

濱海作戰聲納預測法 差異性之模擬分析

Simulation analysis of the difference of sonar prediction in littoral water

彭巧明、王貴民、陳琪芳

提 要：

- 一、大洋與濱海兩種海域具有截然不同的海洋環境與海底性質，採用大洋式的聲納效能預測於濱海區域會出現差異性。美海軍自二戰後即慣於大洋作戰，所使用的聲納效能預測法至今仍多為距離獨立(Range-Independent)模式；用於濱海區域的聲納效能預測則應以距離相依(Range-Dependent)模式為主。
- 二、學術與科學界對濱海區域陸續發展各種理論與實際海洋測量數據，但卻未見以不同聲納效能預測法結合實際反潛戰術之相關研究。本研究針對濱海區域，建立蒙地卡羅模擬模式，發展戰術階層想定，以大量重複模擬方式求算大洋反潛作戰使用的距離獨立模式與濱海所用的距離相依模式兩聲納預測法之作戰效益數據，並以統計之變異數分析(ANOVA)進行兩者在反潛效益上的差異性評估。
- 三、經一千次的模擬運算，以單艦為例，兩者在潛艦速率為3、6、9節時的偵測率差異為0.095、0.051、0.029，感覺上此一差異似在容忍範圍內，但經過嚴謹的ANOVA分析後，發現兩者間具有極大的差異。
- 四、我國四面環海，屬於典型濱海國家，海洋環境與海底性質十分複雜，加上我國艦船系統大多向美採購，必須瞭解美系載台與系統在濱海區域使用上的限制，並積極結合學術科研界的智慧持續進行相關海域的實測與模式(如ASORPS)之充實，以續保有濱海國之反潛優勢。

關鍵詞：模擬、聲納、偵測率、變異數分析、距離獨立、距離相依模式

Abstract

1. The characteristics between ocean and littoral water are distinct. The sonar prediction model used in these two waters are different and the misuse of them will cause imprecisions on detection. The U.S. Navy have been relying on range independent model in ocean for ASW search since World

War II, but in littoral water the range dependent model is preferred for the complex water environment. .

2. Despite the academic and scientific societies have successfully developed theories and collected the oceanic data over littoral water, the studies on using the different models of sonar prediction on anti-submarine tactics in littoral waters are rare. In terms of that, this study develops Monte Carlo simulation model. Greatly used repeated simulations to calculate the operational efficiency data of two different methods of the prediction of the sonar. One is Range-Independent which is operated under oceanic anti-submarine warfare, and the other one is Range-Dependent which is operated in the littoral waters. ANOVA analyzes two different methods in respect of anti-submarine efficiencies.
3. Under one thousand times of simulation runs on a single surface ASW ship scenario, the difference between these two methods on detection probability over the submarine are 0.095, 0.051, and 0.029 with respect to 3, 6, and 9 knots of the submarine's speed. The difference of these number are very significant from ANOVA.
4. Taiwan is surrounded by seas with the typical littoral country. The maritime environment and topology are complex. Moreover, the warships' systems onboard are mostly purchased from the U.S., with that the understanding of the littoral water limitations on the U.S. ASW systems is necessary. One way to keep ASW advantage over the Taiwan littoral water is to integrate the intelligence from academic and scientific fields with their efforts on those nonstop ocean data collections and models' improvement (such as ASOPRS).

Keywords: Simulation, Sonar, Detection Probability, ANOVA, range-independent/range-dependent acoustic model

壹、前言

反潛作戰主要的偵測系統—聲納，所依賴的就是聲音。而聲波在水中的傳遞所具有的高度複雜與不確定性卻源於作戰海域海洋環境的多變因素，如天候、海底地形、地質、水文、海洋背景噪音與自體噪音等，皆屬於人為不可控制的因素。聲納本身的作業就成為反潛作戰中可控制的因素。運用聲納距離模式時會影響偵測距離的因素包括：目標音源強度(Source Level, SL)，聲音由音源傳至接收器的音傳損耗(Transmission Loss, TL)、目標強度(Target Strength, TS)、背景噪音強度(Ambient Noise Level, NL)、陣列方向指數(Directivity Index, DI)，偵測基準(Detection Threshold, DT)與混響(Reverberation, RL)等。在深海反潛作戰所省略的海底地形、地質等因素會在濱海作戰時產生關鍵影響，可能增加傳播損失，使聲納的偵測距離減短。Beauchamp¹的研究指出美海軍的投資一向偏重於大洋作戰，雖然學術界不時傳出宜重視濱海作戰的呼籲，但研發總是無法聚焦於濱海區域國家崛起的新挑戰。事實上，反潛作戰的水下目標偵測與識別，在濱海地區與大洋區域的差異性很大，有利於濱海國家的防禦作為，卻不利於習慣大洋作戰的美海軍，尤其航母戰鬥群在面對淺海的潛艦與水雷時會更顯脆弱。

面對十分複雜的臺灣周邊海洋環境，要能減少反潛搜索時環境所形成的高度不確定

性，我們必須先瞭解艦裝聲納系統所使用的預測模式，以掌握可控制的因素。聲納預測模式依海洋環境之不同分為兩種：距離獨立模式(Range-independent acoustic model, 簡稱RI)與距離相依模式(Range-dependent acoustic model, 簡稱RD)。距離獨立表示預測模式之計算不隨距離改變，認為海底地形是平坦也只有一種地質，如沙底，通常用於大洋。距離相依則以淺海為主，考量不同海底地形之組合與多種地質。西方國家皆認為兩種聲納距離之預測對聲納偵測結果是有所不同。基於國內對於兩者雖有理論與實際實驗探討，然而在執行反潛搜索時的差異性評估尚無研究數據與探討，僅海洋科學數據對於反潛作戰而言還是難以提供戰術之決策性參考。本研究參照荷蘭應用科學研究中心(TNO)對義大利與科西嘉間海域進行的RI與RD的測試比較結果，在相關理論與實際海洋測量的基礎上，結合軍事想定，進一步以蒙地卡羅模擬模式對臺灣相關海域進行模擬分析，以分辨兩種聲納預測方法在濱海地區的實際差異。本研究所使用之模擬數據係參考TNO與國內外期刊之公開文獻，經千次模擬後所得之作戰效益數據，再以統計方法進行差異性分析。所獲結果，與實際或有差異，但所驗證之相異性趨勢仍可供海軍在聲納預測方法的選擇、運用與未來發展上的決策參考。

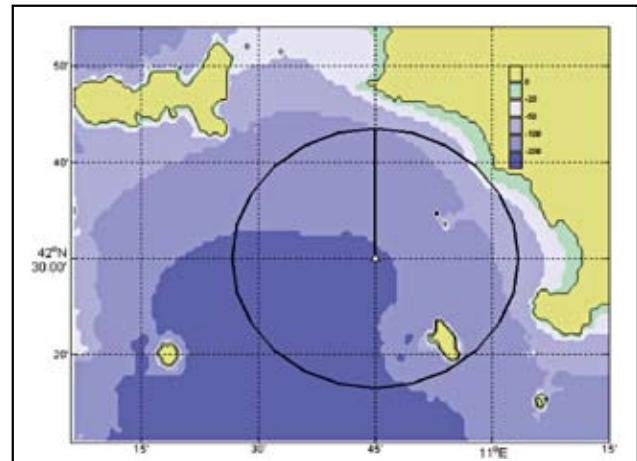
貳、文獻探討

相關本研究的文獻包括TNO實際的海測

註1：R. E. Beauchamp, "Blue water navy - Littoral threat," Naval War College, Newport, RI, USA, 2006.

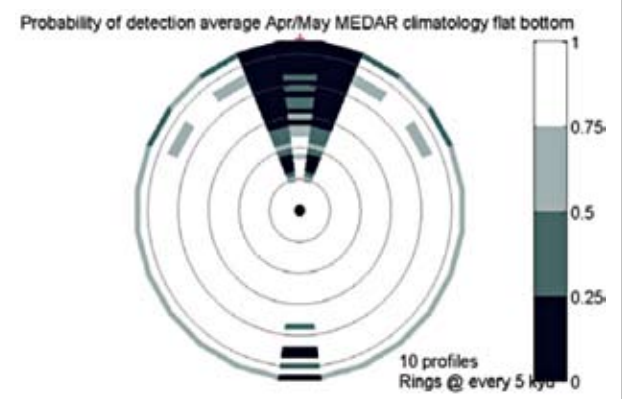
報告，RI與RD，聲學，蒙地卡羅模擬與統計分析等。

RI與RD是兩種聲納預測方法，理論上分別適用於海底平坦的大洋與海底地形複雜的濱海區域，TNO藉北大西洋公約組織演習之便進行一系列RI與RD之海洋測試。Raa等TNO研究人員²參加2007年從4月22日到5月5日由北約水下研究中心主辦在地中海的戰場空間準備之實驗(Battlespace Preparation 2007 experiment)，搭乘多用途的HNLMS Snellius 海測船在義大利與科西嘉之間海域，如圖一，進行多國合作的「淺水環境之整合性隨時間變化的立體認知環境圖像」建立任務(the establishment of an integrated time-varying three-dimensional Recognized Environmental Picture of a shallow-water environment)。HNLMS Snellius海測船所執行的測量海域，深度從300公尺至1,000公尺間。其主要目的是接續2005年在陸地上完成的部分模式鏈(Modeling chain)，進行海上聲學預測並實證聲納預測之改善，其中包括與麻省理工學院(MIT)合作之「傳送新的即時作業處理鏈之機率」(the possibility of delivering a new real-time working process chain)。TNO以音響損失模式(Acoustic Loss Model for Operational Studies and Tasks, ALMOST)模擬拖式低頻主動聲納系統(low frequency active sonar, LFAS) 並以多學科模擬、估測與同化系統(Multidisciplinary



圖一 荷蘭TNO研究人員所執行聲學評估之海域(義大利與科西嘉之間，圖左上方為厄爾巴島)

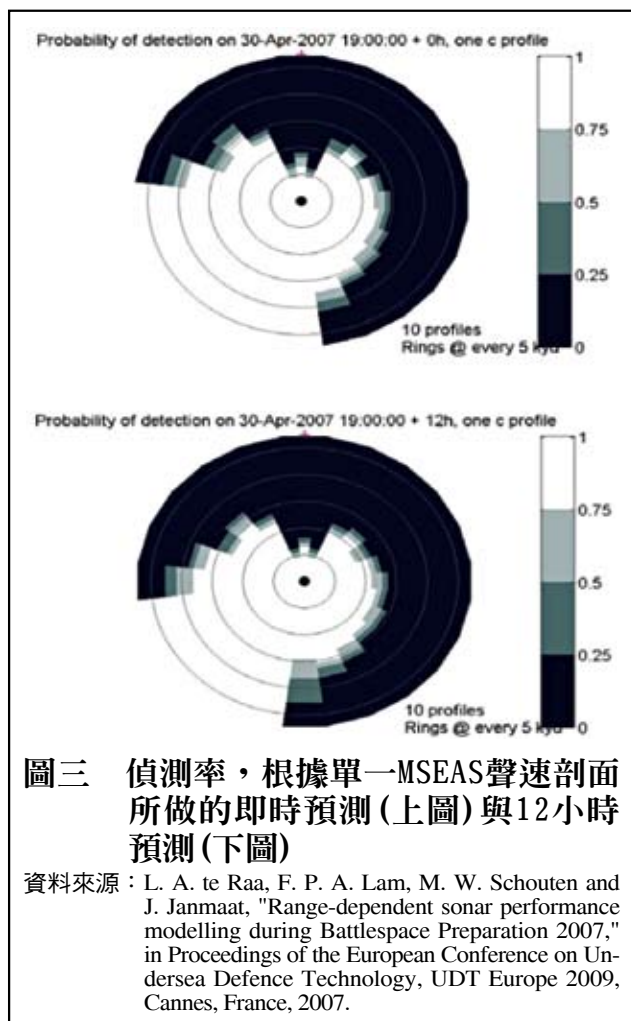
資料來源：L. A. te Raa, F. P. A. Lam, M. W. Schouten and J. Janmaat, "Range-dependent sonar performance modelling during Battlespace Preparation 2007," in Proceedings of the European Conference on Undersea Defence Technology, UDT Europe 2009, Cannes, France, 2007.



圖二 根據地中海資料檔案與救難氣象局(MEDAR)之天候與平坦海底地形獲得之單一聲速剖面所獲偵測率

資料來源：L. A. te Raa, F. P. A. Lam, M. W. Schouten and J. Janmaat, "Range-dependent sonar performance modelling during Battlespace Preparation 2007," in Proceedings of the European Conference on Undersea Defence Technology, UDT Europe 2009, Cannes, France, 2007.

註2：L. A. te Raa, F. P. A. Lam, M. W. Schouten and J. Janmaat, "Range-dependent sonar performance modelling during Battlespace Preparation 2007," in Proceedings of the European Conference on Undersea Defence Technology, UDT Europe 2009, Cannes, France, 2007.



圖三 偵測率，根據單一MSEAS聲速剖面所做的即時預測(上圖)與12小時預測(下圖)

資料來源：L. A. te Raa, F. P. A. Lam, M. W. Schouten and J. Janmaat, "Range-dependent sonar performance modelling during Battlespace Preparation 2007," in Proceedings of the European Conference on Undersea Defence Technology, UDT Europe 2009, Cannes, France, 2007.

Simulation, Estimation and Assimilation System, MSEAS)進行與距離方位相依的聲速剖面之預測。

針對RI與RD兩模式，他們在該圓形海域以拖式低頻主動聲納執行實驗作業，同時以ALMOST模式執行一個典型的反潛作戰想定，其中，設定目標深度為50公尺，以實驗船位為中心的25公里距離為半徑的圓形，分為24個方位，執行預測作業。經驗證，RI計算方式以氣候與平坦海底地形為基礎的聲速剖

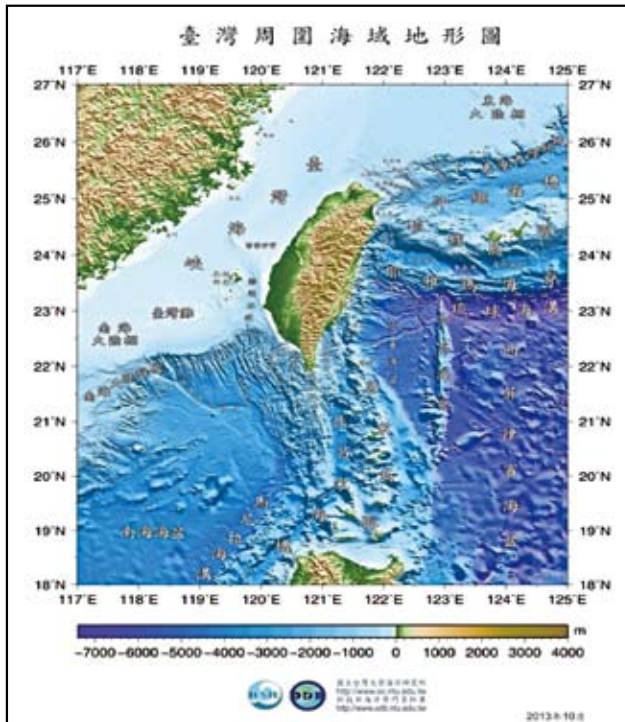
面會造成偵測率上的誤導，究其原因，平坦海底地形的假設為罪魁禍首。計算結果如圖二，除正北向的扇區偵測率在0.25以下之外，其餘大部分海域之偵測率幾乎為1.0，若比對圖一的不同水深分佈，這樣的結果合理性堪慮。

RD計算方式，則依據海底地形之相異性所產生的偵測率在各個方向上皆有極佳的預測，平均偵測率在0.75以上。對於12小時後的預測，西南向的深水海域會有顯著性的偵測率減少現象，如圖三。

從TNO的實際海上試驗數據可以獲的基礎概念就是RI與RD之間在濱海區域的偵測率具有根本上的不同，若一味使用RI模式預測聲納效能，在濱海區域會造成反潛作戰上極大的誤導，不可不慎。

與TNO研究人員所執行聲學評估之海域相較，我國濱海亦有相類似之海域，因應反潛作戰需求，我們須要對整個海域作進一步瞭解。總體而言，臺灣周邊海域不僅流系複雜，海底地形亦變化多端。陳琪芳³指出，臺灣位處太平洋邊緣，東與西菲律賓海、西南與南海、北與東海等重要邊緣海相互接連。臺灣南邊的呂宋海峽(Luzon Strait)、西邊的臺灣海峽更是這些邊緣海的重要海水交換孔道，如圖四所示。海洋環境變化複雜，臺灣東臨太平洋，水深變化劇烈，在很短的距離內，水深從數十公尺驟變為數千公尺。宜蘭外海之宜蘭海脊連接琉球島弧的南端島嶼，包括與那國島、西表島、宮古島等。在宜蘭海脊與東海陸棚間有一凹陷—沖繩海槽

註3：陳琪芳，「臺灣東南海域水下偵測特性分析與ASORPS核心效能精進研究」，中華民國科技部，臺北，2012年。



圖四 臺灣周圍海域海底地形圖

資料來源：本圖由科技部海洋學門資料庫提供，2013年。

。臺灣島北方是一片全世界最大的大陸棚海域，平均水深約為200公尺。臺灣西岸的臺灣海峽，是連接東海與南海的重要通道，水深平均約為60公尺，但是其海底地形變化亦相當複雜。海峽的西南邊有一廣大的淺水區域—臺灣淺灘，平均水深約為30公尺，海峽的東南邊，水深約為500公尺，臺灣海峽內來自南海的海水，大都經由此處進入臺灣海峽。

面對如此複雜的海域，我國學研界陸續投入許多海洋實測與研究，相關RI與RD部分包括李正恩等⁴對臺灣東北海域進行聲納效

能實際實驗，選擇3.5kHz，模擬聲納操作模式對3月、6月、9月及12月份的海洋環境進行聲納偵測距離估算。聲納裝備之偵測機率採用全球數值環境資料庫(GDEM)之資料並配合聲學模式計算而成。在偵測機率設定為0.5條件下，在上述時段內，各季最遠的偵測距離分別如下：2.85公里、3.32公里、1.85公里、4.32公里。其中最好與最差的偵測發生於12月份與9月份。王崇武等⁵認為海底地形與底質對聲納偵測效能有深遠影響。他們指出，因在淺海環境中，海床會造成聲音在水中傳遞時的反射與穿透並影響水中聲能的分佈。其中，不同的海底地形及底質將決定聲波入射角及反射角度，也決定聲波在底床之損失。由實際海底地形(RD)與假設海底是水平(RI)的音傳損耗曲線，根據他們的計算，所得到的偵測距離會相差10公里以上。若底質不同，則因底質密度與衰減係數不同，聲波的反射與吸收作用亦不同，會進一步造成聲波傳遞時之音傳損耗顯著差異。由此可知海床之地形與底床的性質對音傳損耗的影響很大。

不同於演訓所用之推演式電腦兵棋需要大批人員參與也僅能推演一次的性質，蒙地卡羅(Monte Carlo)模擬屬於分析性模式，可以在設定完畢後，不需人員參與其中的狀況下對設計的方案在想定中以隨機方式大量重複執行模擬與計算。《圖書館學與資訊科學大辭典⁶》對蒙地卡羅法的定義如下：蒙

註4：李政恩，陳琪芳，梁克新，〈海洋環境對聲納偵測效能及反潛搜索戰術之影響〉，《海軍學術月刊》，第42卷，第5期，2008年10月，頁97-105。

註5：王崇武，苑梅俊，楊政儒，陳琪芳，〈淺海海洋環境變化對聲納偵測效能影響之統計分析〉，《第26屆海洋工程研討會論文集》，臺北，2004年。

註6：胡述兆，《圖書館學與資訊科學大辭典》，新北市：國立編譯館，2006年。

地卡羅法是運用模擬(Simulation)方法來製造一種情境，從而比較各種不同決策之優劣，它最初是用於原子物理理論和經濟分析，藉統計學機率理論(Probability Theory)，再利用隨機數字機(Random Number Generator)以模擬出特殊的環境供人們衡量各個決策的好壞。蔡孝忠等⁷與鄭文吉⁸在實際運用上認為蒙地卡羅模擬是一重要的科學研究方法，廣泛應於數學、物理、化學、醫學與經濟等領域。研究人員可以利用電腦模擬一個接近實際或理想的想定，電腦提供亂數產生器產生大量的隨機亂數以針對不確定性或難解問題進行重複模擬。如此應用產生大量隨機亂數的模擬方法是基於大數法則的假設，重複(試驗)的次數愈多，所得結果就愈趨近理論值。利用電腦模擬，可以進行許多實境中難以操作或者無法進行的實驗，在軍事領域則如武器系統效能試驗(核彈、飛彈、魚雷…等)、戰術驗證與聯合作戰構想可行性或風險分析等。Thomas⁹在他的海軍研究院論文中指出美海軍目前對反潛作戰任務的計畫是運用多項分析工具進行，其中主動系統效能預測電腦系統(Active System Performance Estimate Computer Tool, ASPECT)協助P-3型反潛機最佳化其主動聲標搜索效能。當作戰計畫人員設計數種聲標佈設模式(如方格，圓形或「V」形之排列佈設)與拍

發率(決定這些主動聲標的拍發頻率與順序)所形成的可行方案後，ASPECT即使用蒙地卡羅模擬產生約500艘隨機出現的目標潛艦，針對每艘目標潛艦進行完整反潛任務的模擬包括：所佈設聲標群的位置以及各種組合的聲標拍發率。作戰計畫人員在ASPECT系統完成所有方案的模擬計算後，從中選出偵測率最高的方案做為此次任務計畫之主軸，依其進行計畫作業。Ascani¹⁰在作戰計畫中應用決策分析於地形分析的研究中運用機率分佈方式建立目標初始位置，但對於失去目標時的做法是發展一個目標失蹤想定，以最後目標位置為基礎，運用蒙地卡羅模式產生一個目標可能所在位置之總分佈並模擬目標可能位置的映射。

由模擬所計算出的平均效益指標(Measure Of Effectiveness, MOE)是針對模擬目的而定，如偵測率、命中率、油彈消耗率等。針對各方案，該數據會有差異，但眼見的差異是否真的有其嚴重性或影響，卻不得而知。因此需藉助統計分析方法進行平均數的相異性分析。例如，本研究藉模擬產生在RI與RD兩種聲納預測條件下的反潛艦對潛艦之平均偵測率，雖然有數值上的差異，但這樣的數值差異究竟有否顯著影響卻不得而知，所以對這些結果(平均偵測率)需要進行統計上的顯著性分析。這種分析稱為平均數的

註7：蔡孝忠，呂國臣，許乃寧，賈愛玫，〈蒙地卡羅法在颱風侵襲機率估計的應用〉，《大氣科學》，2011年9月，頁269-288。

註8：鄭文吉，〈漫談蒙地卡羅法的原理及其應用〉，《Research Bulletin of KDARES》，第23卷，第1期，2013年9月，頁26-41。

註9：A. J. Thomas, "Tri-level optimization for anti-submarine warfare mission planning," Naval Postgraduate School, Monterey, CA, USA, 2008.

註10：T. Ascani, "Decision analysis applied to terrain analysis for military planner," in International Symposium on Military Operational Research, New Mexico, USA, 1987.

變異數分析(ANalysis Of VAriance, ANOVA)，顧名思義就是藉由分析不同組資料的變異數來檢驗不同條件是否會造成不同結果。變異數分析其實就是F檢定¹¹的應用。其中，雙因子變異數分析(Two-way ANOVA)是考慮兩個因子對一變相可能產生的影響，如不同條件下對潛艦在不同速度時的偵測率影響。所需建立的虛無假設即是研究者所要檢定其正確性的假設，亦即假設各組的平均值都相等，如 $H_0: \mu_0 = \mu_1 = \dots = \mu_n$ ；對立假設為 H_1 ：不是所有 μ 都是相等。顯著水準則是當統計量出現的機率超過此一水準後，研究者就可以做以下判斷：參與比對的數據，其母體間有顯著的差異，進而推翻虛無假設，亦即各組平均值相異。檢定標準為 α 值小於0.05時推翻虛無假設，F值大於臨界值時則表示兩情況(組)間差異顯^{12、13}。

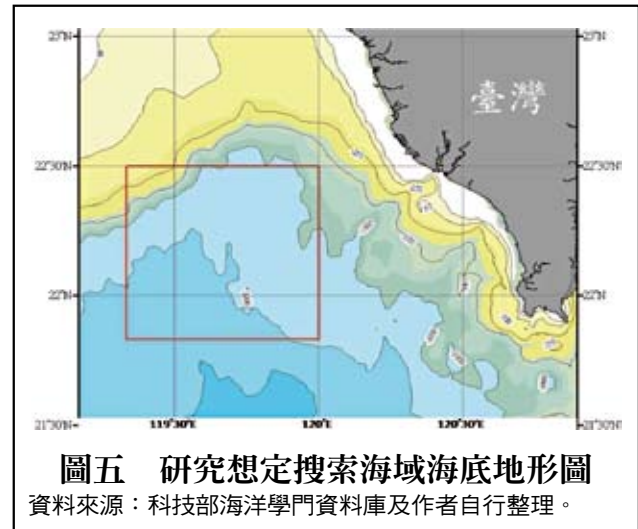
參、研究方法與模式建立

研究所使用的方法包括建立模擬模式進行反潛艦之偵測模擬，將模擬結果以統計方法進行差異性分析。

研究方法步驟如下：

- 步驟一、發展想定。
- 步驟二、建立蒙地卡羅模擬模式。
- 步驟三、提出反潛搜索可能案例。
- 步驟四、模擬與分析。
- 步驟五、統計分析。

一、發展想定



假設情資顯示臺灣西南近海海域有不明潛艦伏擊已久，海軍派具中頻聲納的反潛艦前往搜索，所劃定搜索海域為1,600平方哩(如圖五)。反潛艦無從得知潛艦確切位置，只能在該海域以隨機搜索方式進行反潛搜索。與大洋不同的是該海域海底地形、水溫等環境因素複雜，區域內的聲納偵距多變。潛艦只要發現反潛艦之偵潛，隨即選擇離開該水域之最短距離以靜音速率離開該危險區。

二、建立蒙地卡羅模擬模式

模擬上述想定所須思考戰術決策問題包括海域內不同小區域(小方格)的預測聲納偵距、潛艦位置之研判、反潛艦開始偵測之位置與隨機點之設定、潛艦離開該區域所需的時間等。本研究以發展的演算法為基礎建立反潛模擬模式，如反潛搜索演算法。

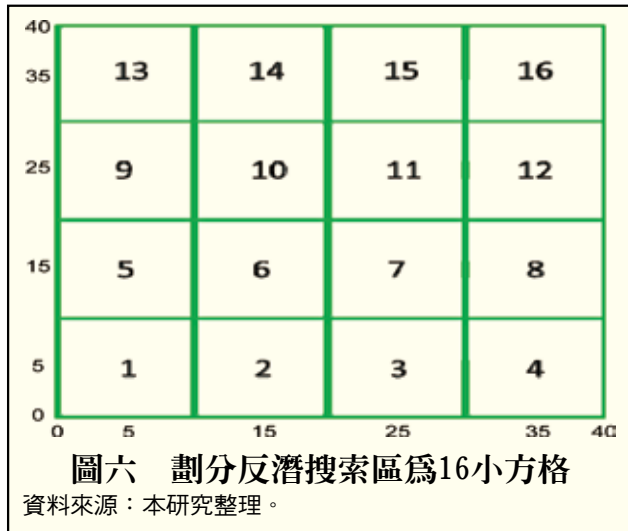
反潛搜索演算法：

1. 選擇海域。

註11：F檢定(F test)是1920年代由Ronald Fisher提出的統計方法。F test, t test和 χ^2 test是3個最常見的檢定。

註12：Keenan A. Pituch, Tiffany A. Whittaker, James P. Stevens, Intermediate Statistics: A Modern Approach, Third Edition, Routledge, 2015.

註13：T. W. Macfarland, Two-way Analysis of Variance, Springer Verlag, 2011.



2. 建立海域小方格編為數字。
 3. 運用聲納預測模式預測小方格內聲納偵距。
 4. 建立小方格間關係矩陣。
 5. 建立Monte Carlo模擬次數迴圈(執行千次模擬)。
 6. 取亂數建立反潛艦與潛艦座標。
 7. 計算潛艦離開危險區¹⁴時間(有效反潛作戰時間)。
 8. 建立水面艦在有效反潛作戰時間內隨機搜索的小方格迴圈(內迴圈)。
 - (1) 擷取各小方格所應對之聲納偵距。
 - (2) 計算反潛艦之累積偵測機率。
 9. 結束內迴圈。
 10. 結束模擬次數迴圈。
 11. 效益指標統計。
- 依據演算法之邏輯，將模式發展過程分述於下。

本研究以臺灣鄰近海域為例，建立

表一 各方格中心座標與該區之預測偵距(浬)

方格	座標		聲納偵距
	x	y	
1	5	5	0.38
2	15	5	0.50
3	25	5	0.50
4	35	5	0.50
5	5	15	2.04
6	15	15	1.29
7	25	15	0.79
8	35	15	0.50
9	5	25	2.05
10	15	25	2.01
11	25	25	1.59
12	35	25	0.93
13	5	35	2.58
14	15	35	2.56
15	25	35	2.81
16	35	35	2.00

資料來源：本研究整理。

40x40平方浬正方形反潛搜索區，分成16小方格，潛艦與反潛艦可以隨機方式選取初始位置，反潛艦則以隨機選取一個小方格作為下一個航向，如圖六。

在劃分完成的反潛搜索區，需要在各小方格內建立試驗之平均聲納偵距以利RD聲納預測之擷取，該平均聲納偵距參考梁克新[9]¹⁵之國科會補助專題研究成果，各方格之中心座標與聲納偵距如表一。

由於本研究所律定的反潛搜索方式以隨機為主(蛙跳戰術)，在模擬終了就必須建立下一個隨機的小方格，律定為鄰接的方格為主，所以建立方格關係矩陣是讓電腦可以發展出隨機搜索路徑，如表二。例如搜索起

註14：危險區所指的是潛艦推測反潛艦執行的反潛偵側區域。

註15：梁克新，海洋聲學整合計畫－海洋音響參數之量測、分析及應用－子計畫四：海洋環境參數與反潛作戰模式結合研究(II)，行政院國家學委員會補助研究計畫，NCS95-2623-7-158-001-D，民國96年3月29日。

表二 反潛搜索區方格關係矩陣

鄰接方格數量	起始方格	鄰接方格								
8	6	1	2	3	5	7	9	10	11	
	7	2	3	4	6	8	10	11	12	
	10	5	6	7	9	11	13	14	15	
	11	6	7	8	10	12	14	15	16	
5	2	1	3	5	6	7				
	3	2	4	6	7	8				
	5	1	2	6	9	10				
	8	3	4	7	11	12				
	9	5	6	10	13	14				
	12	7	8	11	15	16				
	14	9	10	11	13	15				
15	10	11	12	14	16					
3	1	2	5	6						
	4	3	7	8						
	13	9	10	14						
	16	11	12	15						

資料來源：本研究整理。

始位於方格8時，會擁有5個鄰接方格，包括(3, 4, 7, 11, 12)。這些方格都有機會成為下一個搜索目的地。

蒙地卡羅模擬分法是解決不確定性環境可能發生的變化問題，主要精神是利用電腦提供亂數產生器所產生亂數以隨機抽樣方式，重複進行多次¹⁶不確定性問題之實驗或計算。所選擇與研究對象不確定性行為接近之機率分佈會因性質之不同而相異，例如病患抵達醫院的間隔時間，其間隔時間變化的行為以指數機率分配表示。而本研究所模擬的潛艦位置，會出現在選定的海域內，因而可以將海域劃定大正方形區域，則形成一個(x, y)座標的數學表示法。模擬中，將所指定的海域轉化成以0為起點之座標，橫軸為

註16：以符合95%信心區間所需的樣本數做為模擬次數。

海域寬度，縱軸為長度。電腦則以均勻分佈亂數產生器產生均勻隨機亂數，形成潛艦的初始位置：(x, y)座標。反潛艦的位置產生方式與潛艦相同。用均勻分佈亂數產生器產生所有隨機點(小方格)之座標位置，例如，以式(1)之方式隨機取出1到16間之任一數字，

$$\text{Int}((\text{上界數值} - \text{下界數值} + 1) * \text{Rnd} + \text{下界數值}) \quad (1)$$

其中

Int：表示後方括弧內所產生的數值皆為整數

Rnd：為電腦程式之亂數產生函數

上界數值：隨機範圍之最大值

下界數值：隨機範圍之最小值

潛艦與反潛艦的初始位置即以式(1)產生，所產生的位置會經由比對方式取得該位置座標。由於反潛艦採隨機搜索(Random Search)，因而每一個搜索位置都以隨機方式產生。搜索是以漸進式隨機點方式作業，所以所產生的下一個隨機點皆為鄰近小方格。因此在設計上就必須根據反潛搜索區方格關係矩陣，將亂數所產生的隨機點做進一步之關係篩選處理，此部分以迴圈方式執行演算，選取下一個有鄰近關係的隨機點。

當獲取潛艦初始座標時，即計算其離開危險區所需時間，並律定此時間為反潛搜索有效時間(因為潛艦一旦離開此區域，則所有偵測率皆為0)。

依據反潛艦的航行速率與反潛搜索有效時間，可以求取有效的隨機點數量。而各個隨機點所在海域的聲納偵距皆不同，必須擷

表三 案例(反潛艦數量與潛艦速率)

案例	反潛艦(艘)	潛艦速率(節)
1	1	3
2	1	6
3	1	9
4	2	3
5	2	6
6	2	9

資料來源：本研究整理。

取屬於各該隨機點的聲納偵距。

當重要數據皆備妥時，即可運用搜索模式進行每個有效隨機點的隨機偵測率計算。隨機搜索模式如下，

$$p(x) = 1 - \exp\left(-\frac{W \cdot x}{A}\right) \quad (2)$$

式(2)又稱為庫普曼隨機搜索模式(Koopman's Random Search Formula)。其中，W代表掃幅寬度，為2倍聲納偵距；x則是相同聲納偵距所航行的距離；A則代表所需搜索的完整海域。

所求出的所有偵測率皆以累積方式儲存，當完成所有次數的模擬後，即進行統計，將所儲存的累積偵測率除以模擬次數即可獲得反潛艦對潛艦的偵測率。偵測率即為本研究的效益指標(Measure Of Effectiveness, MOE)，以指標進行個案例之比較與分析。

三、提出反潛搜索可能案例

本研究主要目的，在比較RI與RD兩種不同聲納預測法所產生之作戰效益差異。為利於進行反潛偵測在兩種聲納預測法作業結果之比較，取我國鄰近某海域，指定40x40平方浬模擬區，以反潛艦數量與潛艦速率之組合建立6個案例，如表三。

四、模擬與分析

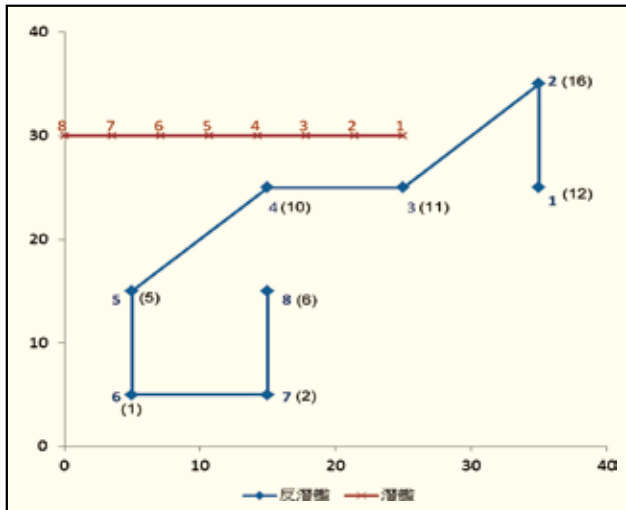
(一)以案例一模擬1次之作業結果說明

潛艦速率為3節時，模式隨機取得的位置為小方格11，設定向左是離開反潛偵蒐區的方向，則最近距為垂直於左側邊之直線，此時為25浬，脫離總時間為8.33小時(亦稱為有效反潛搜索時間)。在此時間內，反潛艦從隨機起始到最後的有效搜索之隨機小方格，依序為：12-16-11-10-5-1-2-6，參考圖七與圖八。反潛艦隨機選取方隔間格距離(浬)分別為(10, 14.14, 10, 14.14, 10, 10, 10)。當反潛艦抵達方格12時開始反潛搜索，所獲得的聲納預測距離(浬)依所在方格而不同，分別為(0.93, 2, 1.59, 2, 2.04, 0.38, 0.5, 1.29)。

依據1,000次模擬，雙方起始位置與反潛艦隨機航線皆不同狀況下，所模擬之偵測潛艦成功率亦不同，將累計結果取平均值即為所獲之成功偵測潛艦之期望機率。

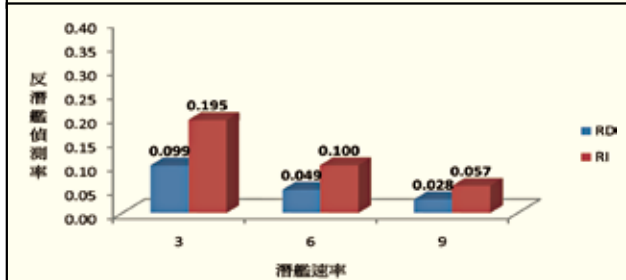
(二)模擬千次之MOE分析

為比較RD與RI間的相異性，聲納偵測距離之取樣兩者不同，RD以小方格內定義之數據為主，如表一；RI則以單一偵測距離為主，本研究律定為3浬。同時，為對潛艦逃離速度進行顯著性分析，假定潛艦以不同速率(節)離開現場，設為(3, 6, 9)。經模擬後以反潛艦x1執行反潛搜索的平均偵測率如圖九，RD與RI間之差異在潛艦速率為3, 6, 9節時分別為0.095, 0.051, 0.029。兩者間的差異在統計上是否顯著，則須藉由變異數分析方式執行計算。若以反潛艦x2執行反潛搜索，效果較佳，如圖十。



圖七 隨機模擬一次之反潛艦與潛艦航行位置圖(1-7為隨時間之航行軌跡)

資料來源：本研究整理。



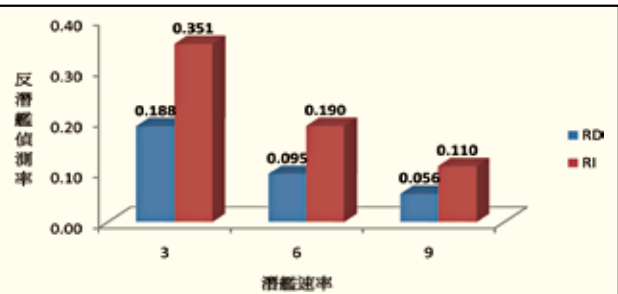
圖八 模擬之統計值-反潛艦x1使用10節速率時之偵測率(潛艦速率分別為3、6、9節)

資料來源：本研究整理。

就數據表面解讀，RD與RI具有差異性，而且與反潛艦速率成反比關係。但數字上如此微小的差距是否就代表差異不顯著或者在統計上可以將之忽略而是為相等，亦即RD與RI兩種聲納預測的結果在比較上是沒有差別？為了進一步求證，本研究運用統計上之ANOVA執行RD與RI之差異性分析。

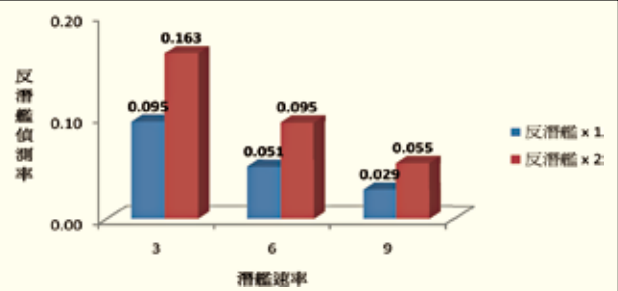
五、統計分析

以反潛艦x1之模擬結果，進行反潛偵蒐



圖九 模擬之統計值-反潛艦x2 使用10節速率時之偵測率(潛艦速率分別為3、6、9節)

資料來源：本研究整理。



圖十 不同反潛兵力執行反潛搜索下RD與RI之差異性

資料來源：本研究整理。

之變異數分析，主要目的在於分辨出RD與RI是否具有統計上的差異，同時也對不同潛艦速率是否產生影響以及潛艦速率與聲納預測法是否有交互作用進行分析。所提出之問題與律定的假設(虛無假設為 H_0 ，對立假設為 H_1)如后。

問題1. 不同聲納預測法是否對偵測率產生影響

H_0 ：反潛艦使用RD之平均偵測率=反潛艦使用RI之平均偵測率

H_1 ：反潛艦使用RD之平均偵測率 \neq 反潛艦使用RI之平均偵測率

問題2. 不同潛艦速率是否產生影響

H_0 ：潛艦3節時被偵測平均機率=潛艦6

表四 以1艘反潛艦執行反潛偵蒐之變異數分析

ANOVA						
變異來源	平方和 (SS)	自由度	均方和 (MS)	F	P-值	臨界值
模擬出之偵測率	1.20	2	0.60	153.31	2.06E-54	3.01
聲納預測法	0.69	1	0.69	175.08	3.27E-35	3.86
交互作用	0.22	2	0.11	27.79	2.89E-12	3.01
組內	2.33	594	0.0039			
總和	4.44	599				

資料來源：本研究整理。

節時被偵測平均機率=潛艦9節時被偵測平均機率

H_1 ：潛艦在3種不同速率下，有任兩者被偵測平均機率不相等

問題3. 偵測率與聲納預測法間是否有交互作用

H_0 ：模擬出之偵測率與聲納預測法間無交互作用

H_1 ：模擬出之偵測率與聲納預測法間有交互作用

取反潛艦x1所模擬出之偵測率共300個樣本，以雙因子變異數分析(重複試驗)進行分析，所使用數據為系統模擬反潛艦在潛艦的3種速率下使用RD與RI兩種方法之結果，取95%信心水準， α 值為0.05。經分析，所得數結果(如表四)。表四中反潛艦使用之聲納預測法，分別為RD與RI；「交互作用」指的是模擬出之偵測率與聲納預測法之間的交互作用。上述三個問題的關鍵分析將視ANOVA表中的P值而定，若P值小於0.05(α 值)，則推翻虛無假設 H_0 ，否則就接受該假設；F值若大於臨界值，則RD與RI間之差異性顯著。分析結果分述如下：

問題1：不同聲納預測法是否對偵測率

產生影響

ANOVA所獲之P值為 3.27×10^{-35} ，遠小於0.05，結果推翻虛無假設 H_0 ，意即反潛艦使用RD所獲得的平均偵測率與使用RI所獲得的平均偵測率有非常顯著的不同。因F值為175.0778，遠大於臨界值3.85761，表示RD與RI結果有顯著性差異，亦強化上述結果。P與F值均說明不同聲納預測法會對偵測率產生影響。

問題2：不同潛艦速率是否產生影響

ANOVA所獲之P值為 2.06×10^{-54} ，遠小於0.05，結果推翻虛無假設 H_0 ，意即潛艦在不同速率時會對反潛艦的偵測效果產生顯著性的不同。因F值為153.31，遠大於臨界值3.01，表示潛艦在不同速率時反潛艦之偵測效果受影響程度之差異性極大。P與F值均說明不同潛艦速率會對反潛艦的偵測效果產生影響。

問題3：偵測率與聲納預測法間是否有交互作用

ANOVA所獲之P值為 2.89×10^{-12} ，小於0.05，結果推翻虛無假設 H_0 ，意即偵測率與聲納預測法間具有顯著性的交互作用，意即偵測率的高低會影響任何一種聲納預測法所

獲的偵測效果。因F值為27.79，大於臨界值3.01，亦支持上述推翻虛無假設。P與F值均說明偵測率與聲納預測法間具有交互作用。

肆、結語

反潛作戰是難度最高之一的作戰形態，在接戰目標前有很長的一段時間是要費盡心機與一切手段去克服目標偵測的障礙，那就是變化多端的海洋環境因素。美軍自二戰以來的反潛作戰皆以大洋為主，對濱海區域的反潛卻長期忽視，導致美式載台與系統難以在此一區域搶佔優勢。學術科研界對濱海區域雖發展各種理論與實際海洋測量數據，但結合實際反潛戰術的效益分析卻未見於相關文獻。本研究針對反潛作戰之聲納效能預測方法建立蒙地卡羅模擬模式，發展戰術階層想定與案例，以大量重複模擬方式求算大洋反潛作戰使用的RI與濱海所用的RD兩聲納預測法之作戰效益，並以統計(ANOVA)進行兩者差異性評估。所得作戰效益數據分析結果顯示，反潛艦執行反潛搜索時使用RD與RI兩模式於濱海區域所產生之平均偵測率具有統計上顯著性的不同，不同潛艦速率會對反潛艦的偵測效果產生顯著影響，偵測率與聲納預測法間具有交互作用。以上結果亦以模擬之作戰數據支持了王崇武、Beauchamp與TNO等研究人員與單位所提出之理論與試驗。臺灣周邊海域不僅流系複雜，海底地形與底質的相異性也高，在一個以防禦型為主的國防戰略思維以及水文條件有利於防禦方情況下，我國必須正視並持續強化對我國濱海區域的科學數據蒐集，運用自主研发的海洋RD模

式(如ASORPS)以精進聲納預測效能，才能提升反潛作戰之實質效益。

本研究對反潛搜索之聲納預測方法運用作業研究之蒙地卡羅模擬與ANOVA量化RD與RI的聲納效能與相異性評估，證實以作業研究對不確定性或難以實際作業的實境之探討能夠提出科學數據並加以分析，也可以根據新的證據或蛛絲馬跡提出新想定與可行方案，重複進行大量的模擬作業，以量化之分析結果作為施政或決策參據。如美軍執反潛行任務前必以多種模式進行多方案的量化評估，揀選其中最佳方案做為任務計畫發展的主軸。在國防資源逐漸不足的情況下，如何以減低風險、提升效能與節約成本執行既定任務，宜參照美軍作法，針對各種任務發展量化模式與標準作業程序，以利在執行任務前就多次模擬或重複思考可行方案，此舉不但可減少參謀負擔、避免失誤並可提升整體效益，亦符合孫子所云「多算勝，少算不勝，而況於無算乎」的精神。 ↓

作者簡介：

彭巧明上校，海軍官校79年班，國防大學理工學院兵器系統工程碩士，臺灣大學工程科學及海洋工程研究所博士候選人，現服務於海軍131艦隊。

王貴民先生，備役海軍上校，海軍官校70年班，美國海軍工程研究院作業研(OR)究碩士，淡江大學資訊工程博士，現服務於實踐大學高雄校區資訊管理系(通信聯絡者)。

陳琪芳女士，現任臺灣大學海洋科學中心主任、臺灣大學工程科學及海洋工程研究所教授。

中萬軍艦 LST-229

中萬艦裝有12汽缸二衝程之柴油主機兩部，推進器為雙俾葉推動馬達1800匹，是一戰車登陸艦，由美國Missouri Valley Bridge & I Co.所建造，在美海軍服役時原名為「Duker County」，編號為LST-1050，於公元1944年完工下水，並成軍服勤。

民國47年美國同意根據中美共同防禦條約將該艦借贈我國後，我海軍於該年9月1日成立接艦之編制，16日於沖繩之那霸港接收該艦，並命名為「中萬」，編號 229，同年9月21日駛抵左營基地，隨即納編登陸艦隊，擔任金門砲戰期間之運補任務。至民國48年3月1日正式成軍編制，正式服勤。

該艦於接收時並無任何武器裝備，後來為因應「八二三」砲戰期間運補任務的需要，而於民國48年6月底加以武裝。至民國56年，由於該艦齡已逾廿年，艦體鋼板損蝕甚劇，遂於該年執行「新中計畫」，更換艦體損蝕之鋼板，並整修及更換部分機件與裝備，民國57年初整修完成，經多次測試及缺點改進後，出廠複訓完畢，繼續服勤。至民國75年，由於情勢改變，運補任務逐漸減少，中字型之艦隻已呈過剩的現象，而於民國79年3月16日作簡易封存，以便將來若有任務需要時，仍能啟封使用。（取材自老軍艦的故事）

