Using Cross Correlation Function of Low-Frequency Ambient Noise in the Shallow Water 2006 Experiment,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 144(3), pp. 1973–1973, Nov 2018.
- 4) T. Tan, O.A. Godin, B.G. Katsnelson, and M. Yarina, “Using ambient noise to evaluate the acoustic Green’s function for a passive geoacoustic inversion in a dynamic shallow-water environment,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 145(3), pp. 1671–1671, May 2019.

運用水下噪音干涉及時間扭換操作因子探測美國佛羅里達海灣底質

Characterizing the seabed in the Straits of Florida by using acoustic noise interferometry and time warping

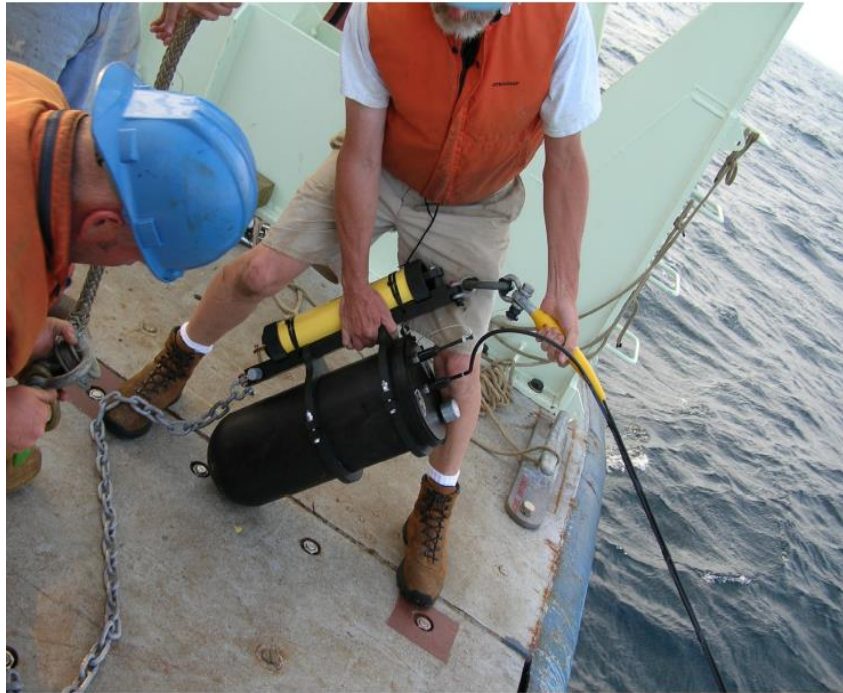
職研究之主題為環境噪音(Ambient Noise)之正向干涉(Noise Interferometry, NI)，以其理論產生的被動信號為環境探測的波導信號，作為淺海地區的海洋遙測(Ocean Remote Sensing)基礎，以探測海洋環境參數，並專注在淺海海底底質探勘。傳統上，海洋遙測及所獲的環境參數皆以水下聲源主動拍發的方式獲取，但現今環境及生態保育的意識抬頭，主動聲源的頻段(Frequency Band)可能對水下生物如哺乳類動物海豚及鯨類等造成危害；水下生物皆有其生存依賴的特定頻段。長時間的主動水下聲源拍發亦須經過相當冗長的行政程才能獲得許可，故以環境噪音為探測方式是相當的環保且相當符合經濟效益。

此期刊職已於 2019 年發表於美國聲學期刊(The Journal of Acoustical Society of America)，原文請參考[1]並上網 <https://doi.org/10.1121/1.5127846> 下載。本進修報告僅摘錄簡譯期刊內的重要成果。

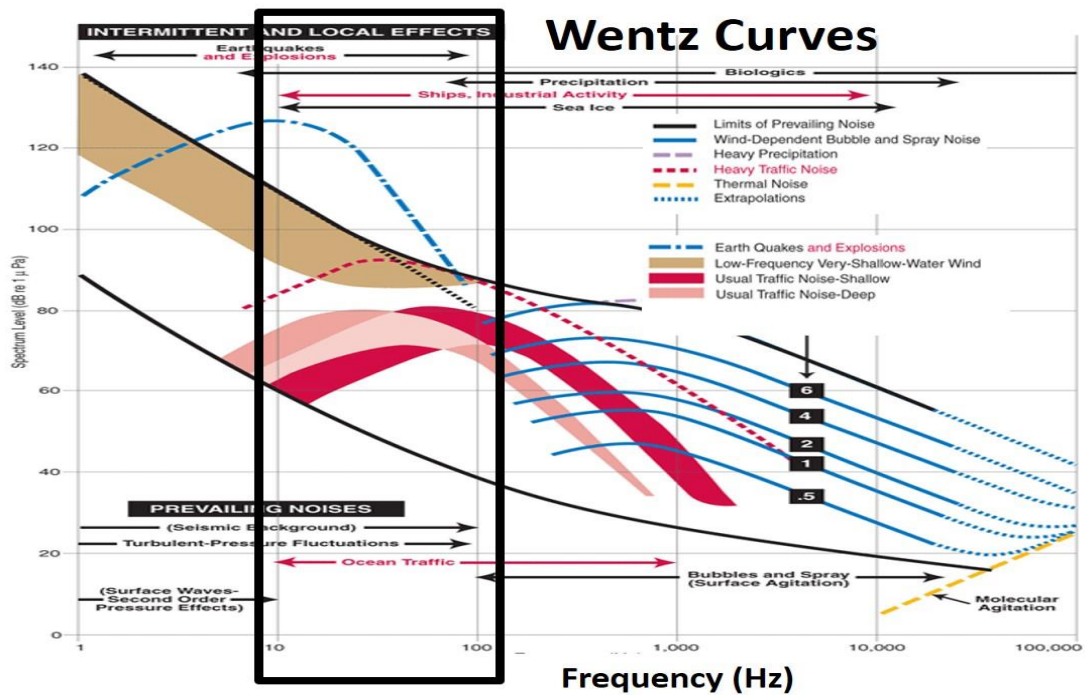
此發表的期刊內容，可簡述於下列四部份：

1. 傾聽噪音，被動接收信號：

不使用主動拍發或可控制的水下聲源(如拍發聲納、水下音爆等方式)，改為只使用二個(一對)水下聽音器(Hydrophone)，水下聽音器裝具如圖一。在適當實驗時間內，僅被動傾聽水下環境的噪音，並經信號處理後作環境探測信號。相較於主動拍發，此被動模式的花費因無須大型機具長時拍發，故相當符合經濟效益，且對水下環境相對友善因無製造任何聲源。實驗數據依大氣海洋學中的溫茲曲線(Wenz Curves)理論<如圖二、三>，在本實驗 100m 水深等深線<如圖四>，淺水噪音在 110Hz 內的頻段主要來源為遠距離的船舶噪音(Shipping Noise)、海面波浪(Breaking Waves) 所造成，兩個相距約 5000 公尺水下聽音器所記錄的環竟噪音，其同調(Coherence)經驗證在此實驗中經信號處理後可獲得保留。

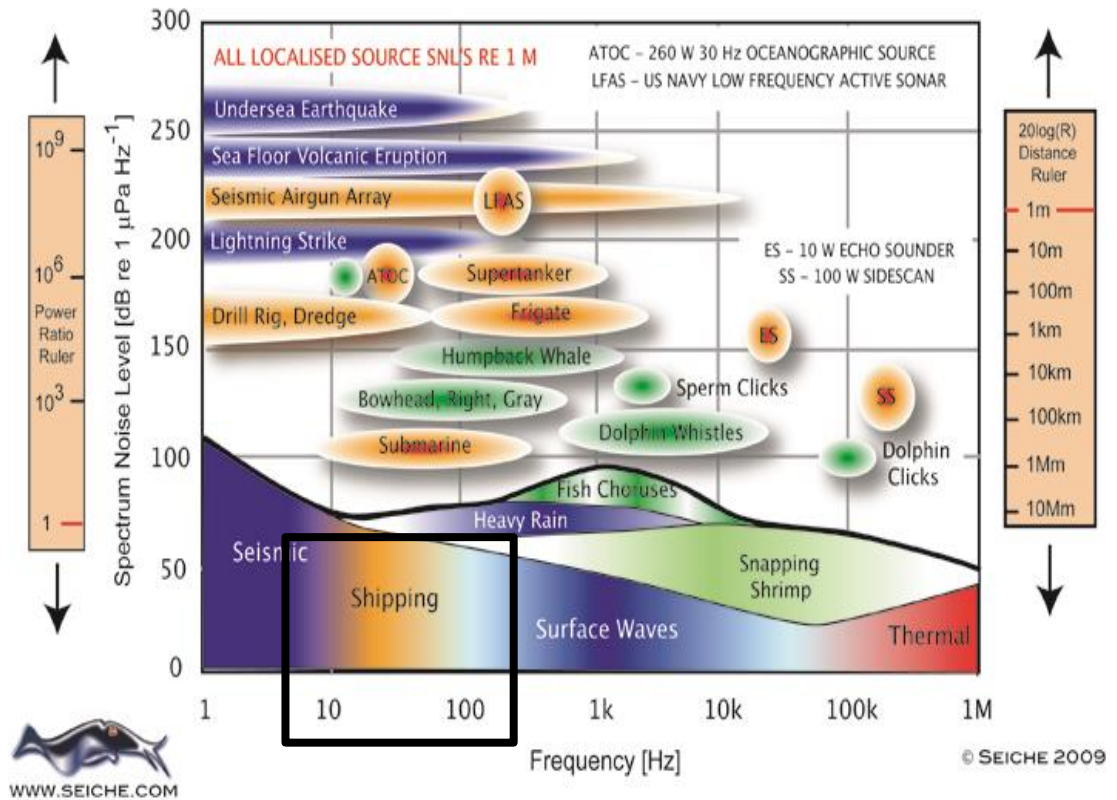


圖一、水下聽音器 Hydrophone [2]



<https://dosits.org/science/sounds-in-the-sea/what-are-common-underwater-sounds/>

圖二、環境噪音 10-110Hz 來源依溫茲曲線 Wentz Curves 為海面波浪及船舶航運所產生

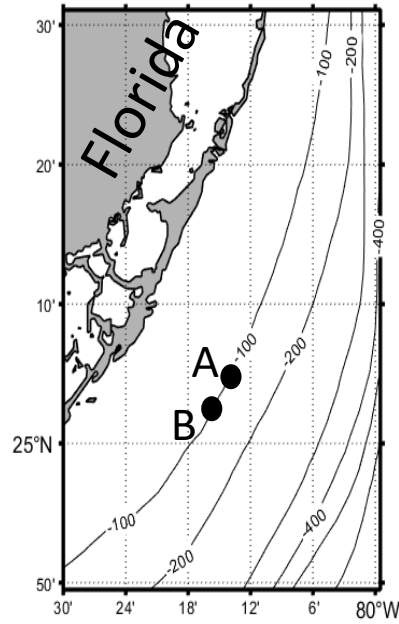


圖三、環境噪音 10-110Hz 來源為遠距船舶航運 Shipping 所產生的噪音

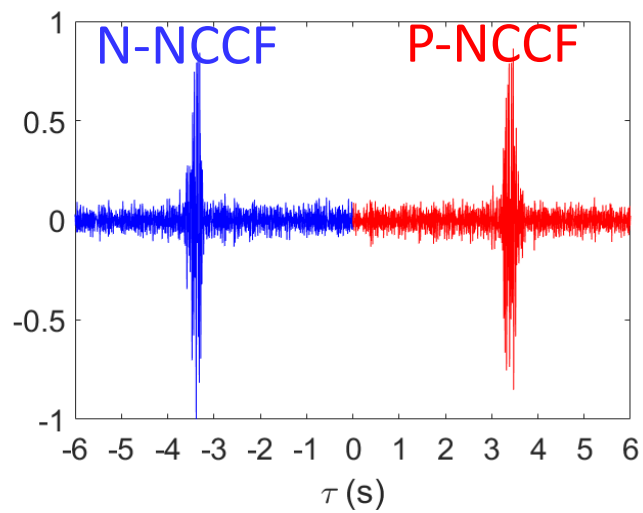
2. 噪音交叉相關函數 (Noise Cross-Correlation Function)：

以 NI 為理論基礎，其數學意義為將實驗的一對水下聽音器 A 及 B<水下聽音器 A、B 位置如圖四>所記錄的壓力值交叉計算，演算出噪音交叉相關函數 Noise Cross-Correlation Function (NCCF)，以其同調 Coherence 頻率 10-110Hz 在簡正波 (Normal Mode) 的水中聲場理論作為波導傳遞，並以此 NCCF<如圖五>為海洋遙測的探測信號[3-7]。因圖四的噪音環境場為足夠擴散(Diffuse)的因素，其來源為圖二及圖三所示，故圖五的藍色 Negative NCCF 簡稱為 N-NCCF 及紅色 Positive NCCF 簡稱為 P-NCCF 兩者主要信號約為±3.25秒開始接收且相當對稱，因為 A 與 B 水下聽音器的距離/聲速為 $\frac{5000m}{1540\frac{m}{s}}$ ，故主要信號是在 3.25 sec 左右產生，因

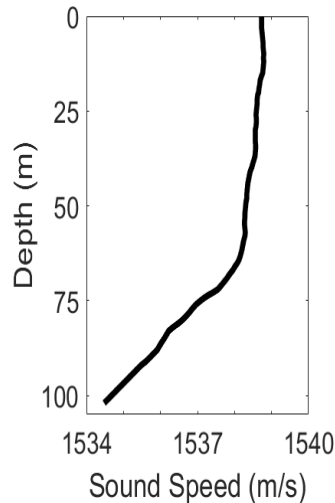
其波導在 10-110HZ 的低頻範圍，故 Normal Mode 簡正波的理論適用於此聲場傳遞。圖五的 NCCF 是經由約 6 天連續的實驗數據獲得。圖六為實際量測的聲速圖。



圖四、2012 年於美國佛羅里達海灣(Florida Straits)所實施的環境噪音之正向干擾實驗位置圖，一對水下聽音器 A 及 B 的地理位置位於等深線 100m [1]



圖五、經由圖四的一對水下聲音器及 NI 理論，計算所獲得的噪音交叉相關函數 NCCF，藍色信號稱為 N-NCCF 為擴散的有效噪音由 B 傳遞至 A, 紅色信號稱為 P-NCCF 為擴散的有效噪音由 A 傳遞至 B [1]



圖六、2012 年於美國佛羅里達海灣所實施的環境噪音干擾實驗中，實際量測的聲速圖[1]

3. 時間扭換 (Time Warping) :

時間扭換[8-14]有很多應用，在此僅專注在淺海中的聲學信號應用，並作用為分離各號簡正波(N-th Normal Mode)，其理論如圖七，概述如圖七中的分圖(1)-(5)，理想波導 (Ideal Waveguide)理論數據模擬圖(a)-(c)，分別闡述如后：

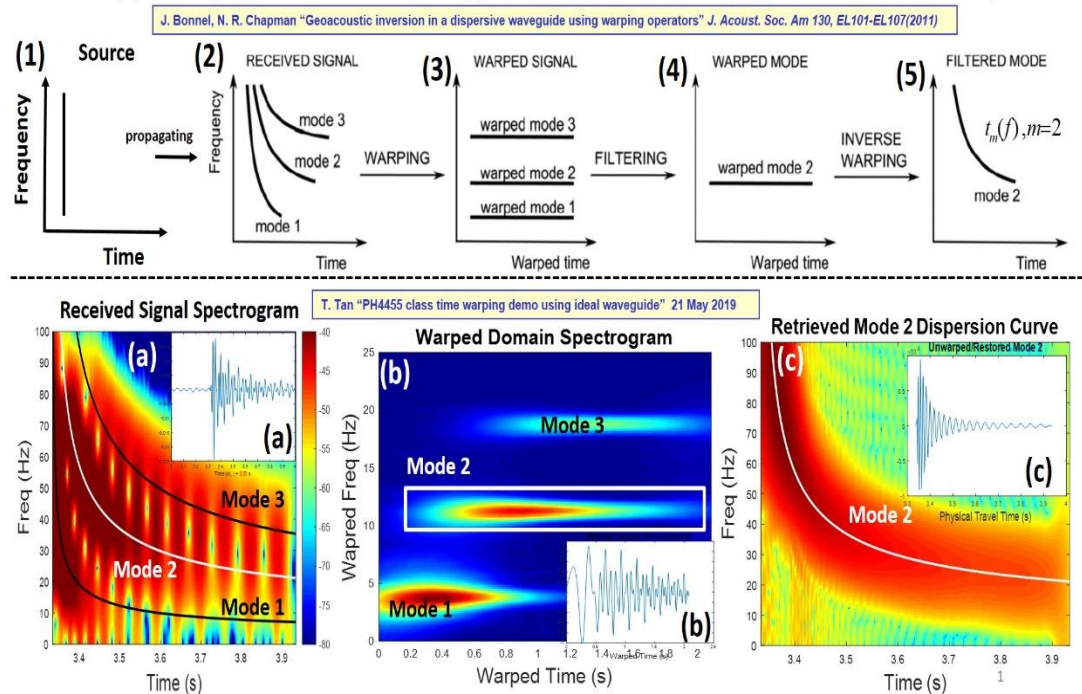
- (1) 在一寬頻(Broad Band Frequency)的信號產生時，因幾何邊界的條件原因(Geometric Boundary Condition)，其波導 (Waveguide)在傳播 (Propagation)路徑中呈現頻散(Dispersion)的狀況。
- (2) 因頻散關係(Dispersion Relationship)，故於此分圖中，各號簡正波在不同頻率，也就是不同波長(Wavelength)的狀況下，有不同的群速度(Group Speed)。簡正波 1, 2, 3 (Mode 1, 2, 3) 在號數 (m-th mode) 愈低而頻率相同時，傳播的群速度愈快，其傳播時間 (Travel Time)，也就因群速度愈快而愈小。而在(a)圖的模擬數據中，各簡正波因傳播距離過短，故各號簡正波的能量在頻譜 (Spectrogram)中相互重疊，無法分開測量單一的頻散曲線 (Dispersion Curve)。
- (3) 時間扭換有很多應用，如應用在影像處理等，在水中聲學的淺水環境中，運用適當的時間扭換因子(Time Warping Operator)，可將簡正波的頻散在原物理頻譜中如(2)圖的曲線，其各號簡正波的頻散皆因頻率不同而有不同的傳播速度，扭換成直線如(3)圖。時間扭

換因子是作用扭換在信號上，而非扭換頻譜，但其視覺結果在頻譜上可展現出來：將(a)圖轉到(b)圖，簡正波 1, 2, 3 (Mode 1, 2, 3)在時間扭換下分離。(3)圖的模擬數據如(b)圖。

(4) 在時間扭換後如(3)圖，可以傳統的濾波(Filter)方式，將扭換頻譜的特定簡正波的頻散單一取出，在此以第 2 號數 (2nd mode) 簡正波頻散作為範例。

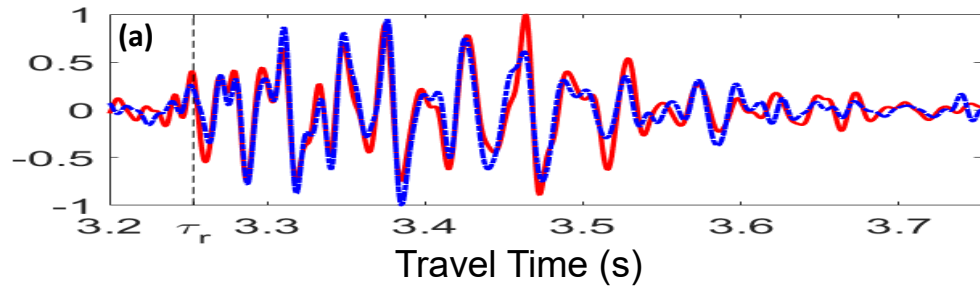
(5) 時間扭換的作用因子是可逆的，在此例中，在(4)圖中的 2 號數簡正波可逆轉回原域，故可取出單一的 2 號簡正波。模擬數據如(c)圖。

時間扭換(Time Warping)以分離各簡正波(Normal Mode)



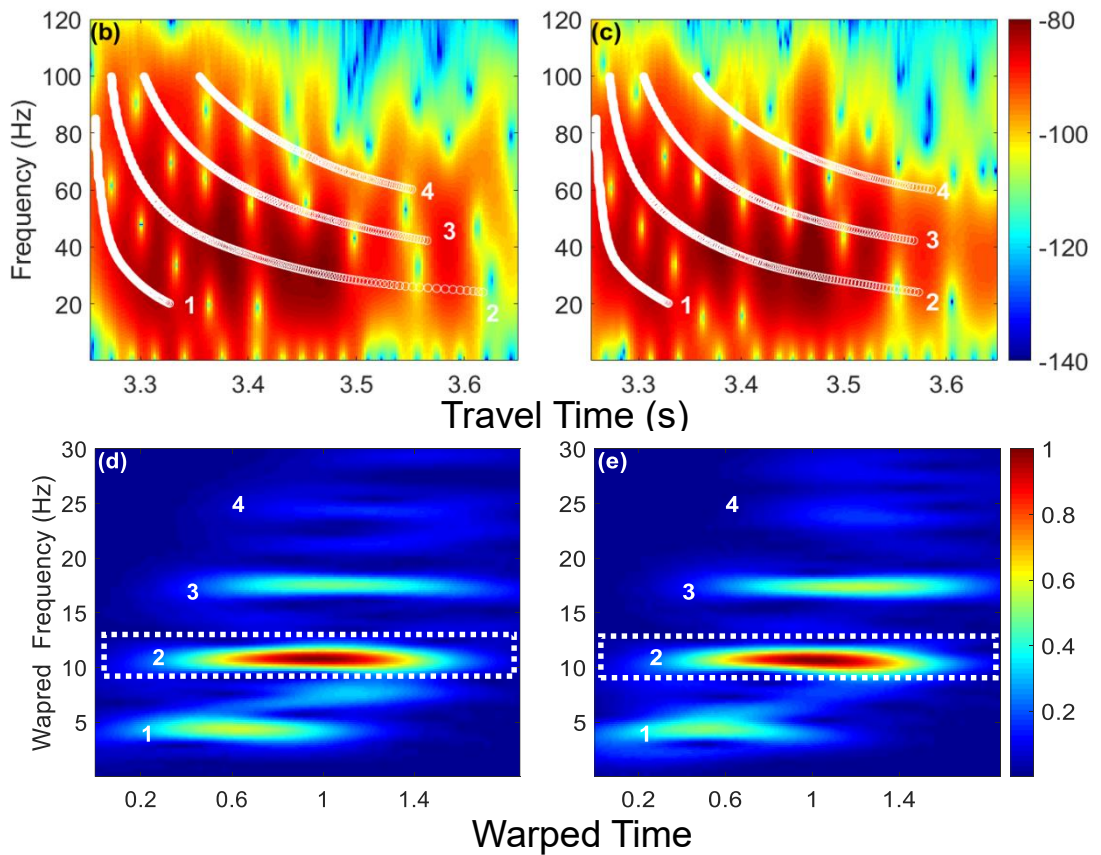
圖七、時間扭換(Time Warping)以分離各簡正波之概述

在圖七以模擬數據了解時間扭換可分離各號簡正波的頻散狀況後，以圖五的噪音交叉相關函數 NCCF 實驗數據為探測信號，其 N-NCCF 為描述水下聽音器 B 至 A，及 P-NCCF 為描述水下聽音器 A 至 B 的傳播路徑 Propagation Path，其主信號為約在 ± 3.25 秒開始，近看主信號部分，並將圖五的時間延遲 τ 取絕對值，其意義應對為 A 至 B 的傳播時間 (Travel Time) 或是 B 至 A 的傳播時間，如圖八(a)：



圖八(a)、圖五的主信號區間，藍色信號稱為 N-NCCF, 紅色信號稱為 P-NCCF, 其中 τ_r 約 3.25 秒而其意義為接收信號的開始時間 [1]

在經由時間扭換 (Time Warping) 後，可將圖八(a)信號開始時間，亦是 τ_r 後各號簡正波(Normal Mode)分離，如圖八(b)-(e)。

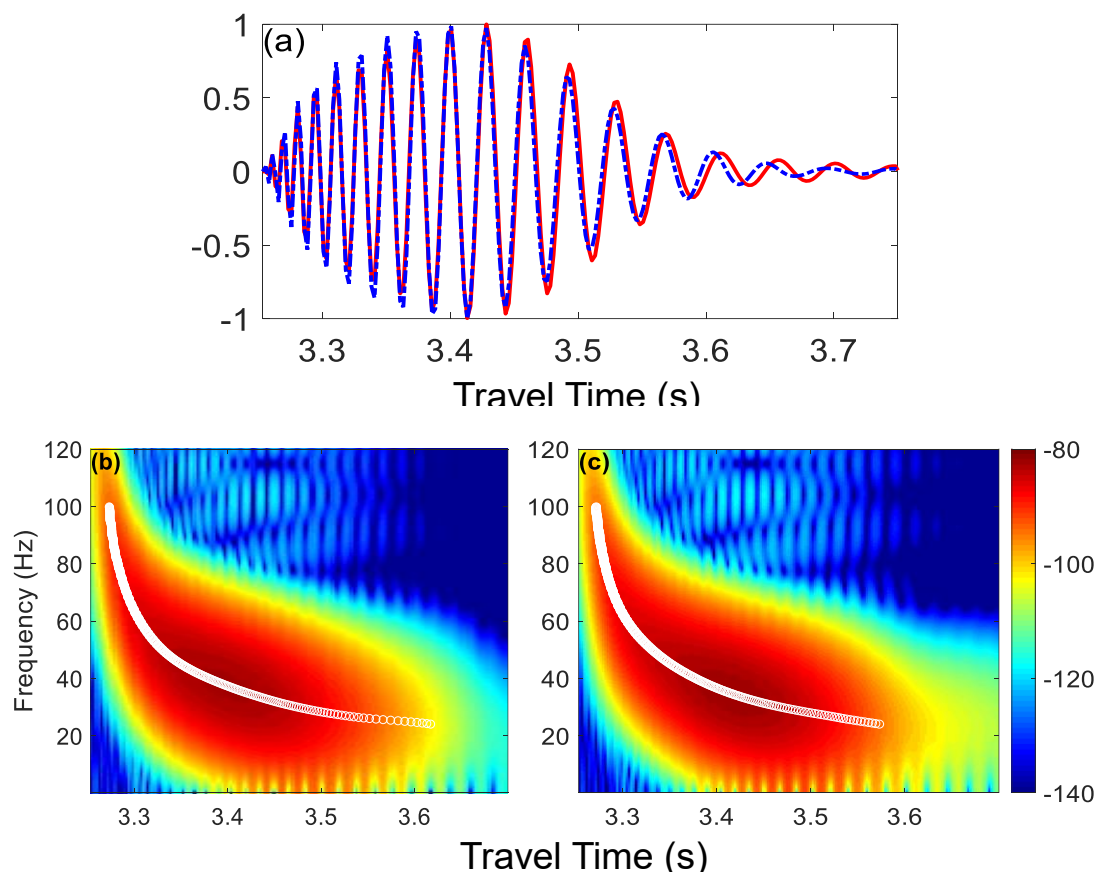


圖八(b)-(e)：中的(b)、(d)分別對應為 N-NCCF 的原本物理頻譜及時間扭換後的頻譜，(c)、(e)則對應為 P-NCCF 的原本物理頻譜及時間扭換後的頻譜。請注意(b)及(c)在時間扭換成(d)及(e)前，其步譜內的 1-4 號簡正波能量相互干涉，故 1-4 號簡正波的各號頻散 (Dispersion Curve) 是無法測量的，(b)及(c)內的 1-4

號簡正波頻散(白色圈線)是在經由時間扭換後，分別量測各簡正波的頻散後，後置上去的以對比說明[1]。

圖八(a)中的二者 N-NCCF(藍色信號)及 P-NCCF(紅色信號)非常相似，因實驗的環境噪音 Ambient Noise 足夠射散，原因述於第 7 頁的噪音交叉相關函數 (Noise Cross-Correlation Function)。

N-NCCF 或是 P-NCCF 皆可作為環境探測的信號，以 N-NCCF 及 P-NCCF 的第 2 號簡正波作為時間扭換分離第 2 號簡正波的範例。以在圖八(d)及(e)中的白色虛線框為帶通過濾器 (Bandpass Filter)，只單一分離第 2 號簡正波的頻譜 (Spectrogram)。後再經短時傅立葉轉換 (Inverse Short-Time Fourier Transform)，可將扭換域 (Warped Domain)的單一 2 號簡正波頻譜，轉換成單一 2 號簡正波，如圖九(a)。



圖九、(a)為獨立的第 2 號簡正波，藍色信號稱為 N-NCCF，紅色信號稱為 P-NCCF。(b)及(c)分為 N-NCCF 及 P-NCCF 獨立簡正波後，所測量出的 2 號簡正波的頻散曲線 [1]。

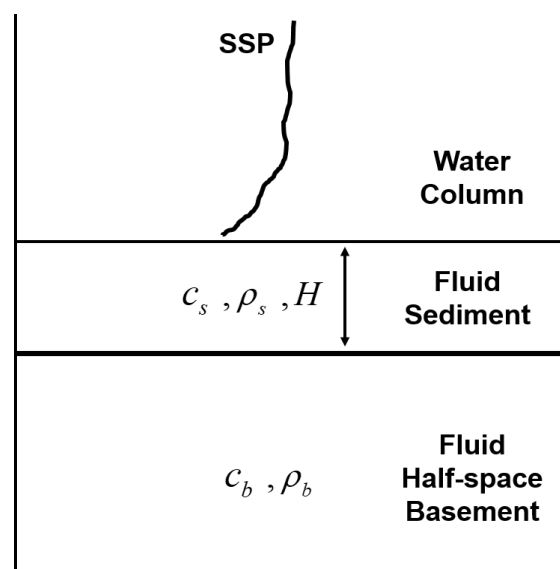
圖九(b)及(c)為單一分離 2 號簡正波後，再經由傳統的信號處理方式，如傅立葉轉換 (Short-Time Fourier Transform)後，再測量其頻譜中，時頻(Time-Frequency)能量分佈的最大值，亦即是測量頻散曲線(Dispersion Curve)，不過相較於圖八(b)及(c)有全部的簡正波，亦即 1 至 4 號的簡正波相互重疊干擾，圖九(b)及(c)現在只有單一的 2 號簡正波，故其頻散曲線能夠準確的測量。

圖九(b) N-NCCF 及(c) P-NCCF 的頻散曲線結果在此比例下相當的接近，肉眼難以分辨其差異，由圖九(a)中也可看出兩者的差異很小，除了信號在約 3.6 秒後差異開始變大，因訊噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)較小，其所分離出的單一 2 號簡正波在 3.6 秒後的差異開始明顯化。

其餘 N-NCCF 及 P-NCCF 的 1, 3 及 4 號的簡正波亦是由上述方法分離出，其分離出簡正波的頻散曲線如圖八(b)及(c)的白色圓型線。

4、環境反演 (Geoacoustic Inversion)

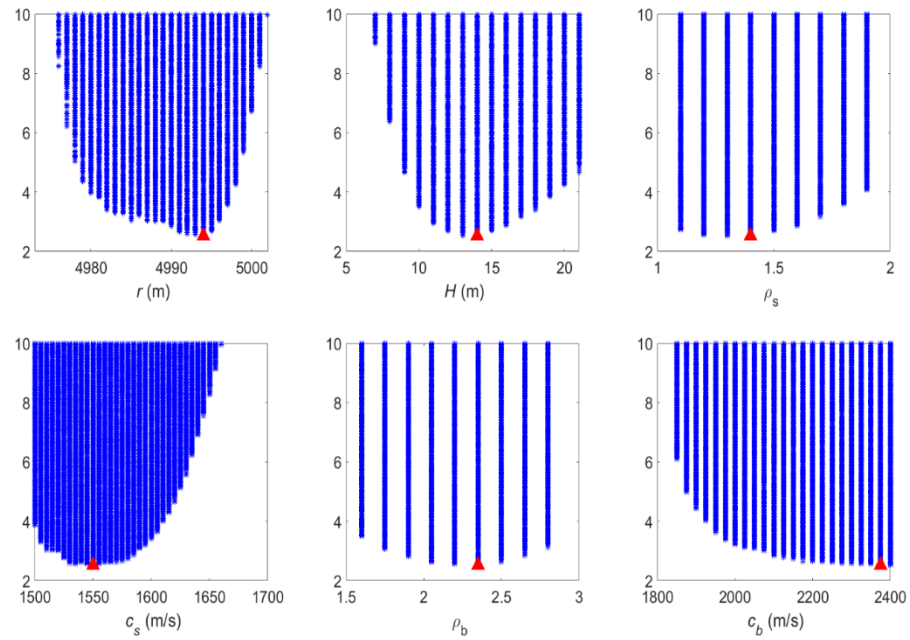
在 N-NCCF 及 P-NCCF1-4 號簡正波的頻散曲線獲得後，而二者間的差異主要來自於佛羅里達灣的強列洋流(Strong Current)，而這微小的差異會影響環境反演的推算結果。為了消除二者間因洋流造成的差異，故取其平均值，以作為環境反演的輸入標準頻散曲線作比對，以反推環境參數。環境的模式設定如圖十：



圖十、在反算過程中的環境模式：水中的聲速剖面圖(Sound Speed Profile, SSP)為平均測得的已知數。反算的未知參數有六：第一項為水下聽音器 A 及 B

的距離 r ，餘五項為地聲性質：流體沈澱層的厚度 H ，密度 ρ_s ，聲速 c_s ，半無限空間的密度 ρ_b ，聲速 c_b [1]。

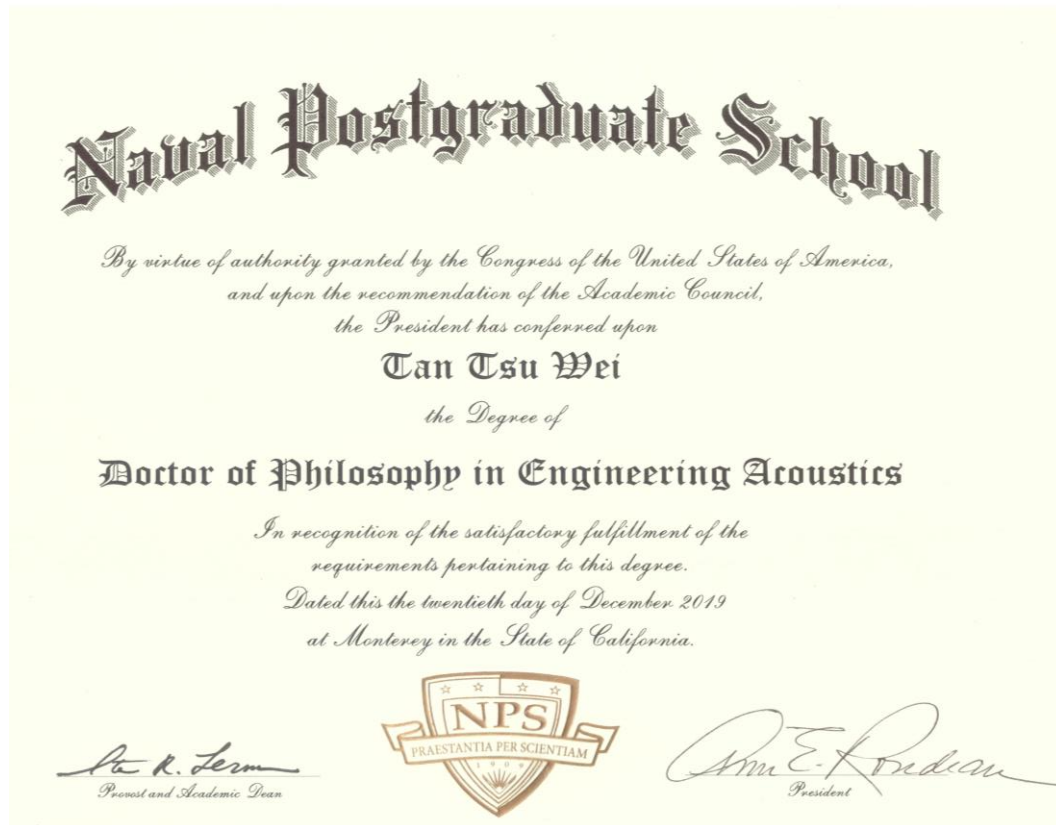
在經由反算後，亦即比對模擬參數及環境參數的頻散曲線，兩者間差異的最小值後，將上述的六項未知參數的最佳值反推而出，並述於圖十一。



圖十一、為圖十述中反算的最佳值，分別為六項分圖中的紅色三角型對應的 X 軸值[1]。

心得及建議

此報告中的第5-14頁為職四年博士進修中的主要著作之一，因原撰文為英文思考，職對照國家教育研究院中的雙語詞彙，將其簡述譯成中文，亦對職後續水中聲學相關領域研究，特別在淺海底質及水下環境模擬之應用及教學有所助益。



圖十二、博士學位證書：美國海軍研究院（Naval Postgraduate School）水中聲學工程博士（Doctor of Philosophy in Engineering Acoustics），於2019年12月畢業典禮時頒發。

參考文獻

- [1] T. W. Tan, O. A. Godin, M. G. Brown, and N. A. Zaboltn, "Characterizing the seabed in the Straits of Florida by using acoustic noise interferometry and time warping," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, no. 4, pp. 2321-2334, 2019.
- [2] A. E. Newhall *et al.*, "Acoustic and oceanographic observations and configuration information for the WHOI moorings from the SW06 experiment," WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION MA, 2007.
- [3] J.-X. Qin, B. Katsnelson, O. Godin, and Z.-L. Li, "Geoacoustic Inversion Using Time Reversal of Ocean Noise," *Chinese Physics Letters*, vol. 34, no. 9, p. 094301, 2017.
- [4] O. A. Godin, M. G. Brown, N. A. Zaboltn, L. Y. Zaboltna, and N. J. Williams, "Passive acoustic measurement of flow velocity in the Straits of Florida," *Geoscience Letters*, vol. 1, no. 1, p. 16, 2014.
- [5] O. A. Godin, B. Katsnelson, J. Qin, M. G. Brown, N. Zaboltn, and X. Zang, "Application of time reversal to passive acoustic remote sensing of the ocean," *Acoustical Physics*, vol. 63, no. 3, pp. 309-320, 2017.
- [6] M. G. Brown *et al.*, "Ocean acoustic remote sensing using ambient noise: Results from the Florida Straits," *Geophysical Journal International*, vol. 206, no. 1, pp. 574-589, 2016.
- [7] M. G. Brown, O. A. Godin, N. J. Williams, N. A. Zaboltn, L. Zaboltna, and G. J. Banker, "Acoustic Green's function extraction from ambient noise in a coastal ocean environment," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 15, pp. 5555-5562, 2014.
- [8] R. G. Baraniuk and D. L. Jones, "Unitary equivalence: A new twist on signal processing," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 43, no. 10, pp. 2269-2282, 1995.
- [9] J. Bonnel and N. R. Chapman, "Geoacoustic inversion in a dispersive waveguide using warping operators," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, no. 2, pp. EL101-EL107, 2011.
- [10] J. Bonnel, S. E. Dosso, and N. Ross Chapman, "Bayesian geoacoustic inversion of single hydrophone light bulb data using warping dispersion analysis," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, no. 1, pp. 120-130, 2013.
- [11] J. Bonnel, C. Gervaise, B. Nicolas, and J. Mars, "Single-receiver geoacoustic inversion using modal reversal," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 119-128, 2012.
- [12] J. Bonnel, C. Gervaise, P. Roux, B. Nicolas, and J. Mars, "Modal depth function

- estimation using time-frequency analysis," *The journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, no. 1, pp. 61-71, 2011.
- [13] J. Bonnel, B. Nicolas, J. I. Mars, and S. C. Walker, "Estimation of modal group velocities with a single receiver for geoacoustic inversion in shallow water," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, no. 2, pp. 719-727, 2010.
- [14] J. Bonnel, A. M. Thode, S. B. Blackwell, K. Kim, and A. Michael Macrander, "Range estimation of bowhead whale (*Balaena mysticetus*) calls in the Arctic using a single hydrophone," *The journal of the Acoustical Society of America*, vol. 136, no. 1, pp. 145-155, 2014.