NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN TỐI ƯU MẢNG CẢM BIẾN TỪ ĐỂ PHÁT HIỆN DẤU VẾT TỪ TRƯỜNG CỦA TÀU QUÂN SỰ

Trịnh Đình Cường[1], Vũ Lê Hà[1], Nguyễn Thị Ngọc[2],
Đỗ Thị Hương Giang[3, 4], Phùng Anh Tuấn[5*]

Tóm tắt: *Trong các thiết bị phát hiện dị thường từ trường của tàu quân sự, cảm biến từ trường là thành phần quan trọng nhất, ảnh hưởng trực tiếp tới khả năng phát hiện và độ chính xác của các kết quả đo dị từ. Các cảm biến này thường là loại độ nhạy cao, có sử dụng các lõi vật liệu phản ứng rất mạnh với từ trường ngoài. Khi đặt đủ gần nhau, các cảm biến này có thể tương tác với nhau và làm cho kết quả đo lường có thể bị sai lệch. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu tính toán tối ưu khoảng cách phân bố các cảm biến từ trong không gian 1D và 2D, với mục tiêu giảm thiểu tối đa ảnh hưởng lẫn nhau của các cảm biến đặt gần nhau. Kết quả kỳ vọng là xác định được khoảng cách và tương ứng với số lượng tối ưu các cảm biến, đủ để coi như không có sự ảnh hưởng về từ trường giữa các cảm biến lân cận với nhau.*

Từ khóa: Phân bố cảm biến; Mảng cảm biến từ; Phát hiện từ trường; Dấu vết từ trường; Dị từ.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dấu vết từ trường của tàu đã và đang được sử dụng rộng rãi trên toàn thế giới để phát hiện và xác định vị trí của các tàu quân sự đang hoạt động trên biển. Với tàu sắt từ, các dấu vết từ trường được xác định là các dị thường từ trường so với từ trường Trái đất, do từ hóa vĩnh cửu hoặc từ hóa cảm ứng phân bố trên thân tàu, được tạo ra xung quanh con tàu. Mặc dù cường độ của dị thường từ trường này nhỏ hơn nhiều so với từ trường của Trái đất, nhưng nó có thể kích hoạt các hệ thống vũ khí dưới nước được trang bị cảm biến từ trường có độ nhạy cao, chẳng hạn như mìn cảm ứng từ hoặc hệ thống thiết bị phát hiện dị từ dưới nước.

Do đó, để bảo vệ con tàu khỏi những mối đe dọa này, chúng ta phải biết được các dấu vết từ trường do tàu đó tạo ra, để làm cơ sở cho thực hiện các biện pháp đối phó thích hợp chống lại các cảm biến phát hiện của mìn cảm ứng từ hoặc hệ thống phát hiện dị từ dưới nước. Trong nghiên cứu trước đây của nhóm nghiên cứu [1], chúng tôi đã mô phỏng và tính toán được phân bố từ hóa cảm ứng của một số mô hình vỏ tàu sắt từ, xác định được phân bố và hình dạng bức xạ từ trường của chúng. Tuy nhiên, chúng ta rất khó dự đoán dị thường từ trường do từ hóa vĩnh cửu gây ra. Lý do là vì không có thông tin về lịch sử từ trường của thân tàu, chẳng hạn như ứng suất cơ hoặc nhiệt trong quá trình gia công vỏ tàu, lịch sử di chuyển trong từ trường của tàu [4]. Cách duy nhất [3] có thể là dự đoán sự phân bố từ hóa vĩnh cửu trên thân tàu thông qua việc giải một bài toán ngược với dữ liệu trường dưới nước đo được và thiết lập một quá trình bù từ trường phù hợp dựa trên từ hóa vĩnh cửu được tính toán. Vì vậy, cần phải có một hệ thống thiết bị đo lường chính xác đối với từ trường cảm ứng và từ trường vĩnh cửu của tàu quân sự, từ đó sẽ thực hiện hiệu quả hơn việc xử lý từ trường cho các tàu quân sự.

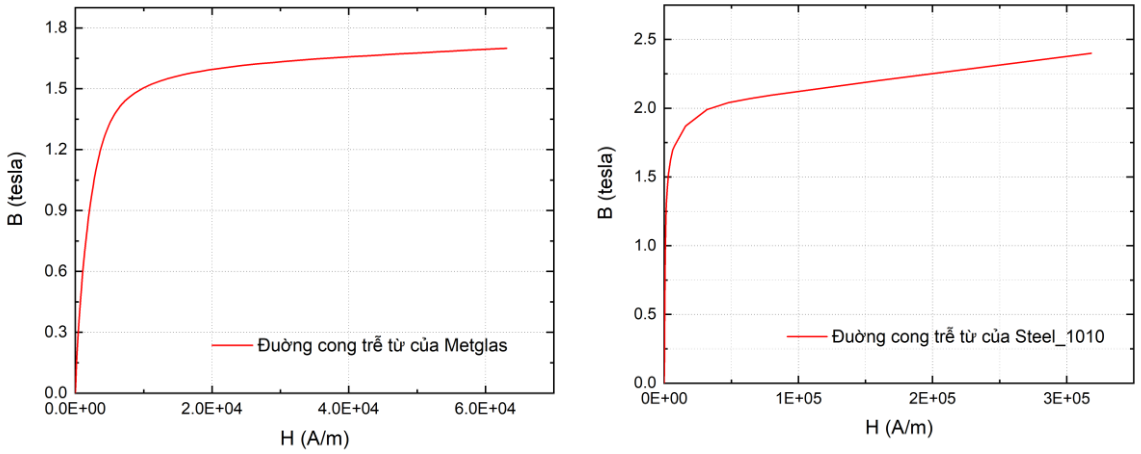
Trong các hệ thống phát hiện dị thường từ, cảm biến từ trường là thành phần rất quan trọng, có tính quyết định đến hiệu quả phát hiện và độ chính xác của các kết quả đo dị thường từ. Các cảm biến này thường là loại cảm biến có độ nhạy cao, có sử dụng các lõi vật liệu hưởng ứng rất mạnh với từ trường ngoài đặt vào. Chúng thường được bố trí theo cấu hình mảng 1D hoặc 2D với số lượng hữu hạn. Tuy nhiên, khi các cảm biến này được bố trí đủ gần nhau, chúng có khả năng tương tác và ảnh hưởng lẫn nhau, làm sai lệch các kết quả đo lường. Do vậy, cần phải nghiên cứu tính toán tối ưu khoảng cách phân bố giữa các cảm biến từ với mục tiêu giảm thiểu tối đa ảnh hưởng lẫn nhau của các cảm biến đặt gần nhau. Mong muốn cần được giải quyết là các ảnh hưởng này phải nhỏ hơn độ nhạy của chính cảm biến đó, và khi đó chúng ta có thể bỏ qua ảnh hưởng của các cảm biến xung quanh lên cảm biến đang xét trong các hệ thống đo lường dị thường từ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT LẬP MÔ PHỎNG

2.1. Lựa chọn vật liệu làm cảm biến và tàu

Vật liệu cảm biến được lựa chọn là vật liệu Metglas, các thông số từ của vật liệu này được đo bằng phương pháp đo từ kế mẫu rung (Vibrating sample magnetometer – VSM), thông qua sử dụng hệ đo VSM LakeShore 7404 (Lakeshore, USA) tại Phòng Thí nghiệm Công nghệ Micro và Nano, Đại học Công Nghệ - ĐHQGHN. Kết quả của các phép đo này cho phép đánh giá được đặc trưng từ hóa của vật liệu thông qua đo đường cong M(H) là hưởng ứng của từ độ của vật liệu theo từ trường ngoài đặt vào.

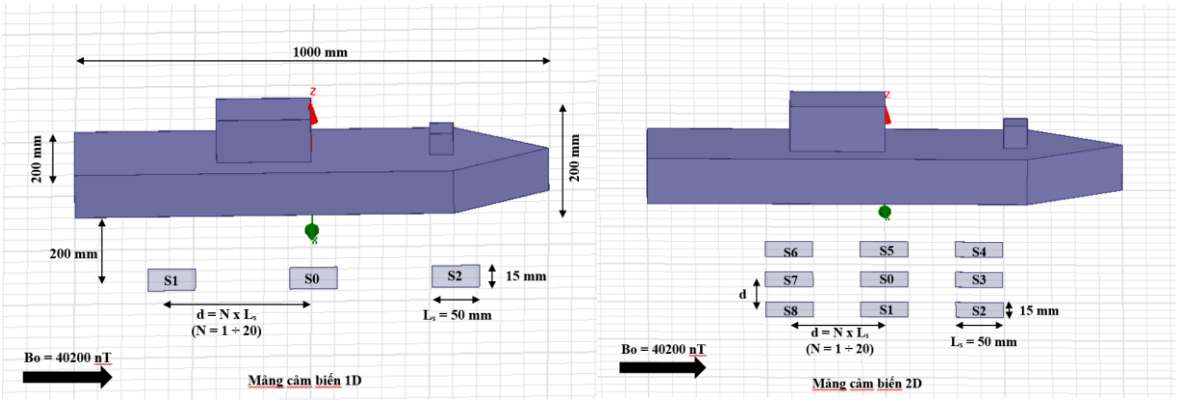
Vật liệu làm vỏ tàu là thép lá 1010 có sẵn trong thư viện của phần mềm mô phỏng, với đường cong trễ từ như hình 1.



a. Vật liệu Metglas chế tạo cảm biến *b. Vật liệu thép lá 1010 chế tạo vỏ tàu*

Hình 1. *Đường cong trễ từ của vật liệu làm cảm biến và tàu.*

2.2. Thiết lập mô hình mạng cảm biến để đo từ trường tàu



Hình 2. *Mô hình mảng cảm biến 1D và 2D.*

Tàu nằm trên mặt phẳng Oxy, mũi tàu hướng theo chiều dương của trục Oy và dọc theo chiều của từ trường ngoài H_0. Khi đó, dị thường từ trường lớn nhất do tàu sinh ra sẽ nằm dọc theo trục Oy, nên bài toán này chỉ xét thành phần từ trường theo trục Oy để làm cơ sở tính toán tối ưu khoảng cách phân bố cảm biến trong mảng cảm biến 1D và 2D. Do đặc tính cảm biến nhạy với thành phần từ trường dọc trục cảm biến, nên cảm biến sẽ được bố trí song song với trục Oy. Vì vậy, dị thường từ trường do tàu sinh ra được đánh giá bằng dị thường từ trường đo được theo trục Oy. Trên cơ sở đó, mảng cảm biến 1D và 2D sẽ được bố trí như trong hình 2. Để thuận tiện

trong việc theo dõi, các cảm biến sẽ được đánh số thứ tự là S_i (Sensor thứ i, i=1÷8) Trong cả 2 mảng trên, các cảm biến từ S_0 đến S_8 có dạng thanh chữ nhật, độ dày là 0,2 mm, độ nhạy là 1 nT, cảm biến S_0 được chọn để tính toán và đánh giá ảnh hưởng về từ trường của các cảm biến lân cận, khoảng cách giữa các cảm biến d được tính theo số nguyên N lần chiều dài của cảm biến. Giá trị 1 nT (nano Tesla) là giá trị độ nhạy của cảm biến được chế tạo.

2.3. Phương pháp mô phỏng

Khi tàu hoạt động trên các vùng biển, tốc độ di chuyển của tàu là chậm so với tốc độ thay đổi về từ trường nền của các vùng biển trên trái đất. Đồng thời, với phân bố hiện nay của từ trường của trái đất [2], sự thay đổi từ trường cảm ứng của tàu so từ trường nền cũng là rất chậm, đủ để có thể coi từ trường cảm ứng này là từ trường tĩnh trong không gian. Do đó, bài báo sử dụng bộ giải từ tĩnh của phần mềm mô phỏng số khi xem xét bài toán phân bố từ trường dị thường do mô hình tàu gây ra. Ngoài ra, bài báo cũng sử dụng phần mềm OriginPro để tính toán, tổng hợp và hiển thị các kết quả mô phỏng. Theo đó, bài báo sẽ tiến hành mô phỏng, tính toán cho 2 bài toán như sau:

** Xác định tối ưu khoảng cách giữa các cảm biến trong mảng 1D và 2D*

Khoảng cách tối ưu giữa các cảm biến được quy ước là khoảng cách mà tại đó ảnh hưởng từ trường do các cảm biến lân cận nhau sinh ra nhỏ hơn độ nhạy của các cảm biến đó.

Do các cảm biến sử dụng có dạng thanh chữ nhật, nên dị thường từ trường đo được trên cảm biến S_0 sẽ là giá trị dị thường từ trường hiệu dụng ΔB_{eff} tính trung bình trên toàn bộ thể tích của cảm biến S_0 đó theo công thức sau:

$$\Delta B_{eff} = \frac{1}{V_{sen}} \int \Delta B_y \, dV_{sen} \quad (1)$$

Trong đó, V_{sen} là thể tích của của cảm biến S_0, ΔB_y là giá trị dị thường từ trường theo trục Oy tại 1 điểm trên cảm biến S_0. Khi đó, yêu cầu đặt ra là cần tính toán dị thường từ trường hiệu dụng của cảm biến S_0 trong không gian có mô hình tàu của 2 trường hợp sau:

- Khi chưa bố trí mảng cảm biến, ký hiệu là $\Delta B_{eff_chuẩn}$;

- Khi có bố trí mảng cảm biến, ký hiệu là ΔB_{eff}.

Khi đó, ảnh hưởng từ trường của các cảm biến lân cận lên cảm biến S_0 trong mảng 1D và 2D tính theo công thức sau:

$$\Delta B = \Delta B_{eff_chuẩn} - \Delta B_{eff} \quad (2)$$

Yêu cầu đặt ra của bài toán là xác định được khoảng cách d giữa các cảm biến sao cho phải thỏa mãn điều kiện $\Delta B \leq 1\ nT$.

** Xác định tối ưu số lượng cảm biến dùng để đo dấu vết từ trường của tàu*

Số lượng tối ưu cảm biến được xác định trên cơ sở số điểm đo từ trường đủ để khôi phục được đường dị thường từ do tàu tạo ra. Càng nhiều điểm đo (hay số lượng cảm biến càng nhiều) thì đường đặc tuyến đo được càng bám sát đường chuẩn, do đó, kết quả đo càng chính xác. Tuy nhiên, điều này dẫn đến tốn chi phí cho chế tạo hệ thống đo.

Chính vì vậy, bài báo sử dụng phương pháp tính toán là so sánh vùng diện tích phía dưới đường dị thường từ trường của các mảng cảm biến khác nhau và vùng diện tích phía dưới đường dị thường từ trường chuẩn. Theo đó, số lượng tối ưu cảm biến sẽ được lựa chọn ở một mức sai số chấp nhận được khi sử dụng phương pháp so sánh các vùng diện tích trên. Để thực hiện việc đó, bài báo sẽ xác định các vùng diện tích phía dưới đường dị thường từ trường trong các trường hợp sau:

- Khi không bố trí mảng cảm biến, kết quả thu được đường dị thường từ trường chuẩn là $\Delta B_{y_chuẩn}$ và vùng diện tích dị từ chuẩn là $\Delta S_{chuẩn}$.

- Khi có bố trí mảng cảm biến, kết quả thu được đường dị thường từ trường là ΔB_y và vùng diện tích dị từ sai khác giữa đường ΔB_y so với $\Delta B_{y_chuẩn}$ là ΔS.

Khi đó, sai số giữa vùng diện tích tạo bởi đường ΔB_y so với đường $\Delta B_{y_chuẩn}$ được tính theo công thức sau:

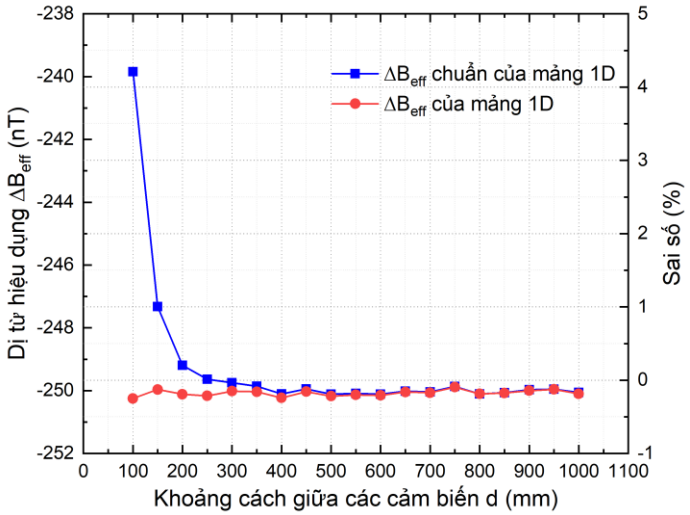
$$\delta\,(\%) = \frac{\Delta S}{\Delta S_{chuẩn}}\,100\% \qquad (3)$$

Yêu cầu đặt ra của bài toán là xác định được số lượng cảm biến tối ưu đủ để khôi phục được đường đặc tuyến $\Delta B_{y_chuẩn}$ với sai số vùng diện tích $\delta \leq 20\%$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khoảng cách tối ưu giữa các cảm biến trong mảng 1D

Kết quả mô phỏng tính toán dị từ trường hiệu dụng tại cảm biến S_0 trong mảng 1D được thể hiện trong hình 3.



Hình 3. *Khoảng cách tối ưu giữa 2 cảm biến trong mảng 1D.*

Theo đó, khi tăng khoảng cách giữa các cảm biến, dị thường từ trường đo được tại cảm biến S_0 giảm dần từ 239 nT đến 250 nT, do đó, ảnh hưởng từ trường của 2 cảm biến lân cận nhau cũng giảm dần.

- Khi khoảng cách giữa 2 cảm biến lân cận nhau: d $\geq$ 200 mm, thì ảnh hưởng từ trường giữa 2 cảm biến này: $\Delta B \leq$ 1 nT, tương ứng với sai số nhỏ hơn 0,367% so với giá trị $B_{eff_chuẩn}$.

- Khi khoảng cách giữa 2 cảm biến lân cận nhau: d $\geq$ 450 mm, thì ảnh hưởng từ trường giữa 2 cảm biến này: $\Delta B \leq$ 0,1 nT, tương ứng với sai số nhỏ hơn 0,034% so với giá trị $B_{eff_chuẩn}$.

Do đó, với cảm biến có độ nhạy là 1 nT, khoảng cách tốt nhất mà ở đó, sự hưởng ứng giữa 2 cảm biến lân cận nhau trong mảng 1D nhỏ hơn độ nhạy, được lựa chọn là: d $\geq d_{\min_1} =$ 200 mm, tương đương với 4 lần chiều dài của cảm biến.

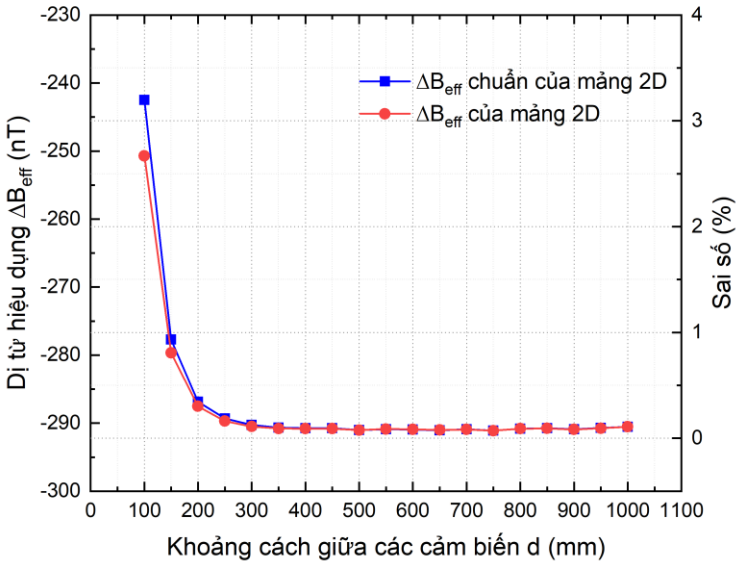
3.2. Khoảng cách tối ưu giữa các cảm biến trong mảng 2D

Kết quả mô phỏng tính toán dị từ trường hiệu dụng tại cảm biến S_0 trong mảng 2D được thể hiện trong hình 4.

Theo đó, khi tăng khoảng cách giữa các cảm biến, dị thường từ trường đo được tại cảm biến S_0 giảm dần từ 242 nT đến 290 nT, do đó, ảnh hưởng từ trường của 2 cảm biến lân cận nhau cũng giảm dần.

- Khi khoảng cách giữa 2 cảm biến lân cận nhau: d $\geq$ 200 mm, thì ảnh hưởng từ trường giữa 2 cảm biến này: $\Delta B \leq$ 1 nT, tương ứng với sai số nhỏ hơn 0,0119% so với giá trị $B_{eff_chuẩn}$.

- Khi khoảng cách giữa 2 cảm biến lân cận nhau: d $\geq$ 400 mm, thì ảnh hưởng từ trường giữa 2 cảm biến này: $\Delta B \leq$ 0,1 nT, tương ứng với sai số nhỏ hơn 0,0015% so với giá trị $B_{eff_chuẩn}$.

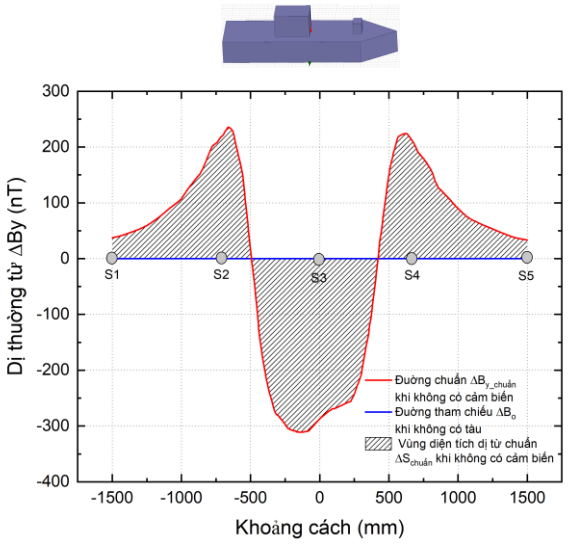


Hình 4. *Khoảng cách tối ưu giữa 2 cảm biến trong mảng 2D.*

Do đó, với cảm biến có độ nhạy là 1 nT, khoảng tối ưu giữa 2 cảm biến lân cận nhau trong mảng 2D được lựa chọn là: d $\geq d_{\min_2}$ = 200 mm, tương đương với 4 lần chiều dài của cảm biến. Kết quả này tương đồng với kết quả nhận được đối với mảng 1D (ở phần 3.1). Tuy nhiên, sự tương đồng này không xảy ra đối với các kết quả với độ nhạy khác 1 nT.

3.3. Tối ưu số lượng cảm biến dùng để đo dấu vết từ trường của tàu

Do các cảm biến có các tính chất vật lý giống nhau và cách đều nhau, nên việc tính số lượng tối thiểu cảm biến trong mảng 2D thực chất chính là tính đối với 1 mảng cảm biến 1D và áp dụng tương tự cho các mảng 1D khác bên trong cấu trúc mảng 2D.

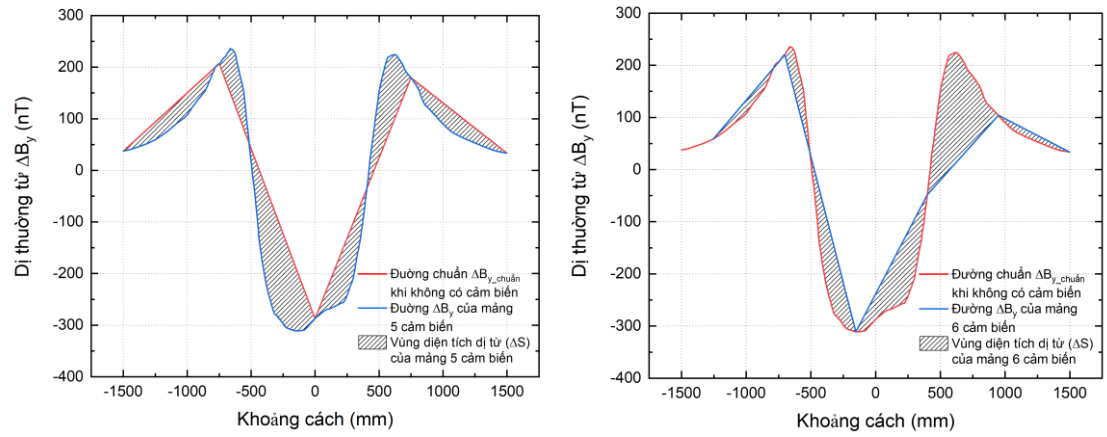


Hình 5. *Vùng diện tích dị từ chuẩn $\Delta S_{chuẩn}$ và số lượng cảm biến tối thiểu.*

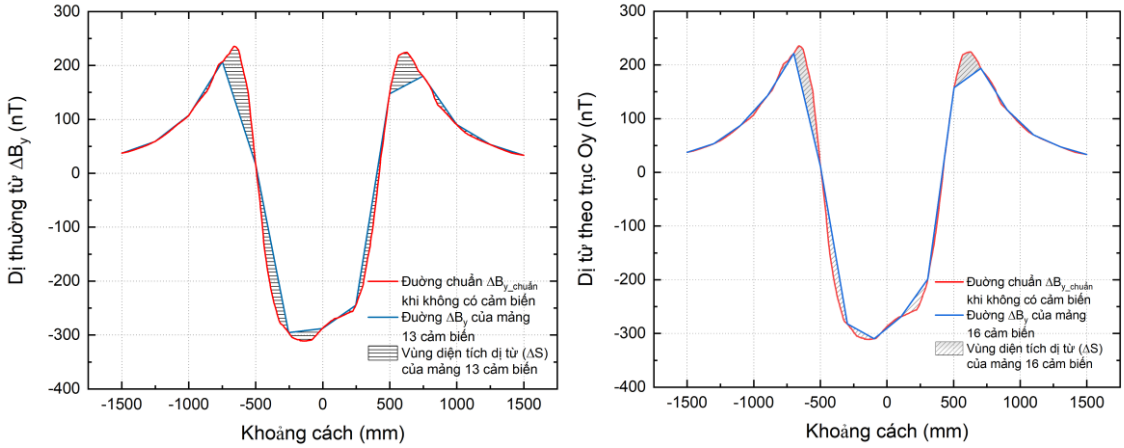
Từ các kết quả của [1], đường dị thường từ có xu hướng giảm mạnh về hai bên của đồ thị, tiến gần đến mức 0 ở khoảng cách đủ lớn. Với tàu có chiều dài 1000 mm thì phổ dị từ chỉ có ý nghĩa khi nằm trong khoảng ±1,5 lần chiều dài của tàu, tương ứng với từ -1500 mm đến 1500 mm tính từ điểm giữa của đồ thị. Do đó, độ rộng phổ dị từ được xác định là 3000 mm, và cần ít nhất 5 điểm đo (tương ứng với khoảng cách tối đa giữa 2 cảm biến cạnh nhau là 750 mm) để có thể xây dựng được đường đặc tuyến $\Delta B_{y_chuẩn}$ như trong hình 5.

Khi đó, bằng việc đặt cố định cảm biến ở 2 đầu dải phổ, các cảm biến còn lại của mảng 1D được bố trí cách đều nhau nằm bên trong dải phổ, với khoảng cách d tính theo số nguyên lần chiều dài của cảm biến. Khi đó ta thu được các mảng cảm biến 1D ứng với số lượng cảm biến khác nhau.

Trong mảng cảm biến 1D và 2D, khoảng cách tối ưu giữa 2 cảm biến lân cận đã được xác định đều là $d_{\min_1} = d_{\min_2} = 200\ mm$, tương ứng với 4 lần chiều dài của cảm biến. Khi đó, số lượng cảm biến sẽ được lựa chọn trong khoảng từ 05 (khoảng cách 2 cảm biến lân cận là 750 mm) đến 16 (khoảng cách 2 cảm biến lân cận là 200 mm). Kết quả tính toán vùng diện tích dị từ sai lệch ΔS giữa đường ΔB_y so với $\Delta B_{y_chuẩn}$ của các mảng cảm biến khác nhau được thể hiện trong hình 6, 7.

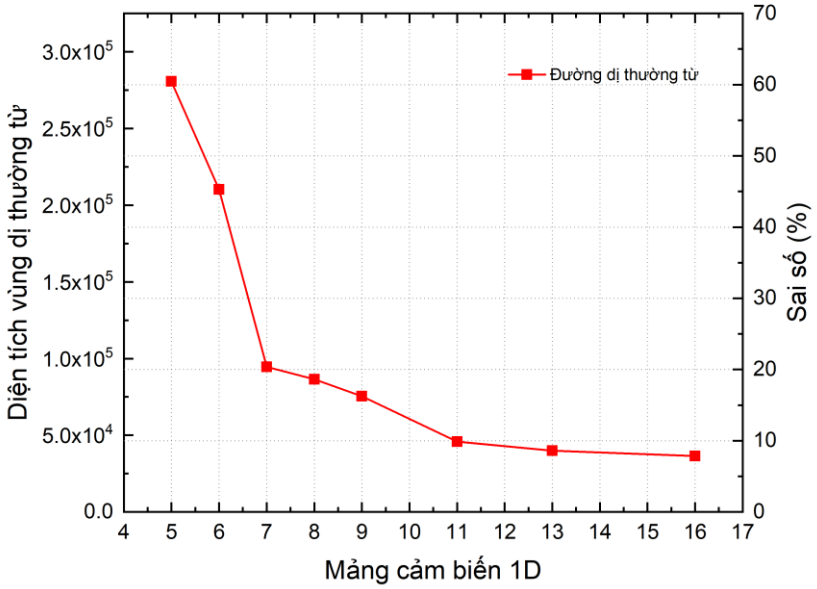


Hình 6. *Vùng diện tích dị từ sai lệch ΔS của mảng 5 và 6 cảm biến.*



Hình 7. *Vùng diện tích dị từ sai lệch ΔS của mảng 13 và 16 cảm biến.*

Kết quả tính sai số δ giữa vùng diện tích tạo bởi đường ΔB_y so với đường $\Delta B_{y_chuẩn}$ được thể hiện trong hình 8.



Hình 8. *Sai số của các vùng diện tích dị thường từ khác nhau.*

Với yêu cầu đặt ra ban đầu về sai số giữa các vùng diện tích $\delta \leq 20\%$, thì số lượng cảm biến tối ưu trong mảng cảm biến 1D được lựa chọn trong khoảng từ 7 đến 16 cảm biến, tương ứng với khoảng cách giữa 2 cảm biến lân cận nhau là 200 mm ≤ d ≤ 500 mm hay từ 4 lần tới 10 lần chiều dài cảm biến.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các kết quả nghiên cứu tính toán tối ưu khoảng cách phân bố mảng 1D và 2D của cảm biến từ dùng vật liệu Metglas trong đo lường dấu vết từ trường của tàu. Kết quả đã mô phỏng và xác định được khoảng cách tối ưu giữa 2 cảm biến lân cận nhau, đồng thời xác định được số lượng cảm biến tối ưu trong mảng cảm biến đủ để đo lường được dấu vết từ trường của tàu, đủ để khôi phục được đường đặc tuyến chuẩn của tàu cần đo với mức sai số đặt ra ban đầu. Các kết quả này là tiền đề quan trọng trong phát triển các nội dung nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm tiếp theo của bài toán phát hiện dị thường và khử từ trường cho các tàu quân sự.

Lời cảm ơn: *Công trình này được thực hiện với sự tài trợ của Đề tài KHCN của trường Đại học KH&CN Hà Nội, Mã số: USTH.YOUTH.AMSN.02/21*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. 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, 8-2020, pp 80-88.

[2]. J. J. Holmes, "*Modeling a ship's ferromagnetic signatures*", vol. 16 (2007).

[3]. J. J. Holmes, "*Exploitation of A Ship's Magnetic Field Signatures*", no. 1. Morgan & Claypool Publishers (2006)

[4]. G. J. C. Aird, "*Modelling the Induced Magnetic Signature of Naval Vessels*," Thesis for the degree of Doctor of Philosophy (2000).

[5]. Chadebec, Olivier & Coulomb, Jean-Louis & Leconte, Vincent & Bongiraud, J.P. & Cauffet, Gilles. (2000). *Modeling of Static Magnetic Anomaly Created by Iron Plates. Magnetics*, IEEE Transactions on. 36. 667 - 671. 10.1109/20.877537

[6]. http://www.magnetic-declination.com/Vietnam/Hanoi/2921957.html

ABSTRACT

STUDY ON OPTIMAL CALCULATION
OF MAGNETIC SENSOR NETWORK TO BE USED TO DETERMINE
FROM MAGNETIC SIGNATURES OF MILITARY SHIPS

In the military ship's magnetic anomaly detection devices, the magnetic field sensor is the most important component, which directly affects the detection ability and accuracy of the heteromagnetic measurement results. These sensors are usually of the high-sensitivity type, using cores of materials that respond very strongly to external magnetic fields. When placed close enough together, these sensors have the potential to interact with each other and cause measurement results to be erroneous. This paper presents the results of research on optimal calculation of 1D and 2D array distribution distances of a magnetic sensor, with the goal of minimizing the mutual influence of sensors placed close together, namely small than the sensitivity of the sensors themselves. The expected result is to determine the optimal distance corresponding to the optimal number of sensors, enough to assume that there is no influence on the magnetic field between neighboring sensors.

Keywords: Sensor Distribution, Magnetic Sensor Array, Magnetic Field Detection, Magnetic Signature, Magnetic Anomaly.

Nhận bài ngày 30 tháng 4 năm 2021
Hoàn thiện ngày 11 tháng 8 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: [1]Viện Điện tử, Viện KH-CN quân sự;
[2]Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam;
[3]Khoa Vật lý kỹ thuật & Công nghệ Nano, Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội;
[4]Phòng Thí nghiệm trọng điểm công nghệ Micro và Nano, Đại học Quốc gia Hà Nội;
[5]Viện Điện, Đại học Bách khoa Hà Nội.
[*]Email : tuan.phunganh1@hust.edu.vn.