

離岸風場風機雷達回波之模擬研究 Simulation Study of Radar Echo for Wind Turbines in Off-Shore Wind Farms

林俊華¹、鄭儀¹、顏士軒¹、姜勝峰¹、王健霖¹、張恆文²、連永順²

¹國立台灣海洋大學電機工程學系

²工業技術研究院綠能與環境研究所

Jiun-Hwa Lin¹, Yi Jheng¹, Shih-Syuan Yan¹, Sheng-Fong Jiang¹, Jian-Lin Wang¹
Heng-Wen Chang², Yung-Shun Lien²

¹Department of Electrical Engineering, National Taiwan Ocean University

²Green Energy and Environment Research Laboratory, Industrial Technology Research Institute
jhlin@mail.ntou.edu.tw

摘要

風機扇葉為一龐大不規則曲面，所以無法如圓形或截頭圓錐式塔柱，有一解析公式可快速計算其 RCS。因此扇葉部分在離散切割成眾多小型貼片(patch)後，須發展可快速計算三維面積分之程式，才能迅速獲取在物理光學近似下，各貼片所產生的散射場。

每一貼片以二次曲面描述，如此面積分可表為二次多項式、指數函數與 Fresnel integral 乘積的一重積分，因此一重積分仍無解析公式適用，所以進一步再將 Fresnel integral 用 Boresma expansion 展開，這時所得之各項展開一重積分，可藉助一 recursive relation 快速計算而得。希望透過二次曲面貼片之切割，可用較少之貼片數即可有效近似扇葉之不規則曲面，然後搭配前述之積分運算法，完成此風機扇葉 RCS 快速計算模組。

另外離岸風場塔柱陣列之雷達回波圖亦呈現於論文中。

關鍵詞：離岸風場、風機扇葉、雷達截面積。

Abstract

The wind turbine blades are huge subjects with irregular curvilinear surface, so there does not exist analytical formulas facilitating evaluating RCS as those for wind towers with circular cylindrical surface or truncated cones. The idea is to decompose the blades into many small patches, for which efficient analytical formulas for scattered fields can be found under physical optics approximation.

Each patch is a quadratic curvilinear surface and the related integrals thus can be rendered into a one-dimensional integral with the integrand being a product of 2nd-order polynomials, exponential functions and Fresnel functions. But these 1D integral still cannot be integrated analytically, so the Fresnel functions are expanded by the Boresma expansion, and every 1D integral is transformed into several 1D integrals involving rational functions and exponential functions. A recursive relation exists to efficiently calculate these 1D integrals. Hopefully, by using fewer patches approximating blade surface and the efficient approach to evaluate the integrals, RCS can be fast evaluated.

Also included in this paper is the radar echo graph for wind turbine towers in the off-shore wind farm.

Keywords: off-shore wind farm, turbine blade, radar cross section.

I. 簡介

離岸風場(Offshore Windfarms)之開發、設置是國家既定之能源政策，評估離岸風場對岸際雷達波(Marine Radar)之影響是整體環境影響評估中重要的一環。

風力發電機是一相當龐大的結構，它的高度將近 120 公尺(塔台加扇葉)，扇葉長度 40 公尺，塔柱直徑將近 3.65 公尺[1,2]，如圖 1 所示。此風機在 9.4GHz 所顯示的雷達截面積與一大型油輪不相上下，約為 60dBsm (10^6 m^2)。風機的座標系統定義於圖 2，而且此 RCS 亦隨扇葉之旋轉角度(rotation angle)與觀察角度(yaw angle)不同而改變；估計塔台占全部 RCS 的 80%，扇葉則佔 15%，渦輪引擎部分在觀察角度等於 90 度時才須要考慮，其餘方位則可忽略不計。

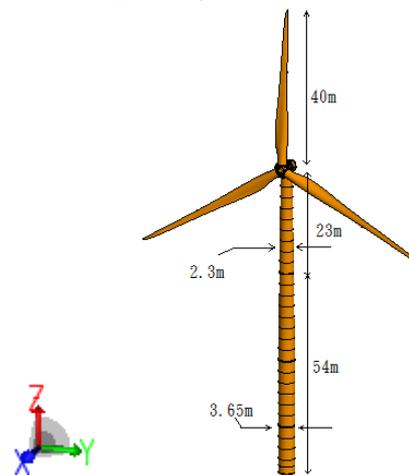


圖 1 風機模型

由於風機在雷達信號 X-band 頻率下將近數千波長，使得 RCS 的計算是一龐大的工程，若加上扇葉的複雜形狀，所需的計算時間將相當冗長。因此，一個近似簡化的數學模式將被提出，它可以較有效率地估計風機塔台的單基與雙基 RCS，同時配合對扇葉部分所用的物理光學(PO, physical optics)數學模式，能夠即時考慮扇葉不同旋轉角度和觀察角度對 RCS 的影響。

II. 原理與方法

扇葉部分在離散切割成眾多小型貼片(patch)後，每一貼片以二次曲面描述[3]，如圖 2 所示。

當雷達的源點和觀測在相同的位置時為 monostatic，即 $\theta_i = \theta_s$ ， $\phi_s = \phi_i$ 時，考慮遠場球坐標時 $r \gg \lambda$ ， \hat{r} 方向的電場相對於 $\hat{\theta}$ 與 $\hat{\phi}$ 方向的電場可忽略，由於入射方向 \hat{k}_i 與座標系的 \hat{r} 方向相同，而忽略電場積分公式中 \hat{k}_i 方向的分量。

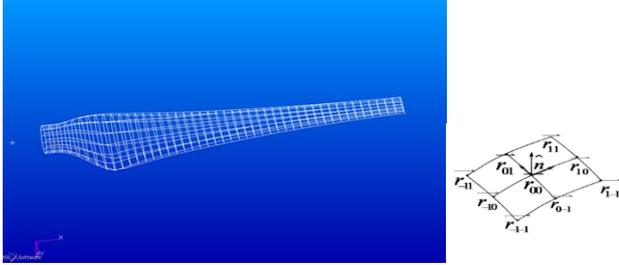


圖 2 風機扇葉之二次曲面貼片

因此將向量磁位寫成以下形式

$$\bar{A} \approx \frac{-e^{-jkr}}{2\pi r \eta} \iint_{S_i} (\hat{n}_i \cdot \hat{k}_i) \bar{E}_i e^{j\hat{k}_i \cdot \vec{r}'} dS' \quad (1)$$

$$\bar{E}_i = \bar{E}_{i0} e^{-j\hat{k}_i \cdot \vec{r}'} \quad (2)$$

在遠場時散射場近似為以下公式

$$E_\theta^S \approx -j\omega\mu A_\theta \quad (3)$$

$$E_\phi^S \approx -j\omega\mu A_\phi$$

在背向散射 $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ 時

$$\bar{E}_s = \frac{-j\omega\mu}{\eta 2\pi r} e^{-jkr} \iint_{S_i} [(\hat{n} \cdot \hat{k}_i) \bar{E}_{i0} e^{j\hat{k}_i \cdot \vec{r}'}] e^{j\hat{k}_s \cdot \vec{r}'} dS' \quad (4)$$

$$= jk \bar{E}_{i0} \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \iint_{S_i} \hat{n}(\vec{r}') \cdot \hat{k}_i e^{-2j\hat{k}_i \cdot \vec{r}'} dS'$$

其中

$$\hat{n}(\vec{r}') = \hat{n} \cdot \hat{k}_i \quad (5)$$

$$\hat{k}_i = -\hat{x} \cos \phi_i \sin \theta_i - \hat{y} \sin \phi_i \sin \theta_i - \hat{z} \cos \theta_i \quad (6)$$

(4)式中的三維面積分是計算的瓶頸，相當耗時。若以二次函數曲面貼片近似散射體表面，則此面積分可改寫為

$$I_{ij} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} A_i(u) A_j(v) \times \exp(-2jk \hat{k}_i \cdot \vec{r}(u, v)) du dv \quad (7)$$

或進一步可表成

$$I_{ij} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} A_i(u) A_j(v) \times \exp(-j \times (C_0 + U_1 u + U_2 u^2 + V_1 v + V_2 v^2 + \phi_{ij}^{uv} uv)) du dv \quad (8)$$

其中 $A_i(u)$ 為 u 的二次函數； C_0, U_1, U_2, V_1 和 V_2 為一些與 patch 形狀、大小相關的參數。

(8)式並無一解析公式可有效運算，所以須採用不同途徑計算此面積分。首先將(8)式表為對 v 作積分，再對 u 作積分：

$$e^{-ic_0} \int_{-0.5}^{0.5} A_i(u) e^{-i(U_1 u + U_2 u^2)} du \int_{-0.5}^{0.5} A_j(v) e^{-i(V_1 v + V_2 v^2 + \phi_{ij}^{uv} uv)} dv \quad (9)$$

上式對 v 的積分可表成 Fresnel 函數[3]：

$$\int_{-0.5}^{0.5} A_j(v) e^{-i(V_1 v + V_2 v^2 + \phi_{ij}^{uv} uv)} dv \quad (10)$$

$$= \frac{\text{sgn}(V_2)}{\sqrt{|V_2|}} e^{-i \frac{(V_1 + \phi_{ij}^{uv})^2}{4V_2}} \left[\mathcal{Z} \left(\frac{V_1 + V_2 + \phi_{ij}^{uv}}{2\sqrt{|V_2|}} \right) - \mathcal{Z} \left(\frac{V_1 - V_2 + \phi_{ij}^{uv}}{2\sqrt{|V_2|}} \right) \right]$$

雖然(10)式為一與 u 有關的函數，但若在與(9)中 u 的其他函數相乘，則無法找到一解析公式。所以我們採用 Fresnel 函數的 Boersma expansion[4]：

$$\mathcal{Z}(pu + q) \cong \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-i(pu+q)^2} \sqrt{\frac{pu+q}{4}} \sum_{n=0}^{\infty} (a_n + ib_n) \left(\frac{pu+q}{4}\right)^n$$

$$= \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{-i(pu+q)^2} \frac{pu+q}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (a_n + ib_n) \left(\frac{pu+q}{4}\right)^n \quad (11)$$

將(11)式代入(10)式可得

$$F_0(u) = \frac{1}{\sqrt{|V_2|}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[e^{i2(q_1 - q_2)(\frac{pu+q_2}{2} + \frac{q_1 - q_2}{8})} \sum_{n=0}^{11} (a_n + ib_n) \left(\frac{pu+q_2}{2}\right)^{2n+1} - e^{i2(q_2 - q_1)(\frac{pu+q_1}{2} + \frac{q_2 - q_1}{8})} \sum_{n=0}^{11} (a_n + ib_n) \left(\frac{pu+q_1}{2}\right)^{2n+1} \right] \quad (12)$$

最後將(12)代入(9)中，須要計算如下式子：

$$\int e^{-i(U_1 u + U_2 u^2)} F_0(u) du \quad (13)$$

利用變數變換 $t_2 = \frac{pu+q_2}{2}$ ， $t_1 = \frac{pu+q_1}{2}$ 代入上式得式如下：

$$\int \frac{pd_2+q_2}{pd_1+q_2} e^{-i[U_1(\frac{2t_2-q_2}{p}) + U_2(\frac{2t_2-q_2}{p})^2]} G_{02}(t_2) \frac{2}{p} dt_2 - \int \frac{pe_2+q_2}{pe_1+q_2} e^{-i[U_1(\frac{2t_1-q_1}{p}) + U_2(\frac{2t_1-q_1}{p})^2]} G_{01}(t_1) \frac{2}{p} dt_1 \quad (14)$$

其中

$$G_{02}(t_2) = \frac{1}{\sqrt{|V_2|}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{i2(q_1 - q_2)(t_2 + \frac{q_1 - q_2}{8})} \sum_{n=0}^{11} (a_n + ib_n) (t_2)^{2n+1}$$

$$G_{01}(t_1) = \frac{1}{\sqrt{|V_2|}} \sqrt{\frac{\pi}{2}} e^{i2(q_2 - q_1)(t_1 + \frac{q_2 - q_1}{8})} \sum_{n=0}^{11} (a_n + ib_n) (t_1)^{2n+1} \quad (15)$$

所以原式可表成

$$\sqrt{\frac{\pi}{2V_2}} e^{i \frac{(q_1 - q_2)^2}{4}} \frac{2}{p} e^{-i \left(\frac{U_2 q_2^2}{p^2} - \frac{U_1 q_2}{p} \right)} (a_n + ib_n)$$

$$\int \frac{pd_2+q_2}{pd_1+q_2} t_2^{2n+1} e^{-i \left\{ \frac{4U_2}{p^2} t_2^2 + \left[\frac{U_1}{p} - \frac{4q_2 U_2}{p^2} - 2(q_1 - q_2) \right] t_2 \right\}} dt_2 \quad (16)$$

$$\int \frac{pd_1+q_2}{pd_1+q_2} t_2^{2n+1} e^{-i \left\{ \frac{4U_2}{p^2} t_2^2 + \left[\frac{U_1}{p} - \frac{4q_2 U_2}{p^2} - 2(q_1 - q_2) \right] t_2 \right\}} dt_2$$

可利用遞迴關係式[3]計算得之：

$$I_n = \int \exp(-j(\alpha x^2 + \beta x)) x^n dx, \quad |x| \leq 1 \quad (17)$$

$$2\alpha I_n + \beta I_{n-1} + j(n-1)I_{n-2} = j x^{n-1} \exp(-j(\alpha x^2 + \beta x)) \quad (18)$$

$$\text{以及 } K_n = \int \exp(-j(\alpha x^2 + \beta x)) \frac{1}{x^n} dx, \quad |x| > 1 \quad (19)$$

$$2\alpha K_n + \beta K_{n+1} - j(n+1)K_{n+2} = j \exp(-j(\alpha x^2 + \beta x)) / x^{n-1} \quad (20)$$

而其他高次項均依此類推。

III. 結果與討論

散射電場計算為二重積分，使用泰勒展開(Taylor expansion)將原本二重積分相位部分的計算以二階係數數列取代，並以 Fresnel functions 代入計算，再將 Fresnel functions 以 Boersma 展開式代表，然後各項 u 的積分以遞迴公式(recurrence relations)完成。程式流程圖如下：

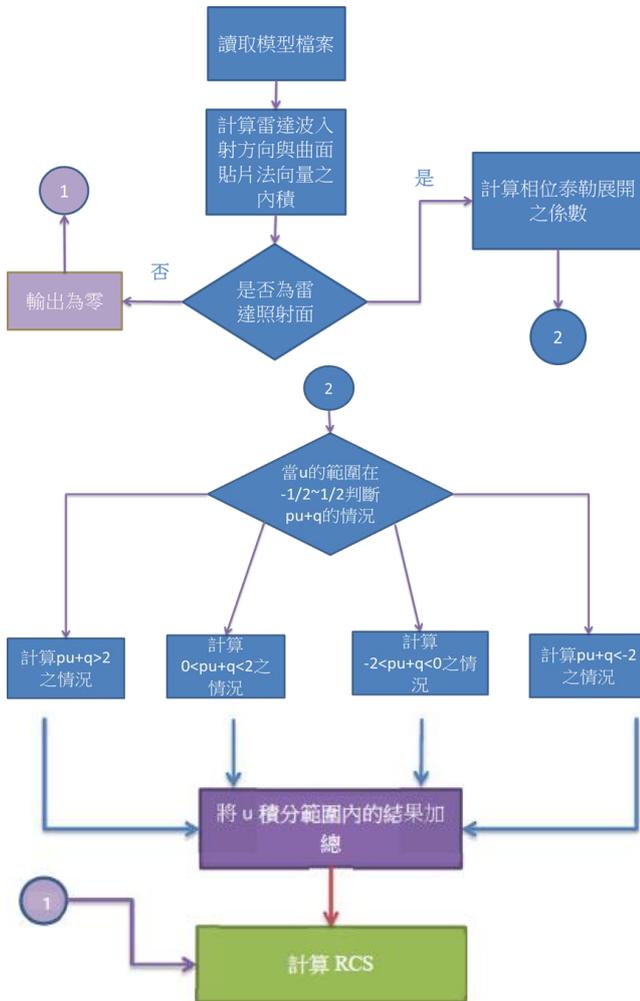


圖 3 加速運算核心程式流程圖

使用物理光學近似(PO)的方法計算雷達 RCS，程式首先考慮在雷達照射面的情形，然後以 pu+q 的值判斷須使用何種 Boersma 展開式來計算，最後將積分範圍內的結果相加，並計算 RCS 值。

程式針對扇葉分割後的某些 patch 做了檢驗。比較在第 331 片 patch，入射角 $\phi_i = 0^\circ$ 、 $\theta_i = 0^\circ$ ，雷達照射第六點時， I_{ij} 之不同計算方式之結果：

$$I_{ij} = \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} f(u, v) e^{-jk(\hat{k}_i - \hat{k}_s) \cdot \vec{r}} dudv \quad (21)$$

$$I_{ij} = \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} f(u, v) e^{j(C_0 + U_1 u + U_2 u^2 + V_1 v + V_2 v^2 + \phi_{ij}^{uv})} dudv \quad (22)$$

以及 Fresnel functions 以 Boersma 展開式代表，然後各項 u 的積分使用 recurrence relations 完成：

$$I_{ij} = \int_{-1/2}^{1/2} f(u, v) \frac{\text{sgn}(V_2)}{\sqrt{|V_2|}} e^{j \frac{(V_1 + \phi_{ij}^{uv})^2}{4V_2}} \left[\tilde{Z} \left(\frac{V_1 + V_2 + \phi_{ij}^{uv} u}{2\sqrt{|V_2|}} \right) - \tilde{Z} \left(\frac{V_1 - V_2 + \phi_{ij}^{uv} u}{2\sqrt{|V_2|}} \right) \right] du \quad (23)$$

下表為(21)、(22)、(23)的計算結果比較：

表 1 I_{ij} 之計算結果比較

f(u,v)	相位積分計算	相位泰勒展開	Boersma 近似
1	0.9214-0.1429i	0.9103-0.1352i	0.9103-0.1352i
u	0.002+0.0211i	0.004+0.019i	0.004+0.019i
u ²	0.0731-0.0273i	0.0723-0.0264i	0.0723-0.0264i
v	-0.0135-0.0722i	-0.0167-0.0859i	-0.0167-0.0859i
uv	-0.001-0.0061i	0.0008-0.0028i	0.0008-0.0028i
u ² v	-0.0021-0.0055i	-0.0028-0.0068i	-0.0028-0.0068i
v ²	0.0734+0.00163i	0.0718-0.0151i	0.0718-0.0151i
uv ²	-0.0001+0.0019i	0.0002+0.0016i	0.0002+0.0016i
u ² v ²	0.0057-0.0026i	0.0056-0.0025i	0.0056-0.0025i

由上表可看出相位泰勒展開的結果與使用 Boersma 展開式近似的結果十分吻合。

根據圖 1 風機模型的尺寸，將塔柱與扇葉做離散切割，然後使用電磁模擬軟體 FEKO 加以模擬計算。當頻率為 3GHz、無海面狀況下，此結構之 RCS 隨扇葉轉動角度的變化如圖 4 所示。因每隔 120° 即有一片扇葉，所以圖 4 中之葉片轉動角度只涵蓋至 120°；圖中每隔 5° 即有一數據，RCS 大約分布在 52 至 56 dBm²。只有塔柱時之 RCS，以一條黑色水平線標示，其值為 55.3 dBm²。可見塔柱之 RCS 占全體 RCS 絕大部分，這點與簡介中其他文獻的報導是一致的。

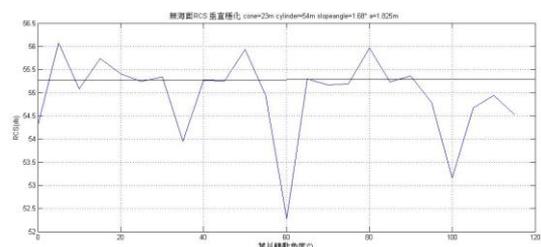


圖 4 風機塔柱加扇葉在無海面時之 RCS

當考慮海面之效應時，模擬狀況為收發雷達架設在離海面 17.5m 處，與塔柱之水平距離為 500m，天線收發型態為垂直極化。圖 5 為雷達接收之電場強度對葉片轉動角度之作圖，同樣地只有塔柱的情形亦用水平黑線標示，可觀察到與圖 4 顯著不同的一點是，當有海面時，塔柱的影響程度並非是主要的，圖 5 中某些角度之場強可為單純塔柱時的 3 倍。此結果與收發天線的場型有關，此處的模擬是採用一般的偶極天線(dipole antenna)，它的指向性(directionality)並不高，也就是波速寬 (beamwidth)相當寬；它可以對很多方向都作有效的發射、接收，這與一般大都為指向性高的雷達是不同的，所以模擬時應設定較小波速寬(小於 1°)的天線。

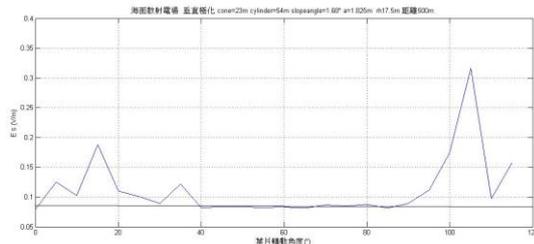


圖 5 風機塔柱加扇葉在有海面時 500m 之接收場強

圖 6 是將水平收發距離改為 3km，結果類似圖 5 之變化趨勢，而且因距離更遠，天線的輻射涵蓋範圍更廣，所以更多角度的 RCS 都大於塔柱的 RCS。

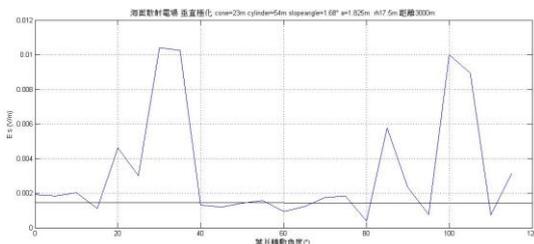


圖 6 風機塔柱加扇葉在有海面時 3km 之接收場強

有關風機塔柱雷達回波場強的計算，吾人已發展完成[5]，可以用來模擬一個風力發電機陣列的雷達回波情形，如圖 7 所示：

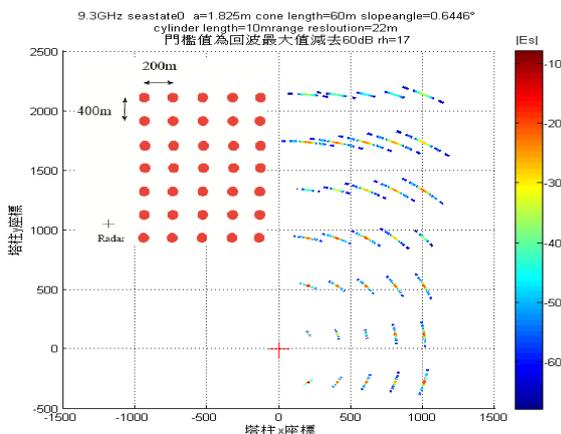


圖 7 考慮海面之雷達回波模擬圖

圖 7 中的紅色十字為雷達所在的位置，塔柱在雷達回波圖上都呈現一個弧形，弧形的中段為強度最強的的地方，而弧形的兩側強度越來越小，為了觀察這種情形，我們將回波圖放大來看，如圖 8 所示。

由圖 8 可以觀察到此弧形又由數段的弧形所組成而最中間的弧形是塔柱被主波瓣所照射到的回波，由於主波瓣內的角度強度較強，照射到塔柱的回波都會顯示在回波圖上，因此觀察的目標物有擴散(target spreading)的現象。兩側的弧形為旁波瓣照射所形成的回波，雖然雷達在掃描時主波瓣並沒有照射到物體，但是由旁波瓣照射到物體的回波會判斷成是由主波瓣的方向所接收到的，因此在本來沒有物體的地方會有回波顯示，造成旁波瓣效應(sidelobe detection)。

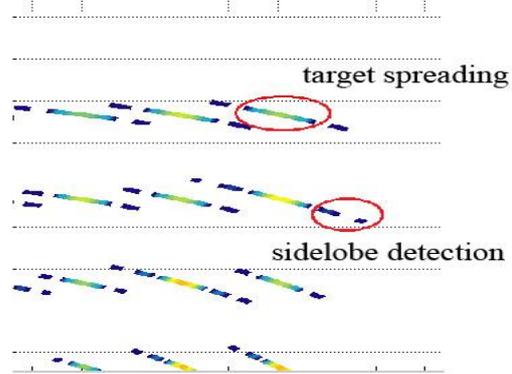


圖 8 目標物擴散以及旁波瓣效應

IV. 結論

本論文探討使用二次曲面貼片分割風機扇葉表面，在物理光學近似下，散射場可表為表面電流之面積分；此面積分可近似成一有限項數之級數和，其中每一項為一維積分，這些積分又可以使用一遞迴關係式快速獲得，所以能有效地計算雷達回波或 RCS。

另外吾人模擬的風場塔柱回波圖可以觀察到目標物擴散及旁波瓣效應，未來將加入扇葉的部分，可更準確評估風場對雷達回波的影響。

參考文獻

- [1] J. Pinto, J. C. G. Matthews and G. C. Sarno, "Stealth technology for wind turbines," *IET Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 4, No. 1, 2010, pp. 126-133.
- [2] L. S. Rashid and A. K. Brown, "Impact Modelling Of Wind Farms On Marine Navigational Radar," *IET International Conference on Radar Systems*, 2007.
- [3] A. M. Woods, K. D. Carmody and C. D. Sillence, "Efficient Radar Cross Section Calculations on Airframe Geometries at High Frequencies," *American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA Test and Evaluation International, Aerospace Forum*, 1996, pp. 146-155.
- [4] J. Boersma, "Computation of Fresnel Integrals," *Math. Comp.*, Vol.14, 1960, pp.380.
- [5] 顏士軒 "快速計算多根離岸風力發電機之塔身雷達截面積" 國立台灣海洋大學碩士論文，2015 年 1 月。