

Nghiên cứu đánh giá tối ưu hiệu quả tàng hình từ trường cho vỏ tàu hình cầu dài bằng các cuộn dây khử từ đơn trục

Trịnh Đình Cường¹, Vũ Lê Hà¹, Phùng Anh Tuấn^{2*}

¹Viện Điện tử, Viện KH-CN quân sự;

²Viện Điện, Đại học Bách khoa Hà Nội.

*Email : tuan.phunganh1@hust.edu.vn

Nhận bài: 13/6/2022; Hoàn thiện: 25/7/2022; Chấp nhận đăng: 15/8/2022; Xuất bản: 26/8/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.81.2022.69-78>

TÓM TẮT

Khi hoạt động dài ngày trên biển, các tàu quân sự phải đối diện với nhiều mối nguy hiểm do các biến dị từ trường sinh ra xung quanh tàu, làm cho con tàu có khả năng bị các thiết bị phát hiện dị thường từ của đối phương “nhìn thấy”, thậm chí gây kích nổ các loại mìn cảm ứng từ, thủy lôi ở dưới đáy biển. Do đó, nhu cầu khử các dị thường từ cho tàu quân sự là yêu cầu quan trọng hàng đầu. Nghiên cứu này trình bày một giải pháp khử từ trường bằng các cuộn dây khử từ đơn trục, nhằm tối ưu hóa khả năng tàng hình từ trường cho một vỏ tàu hình cầu dài tại các vị trí phía dưới đáy vỏ tàu. Nhóm tác giả đã sử dụng các mô hình toán học của vỏ tàu và các cuộn dây để thiết lập hàm chi phí của bài toán, đồng thời sử dụng thuật toán tối ưu SQP để cực tiểu hóa hàm chi phí này với biến số là dòng điện khử từ cấp cho mỗi cuộn dây. Nghiên cứu thu được các mức khử dị thường từ cho vỏ tàu hình cầu dài, ứng với 4 kịch bản về số lượng cuộn dây khác nhau, các kết quả này góp phần thu hẹp không gian nghiệm khả thi và nhanh chóng tiệm cận tới các nghiệm tối ưu của bài toán với tàu thực.

Từ khóa: Dấu vết từ trường; Dị thường từ trường; Cuộn dây khử từ; Thuật toán tối ưu; Thuật toán Sqp.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dưới tác dụng của từ trường trái đất, các vỏ sắt từ của tàu bị từ hóa theo 3 phương khác nhau, các từ hóa này tạo ra các dị thường từ trường xung quanh tàu và gây ra nhiều mối nguy hiểm liên quan đến sự sống sót của các tàu quân sự [1-3]. Để giảm thiểu các dấu vết từ trường này, các tàu quân sự thường được trang bị hệ thống khử từ gồm nhiều cuộn dây khử từ để bù lại các dị thường từ này, và thường bố trí tối thiểu 3 nhóm cuộn dây gồm các cuộn dây dọc thân tàu (cuộn L), các cuộn dây ngang thân tàu (cuộn A) và các cuộn dây thẳng đứng so với thân tàu (cuộn V) [3-5]. Việc tính toán thiết kế các thông số về cuộn dây khử từ là một trong những yêu cầu quan trọng trong hệ thống khử từ, quyết định đến khả năng tàng hình từ trường cho con tàu.

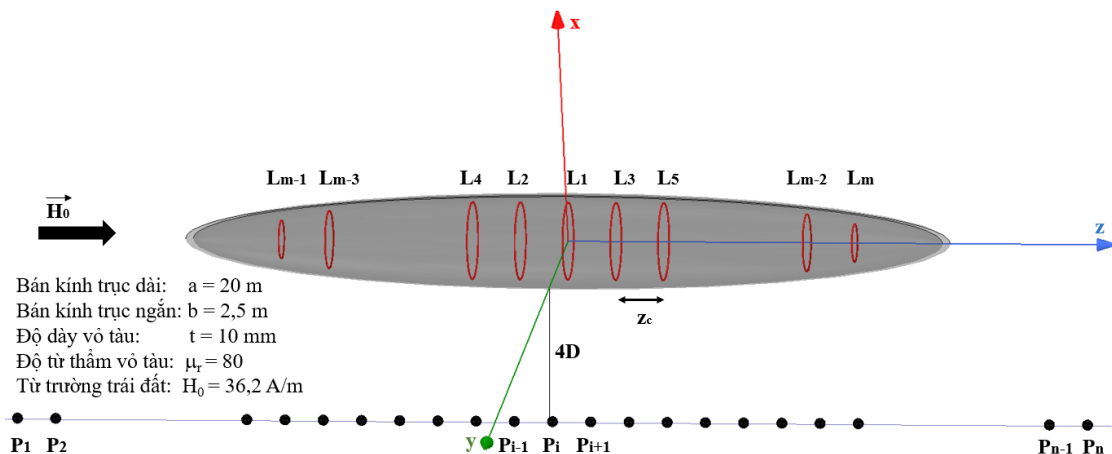
Để tính toán thiết kế một hệ thống khử từ, chúng ta phải giải một bài toán ngược phi tuyến đa biến, với hạn chế là khó xác định được nghiệm duy nhất cho bài toán. Do đó, nhiều thuật toán tối ưu đã được áp dụng để giải bài toán ngược này như thuật toán Tối ưu hóa bầy đàn [6, 7], thuật toán Di truyền [6], thuật toán Hồi quy [8], thuật toán Quasi-Newton [9], thuật toán Cuckoo [10],... Tuy nhiên, mỗi thuật toán lại áp dụng cho các đối tượng tàu và mục đích nghiên cứu khác nhau, các kết quả và thông tin công bố rất hạn chế. Trong khi đó, mỗi lớp tàu quân sự lại sử dụng một thiết kế hệ thống khử từ riêng, thông tin liên quan đều không được công bố do yếu tố bí mật quân sự. Do vậy, việc đánh giá hiệu quả của các thuật toán này là rất khó khăn.

Hiện nay, nước ta chưa có nghiên cứu và công bố nào liên quan đến tối ưu hiệu quả bù từ trường cho tàu quân sự, cũng như chưa xác định được các mức tàng hình từ trường phù hợp cho từng loại tàu. Do đó, nghiên cứu này sẽ hướng tới mục tiêu là đề xuất một giải pháp tối ưu hiệu quả bù từ trường cho một mô hình vỏ tàu. Với mục tiêu đó, nhóm tác giả sử dụng thuật toán tối ưu SQP để tính toán mô phỏng hiệu quả tàng hình từ trường cho vỏ tàu hình cầu dài bằng các cuộn dây khử từ đơn trục. Yêu cầu đặt ra là giảm thiểu tối đa các dị thường ở dưới đáy của vỏ

tàu, giúp cho tàu trở nên tàng hình về mặt từ trường trước các hệ thống phát hiện dị thường dưới đáy biển hoặc mìn biển cảm ứng, thủy lôi của đối phương. Với mục tiêu như trên, nội dung tiếp theo của nghiên cứu này được trình bày như sau: Phần 2 trình bày mô hình hóa bài toán khử từ đơn trục để xây dựng được hàm chi phí chung và lý thuyết chung của thuật toán SQP. Phần 3 trình bày các kết quả mô phỏng về hiệu quả tàng hình từ trường của vỏ tàu hình cầu dài theo 4 kịch bản về số lượng cuộn dây. Phần cuối cùng là kết luận chung và các hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

2. MÔ HÌNH HÓA BÀI TOÁN KHỬ TỪ ĐƠN TRỤC TRONG VỎ TÀU

Xét một vỏ tàu hình cầu dài có các cuộn dây khử từ bên trong như hình 1.



Hình 1. Hệ thống bù từ trường đơn trục cho vỏ tàu hình cầu dài.

Các vị trí đo từ trường P_1, P_2, \dots, P_n được bố trí trên 1 đường thẳng ở phía dưới vỏ tàu, và mỗi vị trí đo này tương ứng với một cảm biến từ trường ba trục. Đường đo từ trường cách đáy tàu một khoảng bằng $4D$, với D là chiều rộng của vỏ tàu và $D = 2b$ [3]. Các cuộn dây có dạng hình tròn, nằm trong mặt phẳng Oxy, bố trí dọc cách đều nhau một khoảng z_c . Các cuộn dây ngoài cùng có bán kính giảm dần đảm bảo điều kiện nằm hoàn toàn trong vỏ tàu. Độ dày của dây là vô cùng nhỏ và có thể bỏ qua. Nhóm tác giả cũng bỏ qua các tương tác về từ trường giữa vỏ tàu với các cuộn dây và giữa các cuộn dây với nhau, đồng thời, coi không gian bên trong và bên ngoài vỏ tàu là chân không, và có độ từ thẩm tuyệt đối là $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

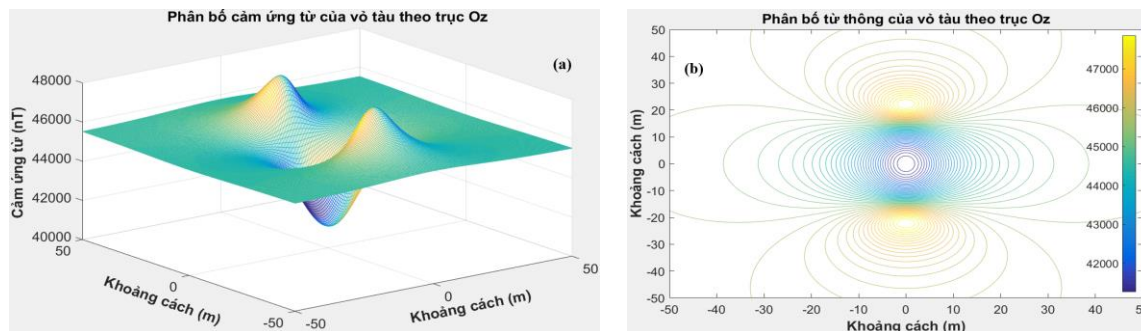
2.1. Cảm ứng từ trường của vỏ tàu hình cầu dài theo phương Oz

Khi chưa khử từ, dưới tác dụng của từ trường ngoài $B_0 = \mu_0 H_0$, cảm ứng từ theo phương Oz ở bên ngoài vỏ tàu được xác định theo các công thức (1), trong đó, biểu thức tính D_1, c, ξ, r_1, r_2 đã được xác định trong tài liệu [2, 11].

$$B_{z,votau} = B_0 + \frac{\mu_0 D_1}{c} \left[\left(-\frac{1}{2} \right) \ln \left(\frac{\xi + 1}{\xi - 1} \right) + \frac{c^2 \xi}{r_1 r_2} \right] \quad (1)$$

Có thể thấy rằng, cảm ứng từ của tàu $B_{z,votau}$ bao gồm từ trường nền B_0 và các dị thường từ $B_{z,dithuong}$ sinh ra dưới tác dụng của từ trường nền. Khi đặt từ trường nền dọc theo trục Oz, thành phần $B_{z,votau}$ sẽ đóng góp chính trong cảm ứng từ tổng của vỏ tàu. Hình dáng và độ lớn của cảm ứng từ tổng do hình dáng và độ lớn của thành phần $B_{z,votau}$ quyết định.

Theo hình 2, cảm ứng từ theo phương Oz gồm 2 lưỡng cực từ lớn xếp cạnh nhau, mật độ đường sức từ tập trung chủ yếu ở phần giao nhau của 2 lưỡng cực, các đường sức từ nhỏ hơn phân bố chủ yếu ở 2 đầu của 2 lưỡng cực.



Hình 2. Phân bố cảm ứng từ và từ thông của vỏ tàu hình cầu dài theo trục Oz.

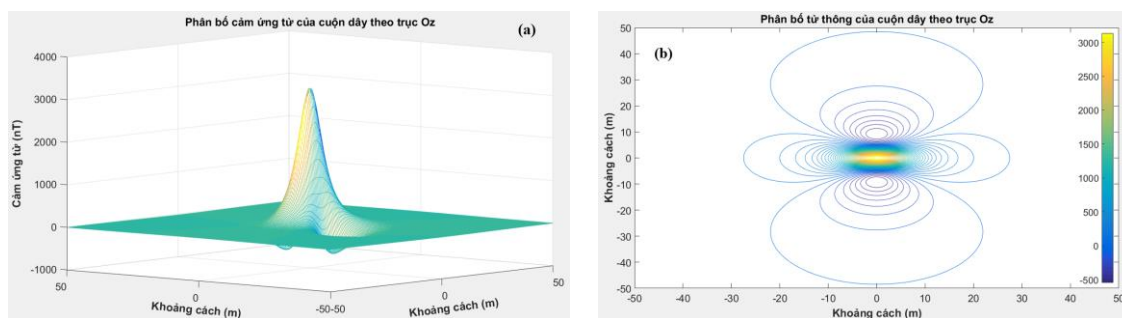
2.2. Công thức giải tích của hệ thống cuộn dây khử từ đơn trục

Mỗi cuộn dây khử từ thứ i mang một dòng điện I_i ($i = 1 \div m$) sẽ tạo ra một vector cảm ứng từ $B_{z, \text{cuonday}, i}$. Và theo nguyên lý chồng chất từ trường, xếp chồng hệ m cuộn dây khử từ này sẽ tạo ra một vector cảm ứng từ tổng trong không gian $B_{z, \text{cuonday}}$, và xác định như sau [11, 12]:

$$B_{z, \text{cuonday}} = \sum_{i=1}^m B_{z, \text{cuonday}, i}$$

$$= \sum_{i=1}^m \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{1}{\left[(R_i + \rho)^2 + z_i^2 \right]^{1/2}} \left[K_i(k_i) + \frac{R_i^2 - \rho^2 - z_i^2}{(R_i - \rho)^2 + z_i^2} E_i(k_i) \right] \quad (2)$$

Theo hình 3, phân bố các vector cảm ứng từ của một cuộn dây có cùng hình dạng nhưng ngược chiều với phân bố các vector cảm ứng từ của vỏ tàu. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ không xét đến chiều dòng điện riêng phần của từng cuộn dây, việc lựa chọn chiều dòng điện, hay chiều của vector cảm ứng từ, là một bậc tự do được xác định bởi thuật toán tối ưu.



Hình 3. Phân bố cảm ứng từ và từ thông của một cuộn dây theo trục Oz.

Với hệ m cuộn dây khử từ, các thành phần cảm ứng từ $B_{z, \text{votau}}$ của vỏ tàu được xếp chồng với các thành phần cảm ứng từ $B_{z, \text{cuonday}}$ tại từng điểm đo, và tạo ra cảm ứng từ tổng cộng được xếp chồng từ các thành phần từ trường trên, trong đó, các vector cảm ứng từ trường mà ngược chiều nhau sẽ bù trừ cho nhau. Các mức bù dị thường từ của vỏ tàu được xác định theo công thức sau:

$$r_j = B_{z_j, \text{votau}} + B_{z_j, \text{cuonday}} - B_0 \quad (3)$$

Trong đó, $j = (1, \dots, n)$ là số điểm đo từ trường, r_j là phần dư của cảm ứng từ của riêng tàu và các cuộn dây so với từ trường nền. Mục tiêu của bài toán tối ưu là cực tiểu hóa phần dư này, hay nói cách khác, hệ vỏ tàu và cuộn dây sẽ tăng hình so với từ trường nền của Trái đất.

2.3. Hàm chi phí hệ thống

Để tính toán tối ưu, hàm chi phí của hệ thống được tính theo công thức như sau:

$$f = \min \left(\sum_{j=1}^n (B_{z_j, \text{votau}} + B_{z_j, \text{cuonday}} - B_0)^2 \right) \quad (4)$$

Điều kiện ràng buộc là, dòng điện của mỗi cuộn dây nằm trong vùng xác định từ -10.000 A đến 10.000 A.

Hàm chi phí f là một hàm phụ thuộc vào rất nhiều biến số như tọa độ đo (x, y, z) , số lượng cuộn dây m , bán kính cuộn dây R_i ($i = 1 \div m$), bán kính trục dài a , bán kính trục ngắn b của vỏ tàu, độ từ thẩm tương đối của vỏ tàu μ_r , cường độ từ trường trái đất H_0 , số lượng điểm đo n và giá trị dòng điện khử từ I_i ($i = 1 \div m$) trong từng cuộn. Các biến số này thay đổi theo các thiết kế khác nhau về vỏ tàu, cuộn dây khử từ và các yêu cầu về mức độ tàng hình từ trường của tàu.

Trong phạm vi nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung cực tiểu hóa hàm chi phí f theo biến số là dòng điện khử từ I_i ($i = 1 \div m$), với 4 kịch bản về số lượng cuộn dây là 3, 7, 11 và 13 cuộn, các cuộn dây cách đều nhau 1 khoảng $z_c = 2,5 m$, với số điểm đo là $n = 101$ điểm. Các biến số còn lại đã được xác định từ các giả thiết đầu vào, giá trị độ từ thẩm tương đối của vỏ tàu μ_r và từ trường trái đất H_0 được sử dụng lại từ nghiên cứu trước đó của nhóm tác giả trong tài liệu số [2]. Việc lựa chọn số lượng tối đa 13 cuộn dây được giả thiết là đủ nhiều để đảm bảo mục tiêu khử từ trường trong bài báo này. Việc tìm số lượng cuộn dây khử từ tối thiểu và khoảng cách vòng dây phù hợp với mục tiêu bù từ trường là một bài toán cần nghiên cứu thêm bằng các kỹ thuật tối ưu khác và không nằm trong nhiệm vụ mục tiêu của nghiên cứu này.

Để có cơ sở so sánh và đánh giá kết quả, nhóm tác giả sử dụng cách so sánh định tính dưới dạng quan sát đồ thị và định lượng dưới dạng giá trị sai số căn bậc hai bình phương trung bình (RMSE) trên cùng đường lấy mẫu:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (B_{z_j, \text{votau}} + B_{z_j, \text{cuonday}} - B_0)^2} \quad (5)$$

Giá trị RMSE sau khi kết thúc mô phỏng tối ưu được dùng để so sánh với giá trị căn bậc hai bình phương trung bình (RMS) của dị thường từ ban đầu do vỏ tàu sinh ra dưới tác dụng của từ trường nền B_0 và được tính như sau:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (B_{z_j, \text{votau}} - B_0)^2} \quad (6)$$

Áp dụng công thức (1) với các thông số đầu vào đã biết, tính được giá trị RMS là $137,748 nT$.

2.4. Thuật toán tối ưu Quy hoạch bậc hai tuần tự SQP

Xét một bài toán tối ưu phi tuyến có ràng buộc dạng tổng quát như sau [13], [14]:

$$\min_x f(x), \text{ với } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (7)$$

$$\text{Ràng buộc: } h_i(x) = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, q) \quad (9)$$

Trong đó, $f(x)$, $h(x)$, $g(x)$ là các hàm phi tuyến, \mathbf{x} là vector của nhiều biến thiết kế.

Theo [13, 14], nguyên lý của thuật toán SQP là tính gần đúng ma trận Hessian của hàm Lagrange sử dụng phương pháp Quasi-Newton. Theo đó, một bài toán con Quy hoạch bậc hai (QP) được giải ở mỗi vòng lặp, nghiệm nhận được dùng để xác định độ dốc của hàm Lagrange và hướng tìm kiếm nghiệm tiếp theo. Điểm cực trị của bài toán tối ưu sẽ thỏa mãn các điều kiện Karush-Kuhn-Tucker (điều kiện KKT) và gradient của hàm Lagrange bằng 0.

Hàm Lagrange dùng để giải bài toán con QP có dạng như sau [13]:

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^p \lambda_i h_i(x) + \sum_{j=1}^q \mu_j g_j(x) = f(x) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{h}(x) + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{g}(x) \quad (10)$$

Trong đó, $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_p)^T$ và $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_q)^T$ là vector các hệ số nhân Lagrange có ràng buộc bằng và không bằng.

Theo [13], các điều kiện KKT có dạng như sau:

$$\nabla L(x, \lambda, \mu) = \nabla f(\mathbf{x}_*) + \sum_{i=1}^p \lambda_i \nabla h_i(\mathbf{x}_*) + \sum_{j=1}^q \mu_j \nabla g_j(\mathbf{x}_*) = 0 \quad (11)$$

$$\text{Và} \quad g_j(\mathbf{x}_*) \leq 0, \quad \mu_j g_j(\mathbf{x}_*) = 0, \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (12)$$

$$\text{Trong đó:} \quad \mu_j \geq 0, \quad (j=1, 2, \dots, q) \quad (13)$$

Bài toán tổng quát được tính gần đúng thông qua bài toán con QP như sau:

$$\min_{\mathbf{x}_k, \mathbf{s}} \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \nabla^2 L(\mathbf{x}_k) \mathbf{s} + \nabla f(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + f(\mathbf{x}_k), \quad (14)$$

$$\text{Ràng buộc:} \quad \nabla h_i(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + h_i(\mathbf{x}_k) = 0, \quad (i=1, \dots, p) \quad (15)$$

$$\nabla g_j(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{s} + g_j(\mathbf{x}_k) \leq 0, \quad (j=1, \dots, q) \quad (16)$$

Ma trận đối xứng dương $\mathbf{H}_k \approx \nabla^2 L(\mathbf{x}_k)$ được dùng để tính gần đúng ma trận Hessian, và \mathbf{H}_k có thể được cập nhật bằng thuật toán BFGS theo công thức sau:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \frac{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T}{\mathbf{v}_k^T \mathbf{u}_k} - \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^T \mathbf{H}_k^T}{\mathbf{u}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{u}_k}, \quad (17)$$

Trong đó, \mathbf{u}_k và \mathbf{v}_k được tính theo tài liệu [13]. Nghiệm của bài toán con QP được dùng để tạo ra vòng lặp mới, với giá trị độ dốc $s_k = -\nabla f(\mathbf{x}_k)$, được xác định theo phương trình sau:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{s}_k \quad (18)$$

Trong đó, α_k là độ dài bước điều chỉnh tại vòng lặp thứ k , và được xác định bằng phương pháp tìm kiếm dòng thích hợp để tối thiểu hóa hàm phạt sau:

$$\Phi(x) = f(x) + \rho \left[\sum_{i=1}^p |h_i(x)| + \sum_{j=1}^q \max\{0, g_j(x)\} \right] \quad (19)$$

Thuật toán tối ưu SQP được triển khai như sau:

1. Khởi tạo giá trị xuất phát x_0 và giá trị gần đúng H_0 .

Vòng lặp:

2. Cho $k = 1$ tới N thì thực hiện

3. Giải bài toán con QP theo (14) - (16). Xác định $\boldsymbol{\lambda}_k$ tại \mathbf{x}_k thỏa mãn điều kiện KKT.

4. Sử dụng phương pháp tìm kiếm dòng, xác định s_k , α_k , và x_{k+1} theo công thức (18).

5. Tính và kiểm tra hàm phạt theo công thức (19). Nếu hàm phạt không giảm thì điều chỉnh giảm giá trị của α_k và s_k tại Bước 4 cho đến khi độ lớn của hàm phạt giảm đi.

6. Đánh giá gradient của hàm Lagrange tại x_{k+1} . Cập nhật H_{k+1} theo công thức (17).

7. Tăng k lên 1 đơn vị: $k = k + 1$, tiếp tục vòng lặp cho đến khi α_k và s_k đủ nhỏ.

Kết thúc vòng lặp: Khi α_k và s_k tiến về 0 thì điều kiện KKT của bài toán được thỏa mãn.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Các kết quả tính toán mô phỏng tối ưu hiệu quả tăng hình từ trường cho vỏ tàu hình cầu dài bằng thuật toán SQP theo 4 kịch bản số được thể hiện trong bảng 1.

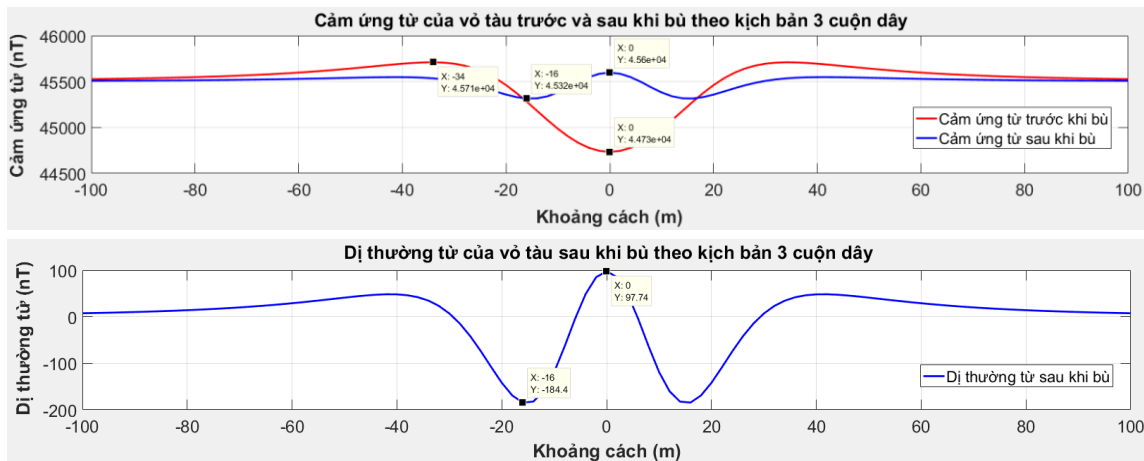
Bảng 1. Kết quả tính toán tối ưu bằng thuật toán SQP.

Số cuộn dây	Hàm chi phí ban đầu (nT^2)	Hàm chi phí sau khi bù (nT^2)	Số vòng lặp	Giá trị RMSE (nT)	Tỷ lệ giảm RMS (%)
3 cuộn	$4.17.10^8$	444751,4	11	37,246	72,961
7 cuộn	$2.64.10^8$	15305,78	34	7,602	94,481
11 cuộn	$4.63.10^8$	35,16496	43	0,314	99,772
13 cuộn	$4.84.10^8$	0,33781	59	0,030	99,978

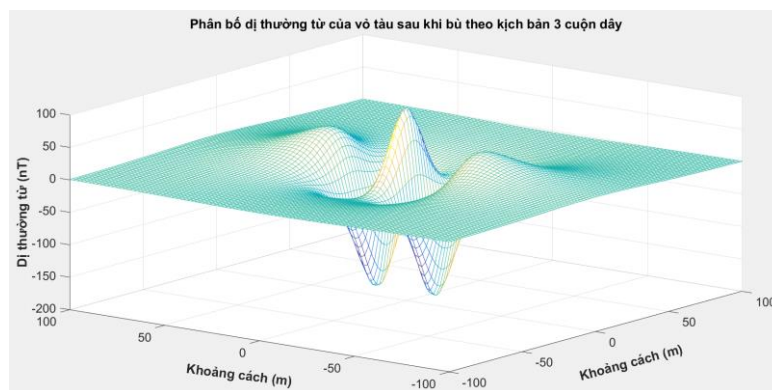
Các kết quả cụ thể với từng kịch bản được bình luận và phân tích như sau:

3.1. Kết quả tàng hình từ trường của kịch bản 3 cuộn dây

Theo bảng 1, hàm chi phí sau khi bù đã giảm đi gần 10^3 lần sau 11 vòng lặp so với hàm chi phí ban đầu, giá trị RMSE giảm còn 37,246 nT, giá trị RMS của dị thường từ ban đầu giảm đi 72,961% giá trị. Như trong hình 4, cảm ứng từ của vỏ tàu đã giảm rõ rệt, đường cảm ứng từ sau khi bù có độ rộng đỉnh giảm nhiều so với đường cảm ứng từ ban đầu, còn 282,14 nT, giá trị cực đại của dị thường từ ở nửa dương là 97,74 nT, ở nửa âm là -184,4 nT.



Hình 4. Kết quả tàng hình từ trường của kịch bản 3 cuộn dây.

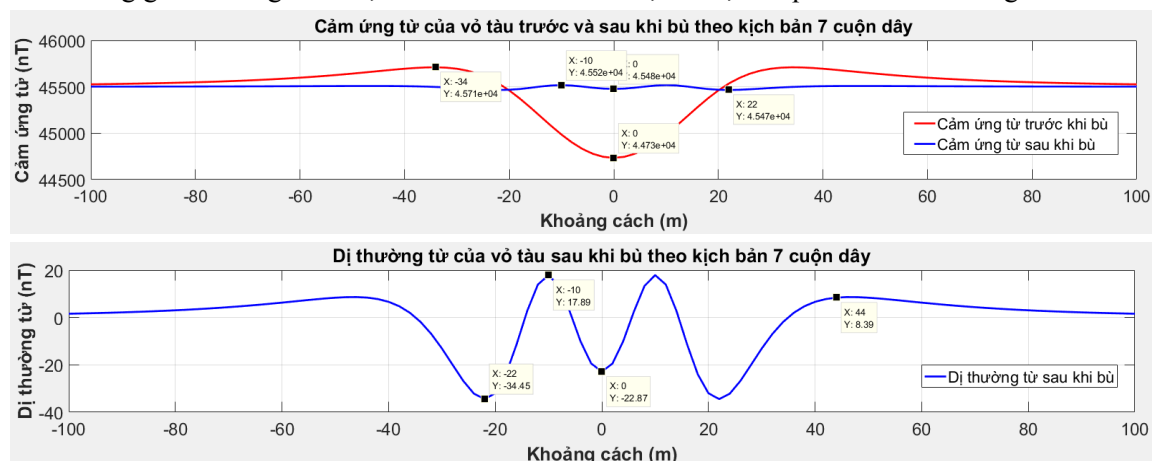


Hình 5. Phân bố dị thường từ của vỏ tàu sau khi bù theo kịch bản 3 cuộn dây.

Theo hình 5, phân bố dị thường từ của vỏ tàu đã thu hẹp độ rộng phổ, đường đặc tuyến có dạng uốn lượn hơn và có mức sai lệch so với đường 0 nT giảm đáng kể. Kết quả khử từ này giúp cho vỏ tàu có khả năng tàng hình từ ở mức 30% giá trị RMS của dị thường từ trường ban đầu. Với mức tàng hình từ này, vỏ tàu hoàn toàn có khả năng bị các từ kế có độ nhạy 100 nT phát hiện ở khoảng cách 4D.

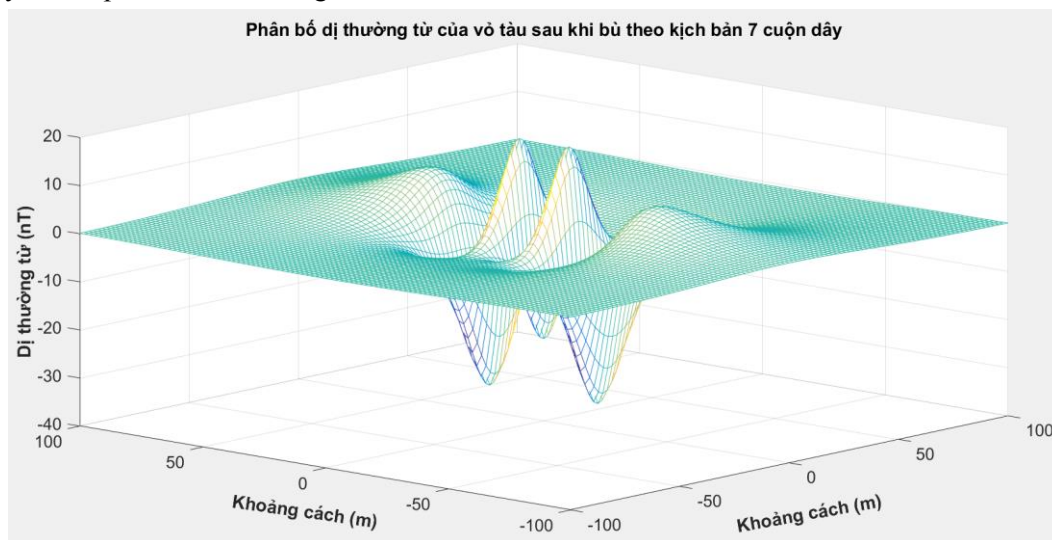
3.2. Kết quả tàng hình từ trường của kịch bản 7 cuộn dây

Ở kịch bản này, hàm chi phí sau khi bù đã giảm gần 2.10^4 lần sau 34 vòng lặp, giá trị RMSE giảm còn 7,602 nT, tỷ lệ giảm giá trị RMS là 94,481%. Với các mức giảm như vậy, đường cảm ứng từ sau khi bù đã giảm gần hết so với đường cảm ứng từ ban đầu, độ rộng đỉnh đỉnh rất nhỏ, khoảng 52,34 nT. Giá trị cực đại của dị thường từ giảm hơn 5 lần so với kịch bản 3 cuộn dây, nửa dương giảm xuống còn 17,89 nT và nửa âm là -34,45 nT, kết quả chi tiết có trong hình 6.



Hình 6. Kết quả tàng hình từ trường của kịch bản 7 cuộn dây.

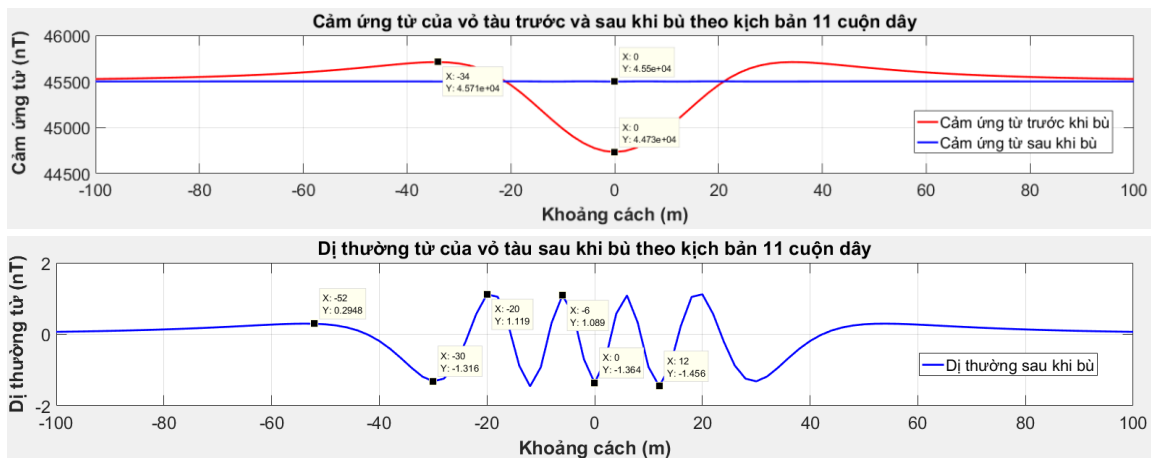
Trên hình 7, độ gợn sóng của dị thường từ khá nhỏ, mức thay đổi lớn nhất so với từ trường nền là 34,45 nT. Do đó, với mức dị thường từ này, vỏ tàu vẫn có khả năng bị các từ kế có độ nhạy 10 nT phát hiện ở khoảng cách 4D.



Hình 7. Phân bố dị thường từ của vỏ tàu sau khi bù theo kịch bản 7 cuộn dây.

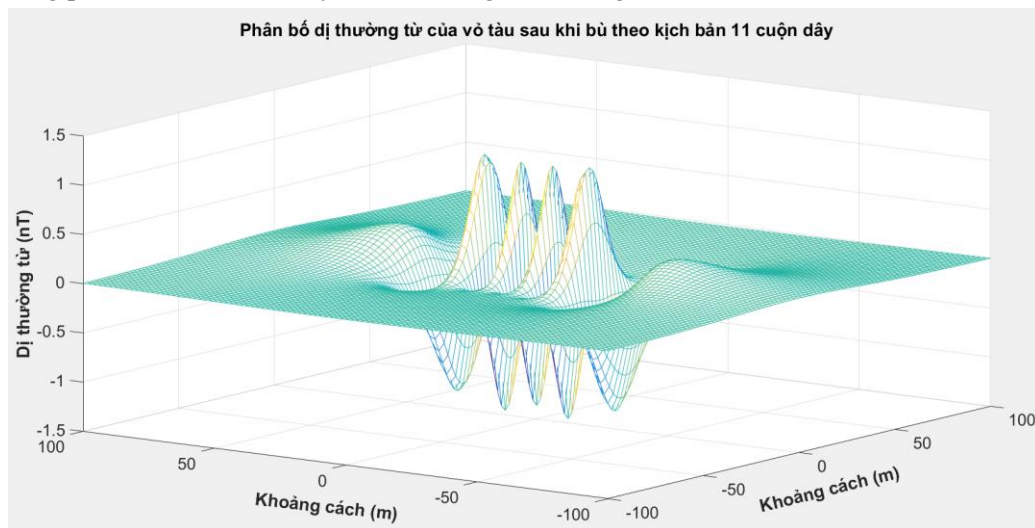
3.3. Kết quả tàng hình từ trường của kịch bản 11 cuộn dây

Kết quả tính toán theo kịch bản 11 cuộn dây tốt hơn rất nhiều so với kịch bản 7 cuộn dây, hàm chi phí sau khi bù đã giảm gần 10^7 lần chỉ sau 43 vòng lặp, giá trị RMSE giảm còn 0,314 nT, giá trị RMS đã giảm 99,772%. Trong hình 8, đường cảm ứng từ sau khi bù đã trùng khớp với đường từ trường nền, mức chênh lệch lớn nhất chỉ khoảng 1,456 nT, độ rộng đỉnh đỉnh giảm còn 2,575 nT. Giá trị cực đại của dị thường từ đã giảm rất nhiều so với kịch bản 7 cuộn dây, ở nửa dương giảm gần 16 lần xuống còn 1,119 nT, ở nửa âm giảm gần 24 lần còn -1,456 nT.



Hình 8. Kết quả tàng hình từ trường của kích bản 11 cuộn dây.

Ở kích bản này, đường dị thường từ đã gần như trùng với đường 0 nT, hiệu quả bù từ trường gần như tuyệt đối. Dị thường từ lớn nhất khoảng 0,9 – 1,12 nT so với nền 0 nT, như hình 9. Các từ kế có độ nhạy 1 nT sẽ rất khó phân biệt được mức dị thường từ này của tàu khi xét đến các nhiễu đo lường của thiết bị. Khi đó, chỉ có các từ kế có độ nhạy rất cao, ở mức 100 pT, mới có khả năng phát hiện được sự thay đổi từ trường tại khoảng cách 4D.

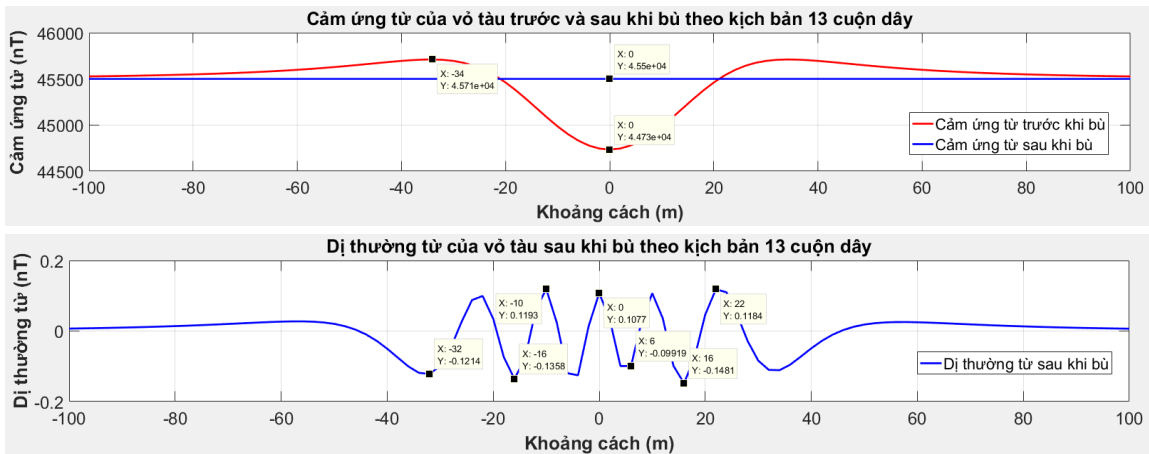


Hình 9. Phân bố dị thường từ của vỏ tàu sau khi bù theo kích bản 11 cuộn dây.

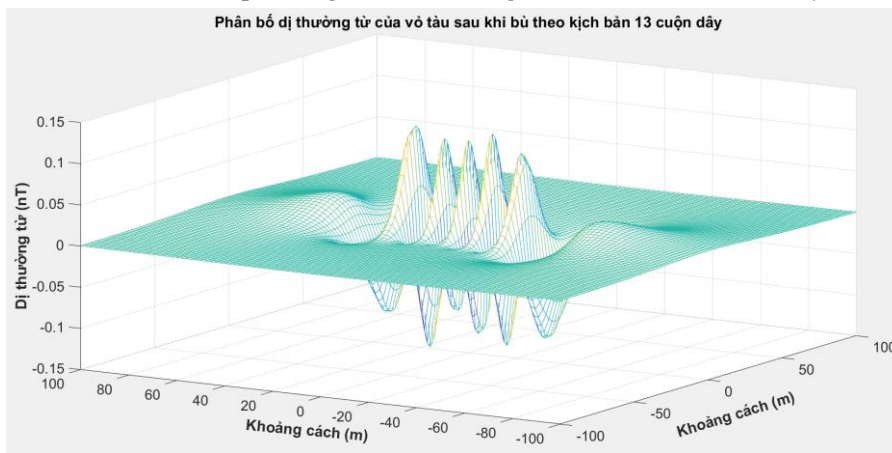
3.4. Kết quả tàng hình từ trường với kích bản 13 cuộn dây

Kích bản 13 cuộn dây cho kết quả tối ưu tốt nhất trong 4 kích bản đang xét, đường cảm ứng từ trường sau khi bù đã hoàn toàn trùng khớp với đường từ trường nền, dị thường từ trường đã giảm gần như về 0 nT. Quan sát hình 10 thấy rằng, hàm chi phí sau khi bù đã giảm gần như tuyệt đối, mức giảm giá trị RMS lên tới 99,978%, và giá trị RMSE đã giảm còn 30 pT. Mức chênh lệch dị thường từ lớn nhất vào khoảng 148 pT so với nền 0 pT, độ rộng đỉnh đỉnh lớn nhất giảm chỉ còn 265 pT. Giá trị cực đại của dị thường từ trường ban đầu đã giảm 10 lần so với kích bản 11 cuộn dây, ở nửa dương giảm xuống còn 119 pT, và còn -148 pT ở nửa âm.

Do đó, chỉ có các thiết bị từ kế có độ nhạy cực cao, khoảng 100 pT mới có thể phát hiện được dị thường từ của tàu ở khoảng cách 4D này. Có thể nói rằng, khi xét ở dải đo nanoTesla, vỏ tàu với kích bản 13 cuộn dây khử từ có thể coi như hoàn toàn tàng hình từ trường ở mức nanoTesla ở khoảng cách 4D ở phía dưới tàu.



Hình 10. Kết quả tàng hình từ trường của kích bản 13 cuộn dây.



Hình 11. Phân bố dị thường từ của vỏ tàu sau khi bù theo kích bản 13 cuộn dây.

Đề đo lường ở thang picoTesla, hệ từ kế và đối tượng đo phải được bố trí ở các khu vực không có nhiễu nền xung quanh như ngoài biển hoặc sâu trong lòng núi. Đồng thời, các từ kế này cũng phải sử dụng các thuật toán xử lý tín hiệu phù hợp với các mức thay đổi từ trường vô cùng nhỏ ở vùng trường xa thì mới có khả năng phát hiện được các mức dị thường từ trường này.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các kết quả đánh giá tối ưu hiệu quả tàng hình từ trường của một vỏ tàu hình cầu dài bằng thuật toán SQP thông qua 4 kích bản khác nhau về số lượng cuộn dây khử từ đơn trục. Kết quả cho thấy, giải pháp khử từ trường bằng các cuộn dây khử từ đơn trục hoàn toàn có khả năng khử các dị thường từ của vỏ tàu ở phía dưới đáy tàu, hiệu quả tàng hình từ trường có thể xuống đến dải picoTesla. Cách tiếp cận và kết quả của nghiên cứu cho thấy sự phù hợp đối với các nghiên cứu thiết kế ban đầu về khử từ cho tàu nói chung, góp phần đưa ra các đánh giá nhanh về không gian nghiệm khả thi và dự đoán gần đúng các kích bản tàng hình từ trường cho các mô hình vỏ tàu tương đương. Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là tính toán mô phỏng với bài toán sử dụng 3 hệ cuộn dây khử từ, và có xét đến sự tương tác từ trường giữa các cuộn dây và giữa cuộn dây với vỏ tàu, các kết quả thu được này sẽ tiệm cận gần hơn nữa với bài toán khử từ cho tàu thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. J. Holmes, "Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures", vol. 3, no. 1 (2008).

- [2]. Trịnh Đình Cường, Đỗ Đình Dương, Vũ Lê Hà, Đỗ Thị Hương Giang, Phùng Anh Tuấn, “Nghiên cứu xác định dấu vết từ trường của một số mô hình vỏ tàu sắt từ”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, số 68, pp 80-88, (2020).
- [3]. Mahdi Che Isa, “An overview of ship magnetic signature and silencing technologies”, Defence S and T Technical Bulletin vol 12, pp 176-192, (2019).
- [4]. J. J. Holmes, “Reduction of a Ship’s Magnetic Field Signatures”, Synth. Lect. Comput. Electromagn, vol. 3, no. 1, pp. 1–68, Jan., (2008).
- [5]. A. Vijn, “Inverse Modeling for Magnetic Signature Monitoring of Naval Ships,” Delft Institute of Applied Mathematics, January, (2016).
- [6]. S. M. Makouie and A. Ghorbani, “Comparison between genetic and particle swarm optimization algorithms in optimizing ships’ degaussing coil currents”, Appl. Comput. Electromagn. Soc. J., vol. 31, no. 5, pp. 516–523, (2016).
- [7]. Hongda, L., Zhongli, M. “Optimization of vessel degaussing system based on poly-population particle swarm algorithm”, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp 3133–3137, (2007).
- [8]. Sharma, N., & Narang, K, “Magnetic Silencing of Naval Vessels Using Ridge Regression”, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), vol 5, issue V, pp. 756–760, (2017).
- [9]. Jeung, G., Choi, N. S., Yang, C. S., Chung, H. J., & Kim, D. H, “Indirect fault detection method for an onboard degaussing coil system exploiting underwater magnetic signals”, Journal of Magnetics, vol 19, issue 1, pp. 72–77, (2014).
- [10]. Li, G., Zhang, D., Su, Y., Wang, Z., & Tang, W, “Research on Optimization of Degaussing Current of Submarine Based on Improved Cuckoo Algorithm”, Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, pp. 4595–4599, (2020).
- [11]. J. J. Holmes, “Modeling a Ship’s Ferromagnetic Signatures”, vol. 2, no. 1. (2007).
- [12]. S. Hampton, R. A. Lane, R. M. Hedlof, R. E. Phillips, and C. A. Ordonez, “Closed-form expressions for the magnetic fields of rectangular and circular finite-length solenoids and current loops”, AIP Adv., vol.10, no. 6, (2020).
- [13]. Xin-She Yang, “Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications”, John Wiley & Sons Inc, (2018).
- [14]. Boggs, P. T., & Tolle, J. W. “Sequential Quadratic Programming”. Acta Numerica, vol 4, pp. 01–51, (1995).

ABSTRACT

Assessment research on optimizing the effectiveness of magnetic stealth for prolate spheroidal hulls with uniaxial degaussing coils

When operating for a long time at sea, military ships face many dangers due to variations in the magnetic fields around the ship, making the ship capable of being "visible" by the enemy's magnetic anomaly detection devices, even detonating magnetic-inductive mines and mines at the bottom of the sea. Therefore, the need to silencing magnetic anomalies for military ships is the most important requirement. This research presents a demagnetization solution using uniaxial demagnetizing coils to optimize magnetic field degaussing for a prolate spheroidal hull at positions below the hull bottom. The authors used mathematical models of the hull and coils to establish the cost function of the problem, concurrent used the SQP optimization algorithm to minimize this cost function with the variable being the degaussing current supplied to each coil. The research obtained magnetic anomaly reduction levels for a prolate spheroidal hull, corresponding to 4 scenarios for different number of coils, results contribute to narrowing the feasible solution space and quickly approaching the optimal solutions of the problem with real military ships.

Keywords: Magnetic Signature; Magnetic Anomaly; Degaussing Coil; Optimization Algorithm; Sqp Algorithm.