

## Phương pháp Hybrid để giải quyết bài toán tán xạ sóng điện từ trên vật thể lý tưởng

Lưu Đức Thọ\*, Lương Văn Trình

Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

\*Email: luuductho1991@gmail.com

Nhận bài: 13/9/2023; Hoàn thiện: 09/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.127-133>

### TÓM TẮT

Bài báo đề cập đến vấn đề tán xạ sóng điện từ trường trên hình trụ tròn dẫn điện lý tưởng, được giới hạn bởi hai nửa hình cầu, trong trường hợp phân cực H (vector điện trường-E không nằm trong mặt phẳng chiếu). Để giải quyết vấn đề này, một phương pháp Hybrid đã được sử dụng kết hợp phương pháp hàm riêng, sự nhiễu xạ liên tiếp và nguyên lý tương hỗ. So sánh kết quả tính toán giá trị RCS (Radar Cross Section) theo phương pháp Hybrid, phương pháp phương trình tích phân, phương pháp Huygens-Fresnel-Kirchhoff.

**Từ khóa:** RCS; Phương pháp Hybrid; Hàm số Green.

### 1. MỞ ĐẦU

Khi giải quyết các bài toán về sự tán xạ của sóng điện từ trường trên các vật thể có hình dạng bề mặt phân tích mảnh, có thể sử dụng các phương pháp như: phương pháp số (phương trình tích phân, phần tử hữu hạn, sai phân hữu hạn trong miền thời gian); ma trận T và phương pháp gần đúng (phương pháp Huygens-Fresnel-Kirchhoff, lý thuyết nhiễu xạ hình học, phương pháp phương trình parabol) [1 – 5].

Trong trường hợp có ít nhất một trong các kích thước điện đặc trưng của đối tượng nghiên cứu là nhỏ, phương pháp gần đúng dẫn đến sai số nghiêm trọng. Nếu ít nhất một trong các kích thước này lớn, việc sử dụng phương pháp số yêu cầu kích thước RAM máy tính lớn. Trong [6-9], một phương pháp Hybrid để giải quyết các vấn đề như vậy đã được đề xuất và giải quyết các bài toán cụ thể. Phương pháp Hybrid dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp hàm riêng, sự nhiễu xạ liên tiếp và nguyên lý tương hỗ. Hiện nay, chưa có công trình nghiên cứu nào được công bố sử dụng Phương pháp Hybrid dựa trên sự kết hợp của các phương pháp khác nhau. Chính vì vậy, đây là hướng tiếp cận hoàn toàn mới để giải quyết các bài toán về tán xạ sóng điện từ trường trên vật thể lý tưởng.

Trong [7], phương pháp Hybrid đã được dùng để giải quyết bài toán về sự tán xạ sóng điện từ trường trên vật thể xoay trục dưới dạng trụ tròn được giới hạn ở hai đầu bằng các nửa hình cầu trong trường hợp phân cực E (vector điện trường-E nằm trong mặt phẳng chiếu). Trong trường hợp phân cực H (vector điện trường-E không nằm trong mặt phẳng chiếu), phương pháp Hybrid sẽ được sử dụng và tính toán trong bài báo này.

### 2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

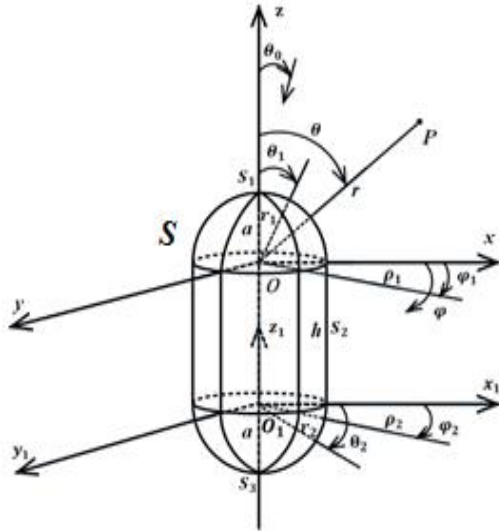
#### 2.1. Phương pháp Hybrid để giải quyết các bài toán tán xạ không tính tới sự tương tác

Gia thiết, trên hình trụ lý tưởng được chiếu sóng điện từ trường phẳng, trong đó vector E song song với trục Y, mặt phẳng chiếu là XZ, trong đó a- Bán kính nửa hình cầu, h- Độ cao hình trụ (hình 1). Giải quyết bài toán tán xạ sóng điện từ trường phẳng được quy lại thành bài toán tìm dòng điện trên mặt phẳng S.

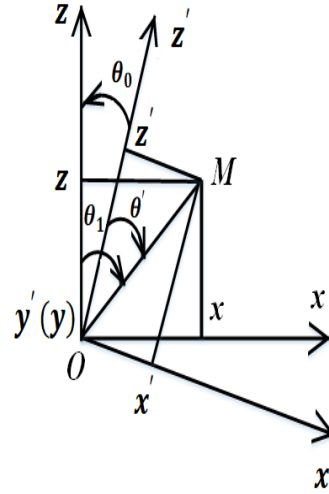
Chia bề mặt S thành 3 phần:  $S_1$ ,  $S_3$  (bề mặt các nửa hình cầu),  $S_2$  (bề mặt hình trụ), và xem xét sự tán xạ liên tiếp của sóng phẳng trên các bề mặt này. Đầu tiên, sẽ giải quyết bài toán tán xạ trên mặt  $S_1$  dưới dạng chuỗi Mi [1, 2]. Thành phần trường đầy đủ trong hệ tọa độ cầu ( $r'$ ,  $\theta'$ ,  $\varphi'$ ) là:

$E_{r'}, E_{\theta'}, H_{\phi'}, H_{r'}, H_{\theta'}, E_{r'}, E_{\theta'}$ , chỉ khác là thay góc  $\varphi'$  bằng góc  $(\varphi' - \pi/2)$ .

Khi chiếu sóng điện từ trường phẳng dưới một góc  $\theta_0$ , cần phải quay hệ trục tọa độ một góc là  $\theta_0$  (hình 2). Hệ tọa độ cũ là  $(x', y', z')$ , hệ tọa độ mới là  $(x, y, z)$ .



Hình 1. Đối tượng nghiên cứu.



Hình 2. Quay hệ trục tọa độ.

Điện từ trường đầy đủ trong hệ tọa độ cầu  $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$  là:

$$\begin{aligned} E_{r_1} &= \sin \theta_1 \cos \varphi_1 E_x + \sin \theta_1 \sin \varphi_1 E_y + \cos \theta_1 E_z, H_{\varphi_1} = -\sin \varphi_1 H_x + \cos \varphi_1 H_y, \\ E_{\theta_1} &= \cos \theta_1 \cos \varphi_1 E_x + \cos \theta_1 \sin \varphi_1 E_y - \sin \theta_1 E_z, E_{\varphi_1} = -\sin \varphi_1 E_x + \cos \varphi_1 E_y, \\ H_{r_1} &= \sin \theta_1 \cos \varphi_1 H_x + \sin \theta_1 \sin \varphi_1 H_y + \cos \theta_1 H_z, H_{\theta_1} = \cos \theta_1 \cos \varphi_1 H_x + \cos \theta_1 \sin \varphi_1 H_y - \sin \theta_1 H_z, \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó,  $(E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z)$  là thành phần điện từ trường nhận được sau khi biến đổi điện từ trường từ hệ tọa độ cầu  $(r', \theta', \varphi')$  sang hệ tọa độ Descartes  $(x, y, z)$ .

Trong trường hợp chiếu sóng điện từ phẳng theo chiều dọc trục Z, dòng điện trên nửa hình cầu  $S_1$  được xác định giống như dòng điện trên các hình cầu khi tán xạ sóng phẳng. Dòng điện trên các hình  $S_2, S_3$  được coi như bằng 0.

Dòng điện trên nửa hình cầu  $S_1$  được xác định bằng công thức:

$$j_{\theta_1} = H_{\varphi_1}, j_{\varphi_1} = -H_{\theta_1}, r_1 = a. \quad (2)$$

Kết quả, thu được đồ thị tán xạ trên đối tượng nghiên cứu S trong mặt phẳng E và H là:

$$\begin{aligned} E_{\varphi}^1 &= \frac{-k^2}{i\omega\epsilon_a} \frac{a^2}{\sin(\theta)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1, \\ E_{\theta}^1 &= \frac{-k^2}{i\omega\epsilon_a} a^2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1, \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó,  $\cos \beta = \cos(\theta)\cos(\theta_1) + \sin(\theta)\sin(\theta_1)\cos(\varphi - \varphi_1)$ ;  $G_0$  - Hàm số Green tọa độ cầu trong không gian.

Khi chiếu sóng điện từ phẳng dưới một góc  $\theta_0$  so với chiều dọc trục Z, dòng điện trên các nửa hình cầu  $S_1, S_3$  được xác định giống như dòng điện trên hình cầu khi chiếu sóng phẳng. Thành

phần dòng điện trên  $S_2$  được xác định giống như dòng điện trên hình trụ khi chiếu sóng phẳng theo công thức Rayleigh. Dòng điện trên  $S_2$  là:

$$j_z = \frac{-i \cos \theta_0}{ka \sin \theta_0} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \exp(-ikz \cos \theta_0) \sum_{m=0}^{\infty} m \epsilon_m (-i)^m \sin m \varphi_2 \left[ \begin{array}{l} J_m(ka \sin \theta_0) - \frac{J'_m(ka \sin \theta_0)}{H_m^{(1)}(ka \sin \theta_0)} \times \\ \times H_m^{(1)}(ka \sin \theta_0) \end{array} \right],$$

$$j_{\varphi_2} = -\sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \sin \theta_0 \exp(-ikz \cos \theta_0) \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-i)^m \cos m \varphi_2 \left[ \begin{array}{l} J_m(ka \sin \theta_0) - \frac{J'_m(ka \sin \theta_0)}{H_m^{(1)}(ka \sin \theta_0)} \times \\ \times H_m^{(1)}(ka \sin \theta_0) \end{array} \right] \quad (4)$$

Đồ thị tán xạ trên bề mặt  $S_2$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_{\varphi}^2 = \frac{-ak^2}{i\omega\epsilon_a} \int_0^{-h} \int_0^{2\pi} \cos(\varphi - \varphi_2) j_{\varphi_2} P_0 d\varphi_2 dz, E_{\theta}^2 = \frac{k^2 a \sin \theta}{i\omega\epsilon_a} \left[ \int_0^{-h} \int_0^{\pi/2} J_z G_0 d\varphi_2 dz + \int_0^{-h} \int_{3\pi/2}^{2\pi} J_z G_0 d\varphi_2 dz \right] \quad (5)$$

Dòng điện trên nửa hình cầu  $S_3$ :

$$j_{\theta_3} = \exp(ikh \cos \theta_0) H_{\varphi_1}, j_{\varphi_3} = -\exp(ikh \cos \theta_0) H_{\theta_1}. \quad (6)$$

Đồ thị tán xạ trên bề mặt  $S_3$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_{\varphi}^3 = \frac{k^2}{-i\omega\epsilon_a} \frac{a^2}{\sin(\theta)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1,$$

$$E_{\theta}^3 = \frac{k^2}{-i\omega\epsilon_a} a^2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1, \quad (7)$$

$$\cos \beta = \cos(\theta) \cos(\theta_1) + \sin(\theta) \sin(\theta_1) \cos(\varphi - \varphi_1)$$

Kết quả, đồ thị tán xạ trên đối tượng nghiên cứu  $S$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_{\varphi} = E_{\varphi}^1 + E_{\varphi}^2 + \exp[ikh \cos(\theta)] E_{\varphi}^3, E_{\theta} = E_{\theta}^1 + E_{\theta}^2 + \exp[ikh \cos(\theta)] E_{\theta}^3. \quad (8)$$

## 2.2. Phương pháp Hybrid để giải quyết các bài toán tán xạ có tính tới sự tương tác

Dòng điện trên nửa hình cầu  $S_1$  xác định bằng công thức :  $j_{\theta_1} = H_{\varphi_1}, j_{\varphi_1} = -H_{\theta_1}, r_1=a$ , còn biểu thức cho thành phần từ trường được thể hiện trong công thức (1).

Trong hệ tọa độ trụ  $(\rho_1, \varphi_1, z)$ , dòng điện tương đương trên mặt phẳng  $xy$  có dạng:

$$J_{\varphi_1}^E = -H_{\rho_1}, J_{\rho_1}^M = -E_{\varphi_1}, J_{\rho_1}^E = H_{\varphi_1}, J_{\varphi_1}^M = E_{\rho_1}. \quad (9)$$

Tiếp theo, xác định vector điện thế trong khoảng giữa các mặt phẳng  $xy$  và  $x_1y_1$  theo công thức:

$$A_{\varphi_2}^E = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_1 \left[ J_{\varphi_1}^E \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - J_{\rho_1}^E \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \right] G_1 d\varphi_1 d\rho_1,$$

$$A_{\varphi_2}^M = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_1 \left[ J_{\varphi_1}^M \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - J_{\rho_1}^M \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \right] G_1 d\varphi_1 d\rho_1,$$

$$A_{\rho_2}^E = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_1 \left[ J_{\rho_1}^E \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + J_{\varphi_1}^E \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \right] G_1 d\varphi_1 d\rho_1,$$

$$A_{\rho_2}^M = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_1 \left[ J_{\rho_1}^M \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + J_{\varphi_1}^M \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \right] G_1 d\varphi_1 d\rho_1 \quad (10)$$

trong đó,  $G_1$  là hàm số Green trên hình trụ tròn [2].

Thành phần trường đầy đủ trong khoảng giữa các mặt phẳng  $xy$  và  $x_1y_1$  là:

$$H_z = \frac{1}{-i\omega\mu_a} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial \rho_2} (\rho_2 A_{\rho_2}^M) + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial \varphi_2} A_{\varphi_2}^M \right] + \frac{1}{\rho_2} \left[ \frac{\partial}{\partial \rho_2} (\rho_2 A_{\rho_2}^E) - \frac{\partial}{\partial \varphi_2} A_{\rho_2}^E \right], \quad (11)$$

$$H_{\varphi_2} = \frac{1}{-i\omega\mu_a} \left[ k^2 A_{\varphi_2}^M + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial \varphi_2} \left[ \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial \rho_2} (\rho_2 A_{\rho_2}^M) + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial \varphi_2} A_{\varphi_2}^M \right] \right] + \frac{\partial}{\partial z} A_{\rho_2}^E.$$

Thay giá trị  $\rho_2=a$  vào công thức (11), xác định thành phần từ trường và dòng điện  $j_{\varphi_2} = H_z$ ,  $j_z = -H_{\varphi_2}$  trên hình trụ  $S_2$ . Tiếp theo, xác định dòng điện trên nửa hình cầu  $S_3$ :

$$\begin{aligned} j_{\theta_3} &= \frac{-1}{i\omega\mu_a} \left[ k^2 A_{\theta_3}^M + \frac{1}{r_3 \sin \theta_3} \frac{\partial}{\partial \varphi_3} \left( \frac{1}{r_3^2} \frac{\partial (r_3^2 A_{r_3}^M)}{\partial r_3} + \frac{1}{r_3 \sin \theta_3} \frac{\partial (\sin \theta_3 A_{\theta_3}^M)}{\partial \theta_3} + \frac{1}{r_3 \sin \theta_3} \frac{\partial A_{\varphi_3}^M}{\partial \varphi_3} \right) \right] + \\ &+ \frac{1}{r_3} \left[ \frac{\partial}{\partial r_3} (r_3 A_{\theta_3}^3) - \frac{\partial}{\partial \theta_3} A_{r_3}^3 \right] \\ j_{\varphi_3} &= \frac{1}{i\omega\mu_a} \left[ k^2 A_{\theta_3}^M + \frac{1}{r_3} \frac{\partial}{\partial \theta_3} \left( \frac{1}{r_3^2} \frac{\partial (r_3^2 A_{r_3}^M)}{\partial r_3} + \frac{1}{r_3 \sin \theta_3} \frac{\partial (\sin \theta_3 A_{\theta_3}^M)}{\partial \theta_3} + \frac{1}{r_3 \sin \theta_3} \frac{\partial A_{\varphi_3}^M}{\partial \varphi_3} \right) \right] + \\ &+ \frac{1}{r_3} \left[ \frac{1}{\sin \theta_3} (r_3 A_{\theta_3}^3) - \frac{\partial}{\partial \theta_3} A_{r_3}^3 \right] \end{aligned}, \quad (12)$$

Trong đó,  $A_{\varphi_3}^3 = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\varphi_2}^3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) - J_{\rho_2}^3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2$ ,

$$A_{\varphi_3}^M = \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\varphi_2}^M \cos(\varphi_3 - \varphi_2) - J_{\rho_2}^M \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2,$$

$$A_{r_3}^3 = \sin \theta_3 \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\rho_2}^3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + J_{\varphi_2}^3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2,$$

$$A_{r_3}^M = \sin \theta_3 \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\rho_2}^M \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + J_{\varphi_2}^M \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2,$$

$$A_{\theta_3}^3 = \cos \theta_3 \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\rho_2}^3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + J_{\varphi_2}^3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2,$$

$$A_{\theta_3}^M = \cos \theta_3 \int_a^{\infty} \int_0^{2\pi} \rho_2 \left[ J_{\rho_2}^M \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + J_{\varphi_2}^M \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \right] G_2 d\varphi_2 d\rho_2,$$

$G_2$  – Hàm số Green trên hình cầu [2].

Đồ thị tán xạ trên bề mặt  $S_1$  trong mặt phẳng E và H là:

$$\begin{aligned} E_{\varphi}^1 &= \frac{-k^2 a^2}{i\omega\epsilon_a \sin(\theta)} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1, \\ E_{\theta}^1 &= \frac{-k^2 a^2}{i\omega\epsilon_a} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_1) \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ j_{\theta_1} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_1} + j_{\varphi_1} \frac{1}{\sin(\theta_1)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_1} \right] G_0 d\varphi_1 d\theta_1, \end{aligned} \quad (13)$$

$\cos \beta = \cos(\theta)\cos(\theta_1) + \sin(\theta)\sin(\theta_1)\cos(\varphi - \varphi_1)$ .

Đồ thị tán xạ trên bề mặt  $S_2$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_\varphi^2 = \frac{k^2}{-i\omega\varepsilon_a} \int_0^{-h} \int_0^{2\pi} \cos(\varphi - \varphi_2) j_{\varphi_2} G_0 d\varphi_2 dz, \quad E_\theta^2 = \frac{k^2 a \sin \theta}{i\omega\varepsilon_a} \int_0^{-h} \int_0^{2\pi} j_z G_0 d\varphi_2 dz. \quad (14)$$

Đồ thị tán xạ trên bề mặt  $S_3$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_\varphi^3 = \frac{k^2}{-i\omega\varepsilon_a} \frac{a^2}{\sin(\theta)} \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_3) \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ j_{\theta_3} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_3} + j_{\varphi_3} \frac{1}{\sin(\theta_3)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_3} \right] G_0 d\varphi_3 d\theta_3,$$

$$E_\theta^3 = \frac{k^2 a^2}{-i\omega\varepsilon_a} \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{2\pi} \sin(\theta_3) \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ j_{\theta_3} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \theta_3} + j_{\varphi_3} \frac{1}{\sin(\theta_3)} \frac{\partial \cos \beta}{\partial \varphi_3} \right] G_0 d\varphi_3 d\theta_3, \quad (15)$$

$\cos \beta = \cos(\theta)\cos(\theta_3) + \sin(\theta)\sin(\theta_3)\cos(\varphi - \varphi_3)$ .

Kết quả, đồ thị tán xạ trên đối tượng nghiên cứu  $S$  trong mặt phẳng E và H là:

$$E_\varphi = E_\varphi^1 + E_\varphi^2 + \exp[ikh \cos(\theta)] E_\varphi^3, \quad E_\theta = E_\theta^1 + E_\theta^2 + \exp[ikh \cos(\theta)] E_\theta^3. \quad (16)$$

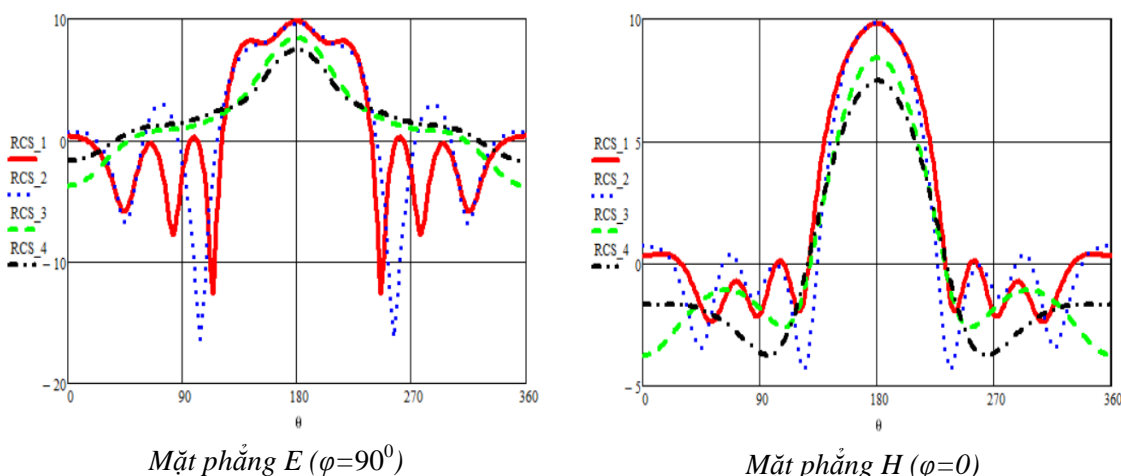
Mối liên hệ giữa giá trị RCS và đồ thị tán xạ:

$$RCS = \frac{4\pi R^2}{\lambda^2} \frac{|E_s^2|}{|E_i^2|}, \quad [\text{dB}]. \quad (17)$$

### 3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

#### 3.1. Số liệu đầu vào

Trong hình 3, 4 và 5 trình bày kết quả tính toán giá trị RCS khi chiếu sóng phẳng vào đối tượng nghiên cứu  $S$  với các tham số:  $f_0 = 3$  GHz,  $kh = 5$  và  $ka=3$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – bước sóng) dưới các góc chiếu  $0^\circ, 10^\circ, 45^\circ$ .



Hình 3. Kết quả tính toán giá trị RCS tại  $\theta_0 = 0^\circ$ .

#### 3.2. Phương pháp, công cụ mô phỏng

Sử dụng phương pháp phương trình tích phân (Method of intergral equations) trên phần mềm mô phỏng ANSYS HFSS 2015.

Sử dụng phần mềm Matlab (Mathcad) để tính toán giá trị RCS theo phương pháp Hybrid và

phương pháp Huygens-Fresnel-Kirchhoff.

Qua quá trình tính toán, mô phỏng trên các phần mềm, thu được giản đồ giá trị RCS. Sau đó, có những so sánh và đánh giá về kết quả nhận được giữa các phương pháp: phương pháp phương trình tích phân, phương pháp Hybrid và phương pháp Huygens-Fresnel-Kirchhoff.

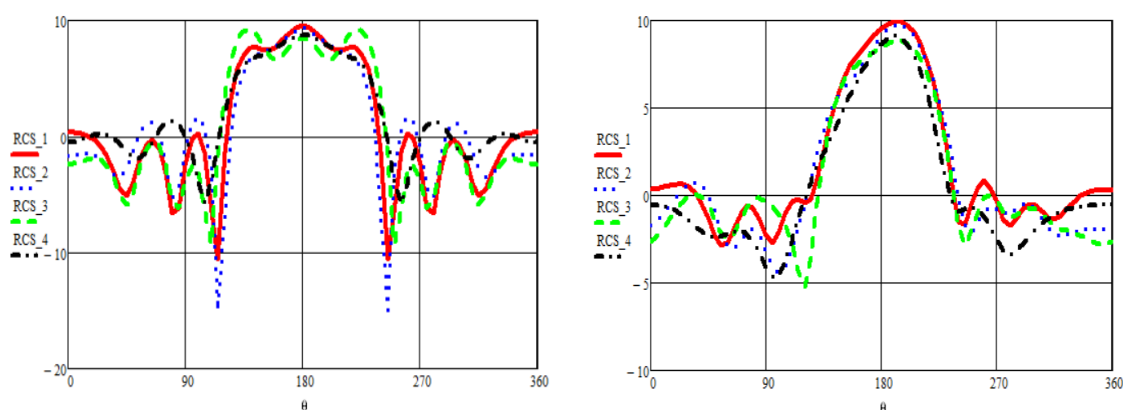
### 3.3. Kết quả tính toán

Đường RCS\_1- phương pháp phương trình tích phân (HFSS),

Đường RCS\_2 – phương pháp lai có tính đến sự tương tác,

Đường RCS\_3 – phương pháp lai không tính đến sự tương tác,

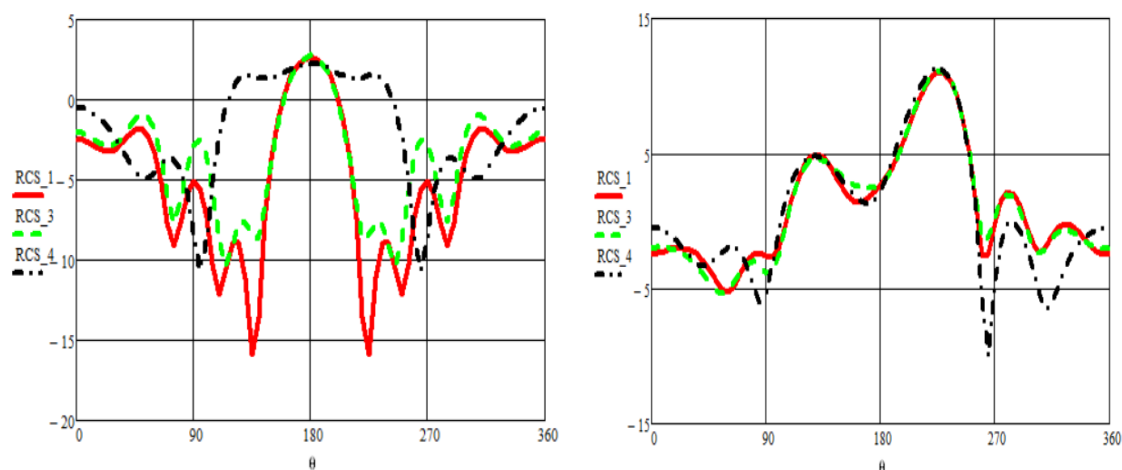
Đường RCS\_4 – phương pháp Huygens-Fresnel-Kirchhoff.



Mặt phẳng E ( $\varphi = 90^\circ$ )

Mặt phẳng H ( $\varphi = 0^\circ$ )

Hình 4. Kết quả tính toán giá trị RCS tại  $\theta_0 = 10^\circ$ .



Mặt phẳng E ( $\varphi = 90^\circ$ )

Mặt phẳng H ( $\varphi = 0^\circ$ )

Hình 5. Kết quả tính toán giá trị RCS tại  $\theta_0 = 45^\circ$ .

### 3.4. Phân tích kết quả tính toán

Hiện nay, phương pháp Hybrid được nhóm tác giả ứng dụng để nghiên cứu các bài toán tán xạ sóng điện từ trường trên các đối tượng là vật thể lý tưởng và cấu tạo từ các bề mặt phân tích có hàm số Green (hình cầu, hình trụ, hình nón,...). Đối với các bài toán tán xạ thì phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của đối tượng nghiên cứu, chúng ta sẽ thu được đồ thị tán xạ khác nhau.

Từ phương pháp Hybrid được trình bày trong bài báo có thể kết luận rằng, khi chiếu sóng

phẳng dưới một góc nhỏ thì phương pháp Hybrid có tính đến sự tương tác cho phép nhận được kết quả trùng khớp tốt so với phương pháp phương trình tích phân. Khi chiếu sóng phẳng dưới một góc lớn thì phương pháp Hybrid (có tính tới sự tương tác và không tính tới sự tương tác) cho phép nhận được kết quả gần giống với phương pháp phương trình tích phân. Phương pháp gần đúng Huygens-Fresnel-Kirchhoff chỉ cho phép nhận được kết quả tương tự như phương pháp phương trình tích phân và tại một số trường hợp nhất định. Từ đó, có thể thấy rằng, phương pháp Hybrid có những ưu điểm hơn so với phương pháp gần đúng Huygens-Fresnel-Kirchhoff.

#### **4. KẾT LUẬN**

Có thể thấy rằng, phương pháp Hybrid cho phép nhận được kết quả tốt so với phương pháp phương trình tích phân ở tất cả các trường hợp. Đặc biệt, tại các vị trí góc của sóng phẳng chiếu vào đối tượng nghiên cứu, khi đó, giá trị RCS sẽ là lớn nhất.

Nghiên cứu của bài báo liên quan đến lĩnh vực giải quyết các bài toán tán xạ khi chiếu sóng phẳng vào một vật lý tưởng. Phương pháp được thảo luận trong bài báo sử dụng kết hợp các phương pháp hàm riêng, sự nhiễu xạ liên tiếp và nguyên lý tương hỗ, cùng với việc phân chia đối tượng nghiên cứu thành các vật thể nhỏ. Cùng với tính đơn giản về mặt phân tích và tính hấp dẫn của nó đối với các đánh giá sơ bộ, phương pháp này có thể dùng làm cơ sở cho các thuật toán số để phân tích điện từ trường trong các bài toán tán xạ.

#### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. Г.Т.Марков, А.Ф.Чаплин, “Возбуждение электромагнитных волн,” М.- Л., Энергия.(1967).
- [2]. Л.Фелсен, Н.Маркувиц, “Излучение и рассеяние волн,” М., Мир. (1978).
- [3]. В.А.Боровиков, Б.Е.Кинбер, “Геометрическая теория дифракции,” М. Связь. (1978).
- [4]. В.А.Фок, “Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн,” М., Советское радио.(1970).
- [5]. А.А.Kleshchev. Journal of Acoustics, Vol.6, N.4, P. 45, (2016).
- [6]. V.A.Kaloshin, D.T.Luu, “Plane wave scattering on ideally conductive plate with rounded edges,” Inter. Conf. «2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)», Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia. pp. 232-235, (2019).
- [7]. В.А.Калошин, Д.Т.Луу, “Решение задачи рассеяния на теле вращения с кусочно-аналитической формой образующей гибридным методом,” Журнал радиоэлектроники. № 6, (2020).
- [8]. В.А.Калошин, Д.Т.Луу, “Рассеяние плоской волны на цилиндре с кусочно-аналитической формой сечения,” РЭ. Т.65. №5. С. 457- 463, (2020).
- [9]. В.А.Калошин, Д.Т.Луу, “Решение задачи излучения открытого конца нерегулярного волновода гибридным методом,” Журнал радиоэлектроники. № 7, (2020).

#### **ABSTRACT**

##### **Hybrid method to solve the problem of scattering electromagnetic waves on an ideal body**

*The paper deals with the problem of electromagnetic wave scattering on an ideal conductive circular cylinder, bounded by two half-spheres, in the case of H polarization. To solve this problem, a Hybrid method has been used that combines the eigenfunction method, successive diffraction and the reciprocal principle. Compare the results of calculation of RCS (Radar Cross Section) value by Hybrid method, integral equation method, Huygens-Fresnel-Kirchhoff method.*

**Keywords:** Radar Cross Section; Hybrid method; Green's function.