

特定頻率於新穎船艦之雷達反射截面積研究分析

Research on Radar Cross-Section of Specific Frequency in Novel destroyer

廖家德

Chia-Te Liao

空軍航空技術學院航空通訊電子系 助理教授

Department of Aeronautical Communication and Electronics, Air Force Institute of Technology

摘要

本研究以美軍DDG-1000驅逐艦為主體，以400MHz為中心頻率於此款具匿蹤船艦之雷達反射截面積進行研究探討，通過矩量法(Method of Moments)理論建立模型和數值模擬運算來獲得新型船艦的各項電磁參數，於船艦右側面入射平面波，演算時搭配使用積分方程中的多層快速多極子方法(MLFMM)來達到加速數據收斂的效果，研究發現電場反射能量在船艏V型結構產生繞射現象，另外在指揮塔內斜角結構設計，產生反射能量波均斜向能量遞減進入海平面，在船艦-45度時雷達反射截面積最大為82.7dBsm，相關所得結果可以做為國艦國造之重要參考依據。

關鍵字：雷達反射截面積(RCS)、新穎船艦、快速多極子法、矩量法(MoM)、近場/遠場特性

Abstract

This research takes the US military DDG-1000 destroyer as the main body of research. The radar cross section (RCS) of this concealed ship has been studied and discussed with the center frequency of 400MHz. The model and numerical simulation are established through the Method of Moments (MoM) theory. The electromagnetic parameters of the novel ship are obtained. The plane wave has been incident on the right side of the ship, and the multi-layer fast multipole method (MLFMM) in the integral equation has been used in the calculation to accelerate the data convergence. The research has found that the electric field reflection energy has been diffracted in the V-shaped structure of the bow. The oblique angle structure design in the control tower has produced reflected energy and decreased into the sea level. The maximum radar reflection cross section was 82.7dBsm (ship angle $= -45^{\circ}$). The relevant results can be used as an important reference for national shipbuilding.

Keywords: Radar cross section(RCS), Multilevel Fast Multipole Method, (MLFMM), Method of Moments(MoM), Near/Far-field characteristic.

一、前言

國造船艦在外型設計上必須考量降低雷達反射截面積，否則易被空中巡邏的預警機(Airborne Warning and Control System)雷達所偵測，進而發射遠程反潛火箭(Anti Submarine Rocket)或魚雷進行攻擊，而船艦的雷達反射

截面積固然可以通過測量來獲得，但國內目前並沒有建置相關量測場域，且量測上要求昂貴的設備與合適的量測環境，需要耗費大量的人力、物力和財力(成本代價高)，本案著重點以特定頻率於新穎船艦之雷達反射截面積進行研究分析，通過理論建立模型和數值

模擬運算來先行獲得新型船艦的雷達反射截面積，相較於實際量測建置與作業，顯得更加容易、方便與價廉(成本代價高)，隨著計算電磁學的發展和計算機運算能力的迅速提升，目標與環境電磁散射特性的理論建立模型和數值運算能力有了飛速提高，大大促進了電氣尺寸大目標(航空器、船艦...等)的電磁散射求解能力，隨著雷達技術、匿蹤與反匿蹤技術不斷的發展，對目標電磁散射特性的建立模型技術上也出現許多挑戰性的課題，包含複雜結構(含邊緣、腔體、隙縫、尖頂等)、複雜結構(介質或金屬介質複合)、寬頻帶發射源、雙站/多站探測、複雜隨機粗糙面的散射...等，都需要國內建置與培養各種分析和計算方法，對國艦國造任務有著不可替代的重要性。

本文重點在於研究分析國際間現階段具低雷達反射截面積(Radar cross section,RCS)之船艦，也就是俗稱具有匿蹤效果的海上軍事載具，又以分析美國 DDX 開發專案中的 DDG-1000 船艦[1]為主體，此載具設計為具有多任務功能的濱海戰鬥艦，第一艘艦以海軍上將艾爾默·朱瓦特命名，又稱為朱瓦特級驅逐艦，目前尚在服役中，排水量為 14,564 噸，全長 183 公尺、全寬 24.6 公尺，最高速度可達 30 節(約每小時 56 公里)，配置有電子式掃描陣列雷達，及多款武器系統，並具有艦載機功能，最多可停靠 2 台反潛直升機，因為外型上採用斜角式船舷，而且從水線上開始傾斜，最重要的是在上層結構可以發現不管是通信天線、雷達天線都採用內藏式或是貼附式設計，為的就是降低雷達反射截面積，本研究以此新穎且具匿蹤特性船艦為目標，分別探討各項電磁參數，可作為日後國艦國造工作參據使用。

二、分析理論基礎與模型場景

因為本研究針對特定頻率於新穎船艦之雷達反射截面積研究，當中需針對目標散射和輻射問題求解，首先要針對問題建立合適的積分方程，然後才能進行離散和數值求解，針對不同的問題，積分方程形式也會有所不同，與實際物理問題密切相關，若對均勻介

質和理想導體目標，根據表面等效原理和唯一性原理，只需要在目標表面建立方程，就可以唯一確定特訂區域中的場，也就是建立目標表面積分方程，這時後，只要對積分方程在目標表面進行離散。但對於非均勻介質目標，無法通過表面等效原理進行簡化，需要在整個介質區域內應用體等效原理，建立目標體積分方程[2]。

因為矩量法(Method of Moments)屬於加權餘量法的一種，不同的技術領域有不同定義，在電磁計算領域中矩量法指離散積分方程，也就是當方程式中運算子為積分方程運算子方程式時，該方法稱為矩量法，求解電磁問題的矩量法過程可以表現為圖 1 所示。

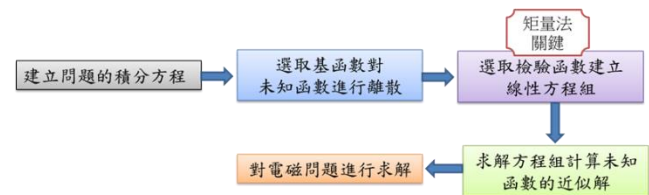


圖 1 矩量法求解電磁散射問題步驟

此時矩量法就必須要在整個介質區域進行體積分離散。以下針對導體目標、均勻介質目標的表面積分方程進行討論，由電磁波解的積分方程[3-7]，當中 Stratton-Chu 積分公式可知，由 ΣS 包圍的均勻介質封閉空間 V 內任意一點的電場和磁場可表示為：

$$\begin{aligned}
 E(r) = \int_V \left[-j\omega\mu J(r_0)G - M(r_0) \times \nabla' G \right. \\
 \left. + \frac{\rho(r_0)}{\epsilon} \nabla' G \right] dv_0 + \\
 \int_{\Sigma S} \left[-j\omega\mu(\hat{n}' \times H(r'))G + (\hat{n}' \times E(r')) \right. \\
 \left. \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot E(r'))\nabla' G \right] dS' \\
 \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H(r) = \int_V \left[-j\omega\mu M(r_0)G - J(r_0) \times \nabla' G \right. \\
 \left. + \frac{m(r_0)}{\mu} \nabla' G \right] dv_0 +
 \end{aligned}$$

$$\int_{\Sigma S} [j\omega\mu(\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}'))G + (\hat{n}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}')) \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}'))\nabla' G] dS' \dots\dots\dots(2)$$

式中的 $\hat{n}'$ 為目標表面 ΣS 上積分原點 $\mathbf{r}'$ 處指向區域 V 的單位向量，而 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 為區域 V 內 $\mathbf{r}$ 點處的電場和磁場， $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{M}$ 分別為區域內和表面上的電流和磁流， ρ 和 $\mathbf{m}$ 分別為區域內的自由電荷和磁荷， $\mathbf{r}_0$ 為區域 V 內體積源內的積分源， ϵ 和 μ 為區域內介電常數和磁導率， $G = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$ 為區域內的 Green's function， $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ 為區域內的波數。當 $\mathbf{r}$ 點位於積分表面時，積分存在奇異點(singularity)，經過奇異處理後的統一表達式為式 3、式 4:

$$E(\mathbf{r}) = T \int_V \left[-j\omega\mu \mathbf{J}(\mathbf{r}_0)G - \mathbf{M}(\mathbf{r}_0) \times \nabla' G + \frac{\rho(\mathbf{r}_0)}{\epsilon} \nabla' G \right] dv_0 + T \int_{\Sigma S-r} [-j\omega\mu(\hat{n}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}'))G + (\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}'))\nabla' G] dS' \dots\dots\dots(3)$$

$$E(\mathbf{r}) = T \int_V \left[-j\omega\mu \mathbf{M}(\mathbf{r}_0)G - \mathbf{J}(\mathbf{r}_0) \times \nabla' G + \frac{\mathbf{m}(\mathbf{r}_0)}{\mu} \nabla' G \right] dv_0 + T \int_{\Sigma S-r} [j\omega\mu(\hat{n}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}'))G + (\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}'))\nabla' G] dS' \dots\dots\dots(4)$$

式 3、式 4 當中

$$T = \begin{cases} \frac{1}{1-\Omega/4\pi} & (\mathbf{r} \in \Sigma S) \\ 1 & (\mathbf{r} \notin \Sigma S) \end{cases}$$

其中 Ω 表示積分源點處的立體角，特別當區面為光滑曲面時 $\Omega=2\pi$ ， T 表示在目標表面 ΣS

上的柯西主值積分，即除去 $\mathbf{r}$ 點後的整個表面的積分，當場點 $\mathbf{r}$ 不在目標表面 ΣS 時， $\int_{\Sigma S-r}$ 退化為 $\int_{\Sigma S}$ ，通過式 3、式 4 的觀察，可以發現，對無界區域而言，公式右側的體積分實際上就是目標的入射場，在無源區域，體積分為零。因此，對於電磁散射問題，式 3、式 4 可以簡化為:

$$E(\mathbf{r}) = TE^i + T \int_{\Sigma S} [-j\omega\mu (\hat{n}' \times \mathbf{H}(\mathbf{r}'))G + (\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}'))\nabla' G] dS' \dots\dots\dots(5)$$

$$H(\mathbf{r}) = TH^i + T \int_{\Sigma S} [-j\omega\epsilon(\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}'))G + (\hat{n}' \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')) \times \nabla' G + (\hat{n}' \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}'))\nabla' G] dS' \dots\dots\dots(6)$$

式 5、式 6 即為電磁場積分方程的統一表達式，對不同的主題，由於邊界條件有所不同，方程式可以進行相應的簡化，其中理想導體目標的表面積分方程，如圖 2 所示，入射波 (E^i, H^i) 入射到由曲面 S 包圍的理想導體上， $\hat{n}$ 表示導體向外的單位法線向量， (ϵ, μ) 表示導體外部空間介質的介電常數和磁導率。

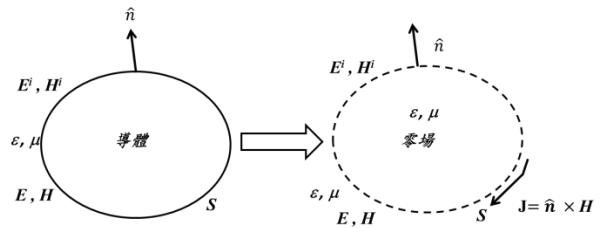


圖 2 電磁波入射到導體目標

本研究使用 Altair FEKO 電磁模擬軟體[7]考量運算主機效能上限，與運算時間，尤其在電器尺寸大時，扣除模型網格修調與演算法設定時間，平均模擬時間單次最少需 200~300 小時(約 1~2 週)的運算時間，本研究考量船艦側面可初步解析船艦結構電磁反射特性，下一節將以模擬運算結果進行分析與探討。

三、結果分析與探討

在本研究中，設定入射波 Magnitude 為 1V/m ，頻率為 400MHz ，極化(Polarisation)為線性極化波，藍色箭頭表示入射波方向，紅色箭頭表示極化方向(垂直極化)，入射角度為從船艦右側方向入射船艦(入射角度為 $\text{Theta}=45^\circ$ ， $\text{Phi}=0^\circ$)，此為考量岸置雷達站高度均高於海平面，故入射雷達波傳播至船艦需為由上而下的角度入射，如圖 3 所示，首先在不同二維平面觀察並擷取電磁參數中的近場(near-Field)值[9-17]，在圖 4 中可以觀察 XY 平面之近場分佈圖，從船艦右側可以發現反射能量(黃色階，約 2.2V/m)在不同船艦部位有不同的趨勢現象，在船艙部份可以發現其斜角 V 型結構，可以發現電場能量幾乎在表面繞射(diffraction)，且反射能量(黃綠色階，約 $1.8\sim 2.2\text{V/m}$)往不同方向散射，在船艦中段部分因指揮塔結構與往內斜角設計，在垂直方向為相對較高的結構，所以電場反射能量均往指揮塔集中，相對另一側(船艦左側)就產生雷達陰影區(Radar shadow)，雖然能量以相對較弱(藍色色階，約 0.2V/m)，接下來在 XZ 平面觀察近場分佈圖，如圖 5 所示，此時已經將高度(Z 軸)方向的反射能量分佈納入觀察，可以呼應圖 4，船艦中段指揮塔結構反射能量較強，同時也可以發現另一個特殊的電磁反射趨勢，也就是反射的能量波均斜向進入海平面，並非原入射方面的反射，藉此可知，將大大的降低雷達反射截面積[18-23]，最後透過觀察 YZ 平面之近場分佈圖(如圖 6)，此時將 Y 軸的反射能量也納入觀察，當中能量分佈較平均(綠色色階，約 1.5V/m)，其中在船艦結構轉角處亦可以發現有衍射現象，這是入射波因結構特性產生障礙目標，將電磁波反射路徑往側向或是背向傳播，上述分析是

屬於電場分佈分析，接下來將考量體積內儲存的反射能量密度(energy density)，並將時間參數納入，形成 Poynting vector，也就是反射能量流以每平方米為單位(W/m^2)，可以將其視為電磁能量在時間軸上流動的向量，在圖 7 觀察，可發現在 +X 軸方向反射能量逐漸遞減並鎖小區域，在圖 8 中觀察，反射能量約 $-27\text{dBm/m}^2\sim -30\text{dBm/m}^2$ ，能量強度往 +XZ 方向逐漸遞減，最後在圖 9 觀察，能量流方向在 Y 軸方向線性分佈，同時亦可發現從船艙開始前方的武器結構、指揮塔結構邊緣、船艦尾部結構高度落差邊緣，均可以發現有邊緣能量流增強的趨勢，約從 -30dBm/m^2 增強至 -24dBm/m^2 ，總結上述各項分析數據，可以彙整為最終雷達反射截面積結果，圖 10 為 XY 平面雷達反射截面積分佈圖，圖 11 XZ 平面雷達反射截面積分佈圖，圖 12 YZ 平面雷達反射截面積分佈圖，並合成為三維(3D)雷達反射截面積分佈圖，可發現在船艦右側 -45° 度時，雷達反射截面積強度達到 82.7dBsm ，在船艦左側約 20° 度時，雷達反射截面積強度為 56dBsm ，其餘角度強度皆小於 50dBsm (如圖 13 所示)。

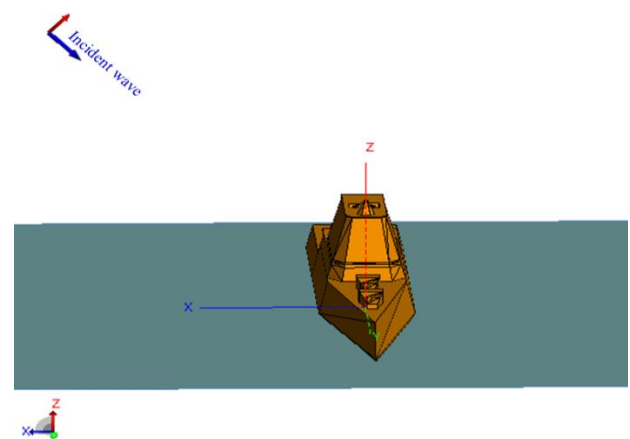


圖 3 船艦右側入射波角度場景示意圖

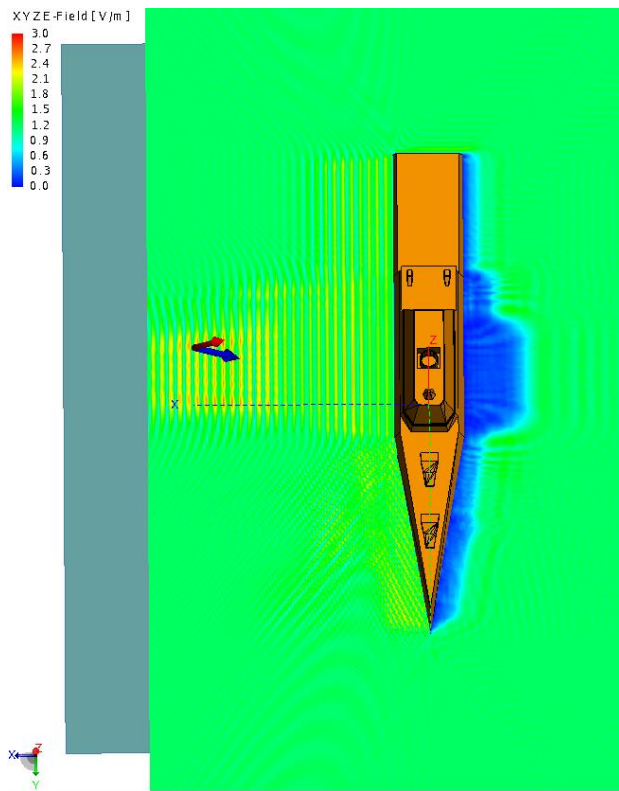


圖 4 反射截面積於 XY 平面之近場分佈圖

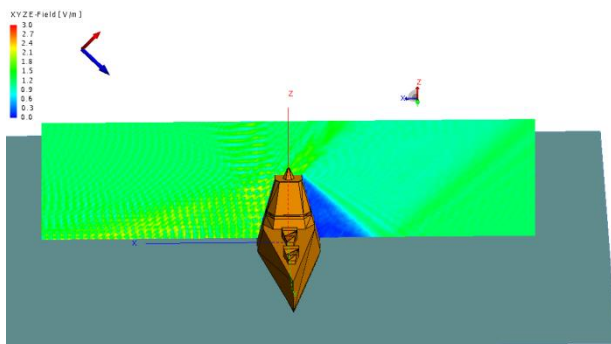


圖 5 反射截面積於 XZ 平面之近場分佈圖

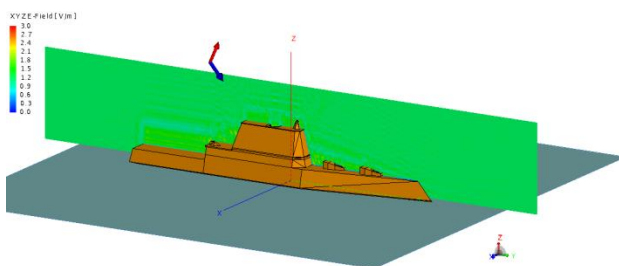


圖 6 反射截面積於 YZ 平面之近場分佈圖

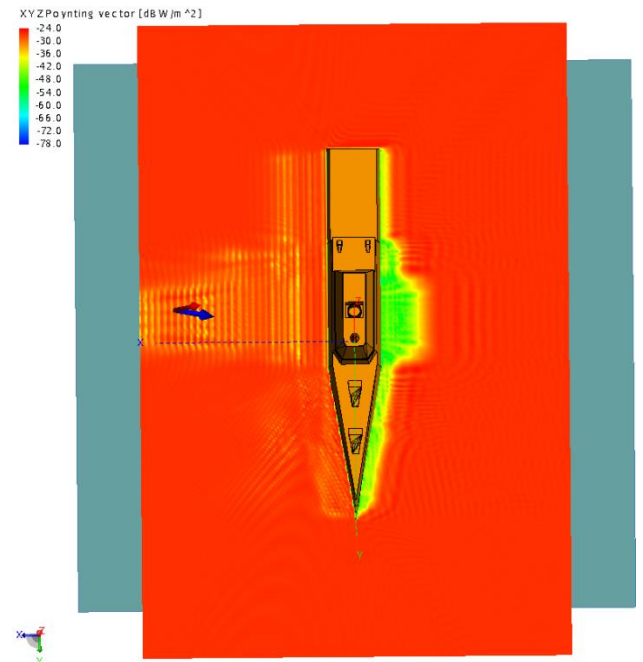


圖 7 XY 平面之 Poynting vector 分佈圖

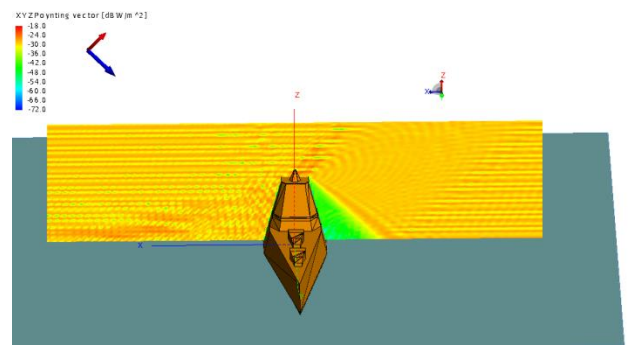


圖 8 XZ 平面之 Poynting vector 分佈圖

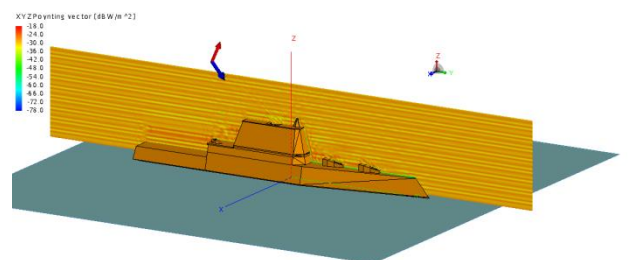


圖 9 YZ 平面之 Poynting vector 分佈圖

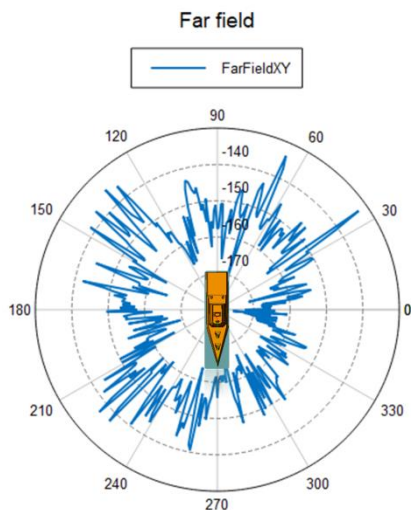


圖 10 XY 平面雷達反射截面積分佈圖

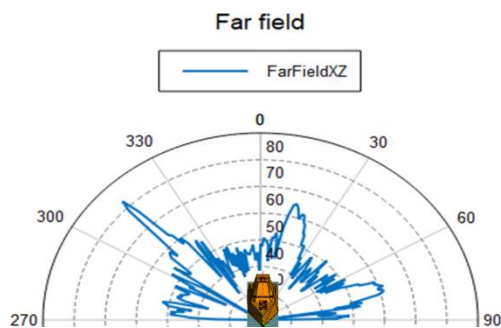


圖 11 XZ 平面雷達反射截面積分佈圖

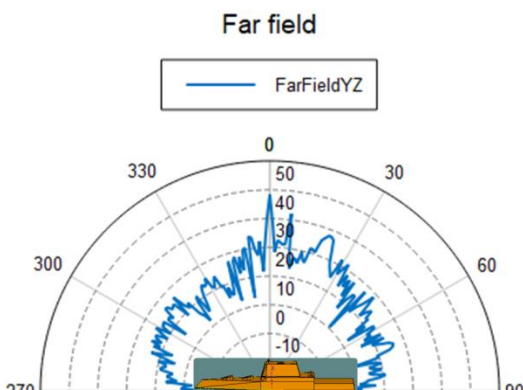


圖 12 YZ 平面雷達反射截面積分佈圖

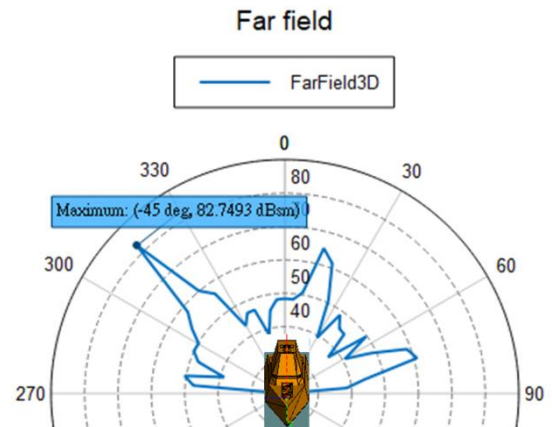


圖 13 三維合成(3D)雷達反射截面積分佈圖

四、結論

船艦設計時經常首重船體外型設計，本研究以美軍現役DDX專案中的新穎驅逐艦為主體，探討其特殊結構造型對雷達反射截面積之影響，以 400MHz 為入射電磁波頻率，分別反射電場分佈可發現在 XY 平面約 2.2V/m，在船艙 V 型結構表面產生繞射(diffraction)現象，反射近場能量約 1.8V/m，綜合來說，船艙特殊 V 型結構配合傾角指揮塔外型，整體雷達反射截面積最大為船艦右側達 82.7dBsm，而指揮塔結構最上方為平面結構，造成在船艦左側 20 度產生第二個反射強點(56dBsm)，但船艦其餘角度 RCS 皆小於 50dBsm，相關數據與分析結果希望在國艦國造任務上提供微薄的貢獻。

參考文獻

- [1] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", 3rd Edition, pp. 291.
- [2] Akira Ishimaru, "Radiation from Apertures and Beam Waves," in *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering: From Fundamentals to Applications*, IEEE, 2017, pp.169-200
- [3] J. Lee, T. Song, J. Du and J. Yook,

- "Near-field to far-field transformation based on stratton-chu fomula for EMC measurements," *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Orlando, FL, 2013, pp. 606-607.
- [4] C. Fang, XinYang Shi, DongAn Song, Liang Cheng, Yang Xu and Z. Ding, "Two atypical methods for ship RCS measurement with the laser and the acoustic wave technique," *2009 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Xian, 2009, pp. 276-280.
- [5] H. Q. Sun *et al.*, "Optimization Design of Ship RCS Reduction Based On Genetic Algorithm," *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, Beijing, China, 2018, pp. 1-2.
- [6] A. Dzvonkovskaya and H. Rohling, "Cargo ship RCS estimation based on HF radar measurements," *11-th INTERNATIONAL RADAR SYMPOSIUM*, Vilnius, 2010, pp. 1-4.
- [7] F. S. de Adana, I. Gonzalez, O. Gutierrez and M. F. Catedra, "Asymptotic method for analysis of RCS of arbitrary targets composed by dielectric and/or magnetic materials," in *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, vol. 150, no. 5, pp. 375-378.
- [8] O. Tulgar and A. Arif Ergin, "Improved Pencil Back-Projection Method with Image Segmentation for Far-Field/Near-Field SAR Imaging and RCS Extraction," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2572-2584
- [9] Z. Deng, F. Wang, Y. Ren, K. Li and B. Gao, "A Novel Wideband Low-RCS Reflector by Hexagon Polarization Rotation Surfaces," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 131527-131533.
- [10] B. Wu and X. Sheng, "A Complex Image Reduction Technique Using Genetic Algorithm for the MoM Solution of Half-Space MPIE," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3727-3731, Aug. 2015.
- [11] M. Ritchie, A. Stove, K. Woodbridge and H. Griffiths, "Monostatic and bistatic sea clutter texture and doppler spectra characterisation at S band," *IEEE Trans. Geoscience & Remote sensing*, vol. 54, pp.5533-5543, September 2016.
- [12] W. C. Chew, J. Jin, E. Michielssen, and J. Song, Eds., *Fast and Efficient Algorithms*
- [13] W. C. Chew, J. Jin, E. Michielssen, and J. Song, Eds., *Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics*. New York: Artech House, 2001.
- [14] A. G. Stove, M. S. Gashinova, S. Hristov and M. Cherniakov, M., "Passive maritime surveillance using satellite communication signals," *IEEE Trans. Aerospace & Electron. Sys* .vol 53, pp.2987-2997, December 2017.
- [15] I. Kim, S. Xu and Y. Rahmat-Samii, "Generalised correction to the friis formula:

- quick determination of the coupling in the fresnel region," in *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 13, pp. 1092-1101, 22 October 2013.
- [16] E. F. Knott, "Radar Cross Section," in *Radar Handbook*, 2nd ed., M. I. Skolnik, Ed., McGraw-Hill, 1990.
- [17] S. Rahman and D. A. Robertson, "In-flight RCS measurements of drones and birds at K-band and W-band," in *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 2, pp. 300-309, 2 2019.
- [18] S. Nagayama, T. Sasao, and J. T. Butler, "Numerical Function Generators Using BilinearInterpolation," *Field Programmable Logic and Applications*, 2008, pp. 463-467.
- [19] L. Riide and B. Westergren, *Mathematics Handbook for Science and Engineering*, Fifth Edition, Lund, Studentlitteratur, 2003, p. 481-500.
- [20] W.-D Li, H.-X Zhou, 1. Hu, Z. Song, and W. Hong, "Accuracy Improvement of Cubic Polynomial Inter/Extrapolation of MoM Matrices by Optimizing Frequency Samples," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, August 2011, pp. 888-891.
- [21] C. Vasanelli, F. Bgelsack, and C. Waldschmidt, "Reducing the radar cross section of microstrip arrays using AMC structures for the vehicle integration of automotive radars," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 3, pp. 1456-1464, Mar. 2018.
- [22] <http://www.feko.info/>
- [23] 維基百科，朱瓦特級驅逐艦，
<https://reurl.cc/yZzAzl>