Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học Tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
website: sj.ctu.edu.vn

DOI:10.22144/ctu.jvn.2021.084

MÔ HÌNH HÓA CÁC NGUỒN DỊ THƯỜNG TỪ DỰA TRÊN SỰ KẾT HỢP GIỮA PHÉP BIẾN ĐỔI WAVELET VÀ THUẬT TOÁN MARQUARDT

Dương Quốc Chánh Tín[1*], Dương Hiếu Đẩu[2], Phạm Ngọc Ngân[2], Nguyễn Thanh Hải[1] và Danh An[1]

[1]*Khoa Sư phạm, Trường Đại học Cần Thơ*

[2]*Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ*

**Người chịu trách nhiệm về bài viết: Dương Quốc Chánh Tín (email: dqctin@ctu.edu.vn)*

Thông tin chung:
Ngày nhận bài: 08/01/2021
Ngày nhận bài sửa: 17/02/2021
Ngày duyệt đăng: 25/06/2021

Title:
Modelization for magnetic anomaly sources based on combination between the wavelet transform and Marquardt algorithm

Từ khóa:
Kích thước ba chiều, mô hình hóa, phép biến đổi wavelet liên tục, thuật toán Marquardt, vector từ hóa dư

Keywords:
CWT, modeling, Marquardt algorithm, remanent magnetization vector, 3-D size

ABSTRACT

In exploration geophysics, solving the problem of inverse potential plays an important role, contributing to quantitative interpretation of the characteristic parameters of the field source causing the observed anomaly and this is often quite difficult. One of the difficulties is that its mathematical solution is not unique, because there is always more than one model to simulate the observed data with an error within the allowable range. In this paper, the continuous wavelet transform (CWT), using Farshad-Sailhac complex wavelet function and Marquardt algorithm are combined research and applied to modeling geomagnetic anomaly sources in the Mekong Delta, which allow determining the characteristic parameters of the source such as: the position on the map, the depth, shape, three-dimensional (3-D) size, remanent magnetization vector. Since then, there are appropriate explanations on the geological nature of the sources causing magnetic anomalies in the study area, contributing to improve the efficiency of geophysical methods in Viet Nam.

TÓM TẮT

Trong Địa Vật lý thăm dò, lời giải bài toán ngược trường thế giữ vai trò rất quan trọng, góp phần minh giải định lượng các thông số đặc trưng của nguồn trường gây ra dị thường khảo sát, tuy nhiên công việc này thường gặp nhiều khó khăn. Một trong những khó khăn cơ bản là nghiệm toán học không đơn nhất, vì luôn tồn tại một số mô hình phù hợp để mô phỏng số liệu quan sát với sai số nằm trong khoảng cho phép. Trong bài báo, phép biến đổi wavelet liên tục sử dụng hàm wavelet phức Farshad-Sailhac và thuật toán tối ưu của Marquardt được nghiên cứu kết hợp và ứng dụng để mô phỏng các nguồn dị thường từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long, cho phép xác định các thông số đặc trưng của nguồn gồm: vị trí trên bình đồ, độ sâu, hình dạng, kích thước ba chiều và vector từ hóa dư. Từ kết quả phân tích, những luận giải phù hợp về bản chất địa chất của các nguồn gây ra dị thường từ ở khu vực nghiên cứu được thiết lập, góp phần nâng cao hiệu quả ứng dụng kết hợp các phương pháp Địa Vật lý ở Việt Nam.

1. GIỚI THIỆU

Trong việc mô hình hóa các nguồn dị thường từ (Emerson et al., 1985), thuật toán tối ưu Marquardt (Marquardt, 1963) được sử dụng khá phổ biến, nhằm xác định các thông số đặc trưng của nguồn trường gây ra dị thường khảo sát gồm vị trí, độ sâu, hình dạng tương đối, kích thước và vector từ hóa dư. Tuy nhiên, ở bài toán đa trị (Blakely, 1995) nếu chỉ sử dụng thuật toán Marquardt sẽ gặp khó khăn trong việc lựa chọn nghiệm phù hợp. Thực tế, nhiều phương pháp đã được đề xuất để giải quyết tính đa trị (Hinze et al., 2012), trong đó có giải pháp khả thi là sử dụng biến đổi wavelet.

Phép biến đổi wavelet được ứng dụng trong Địa Vật lý lần đầu tiên vào những năm đầu thập niên 80 của thế kỷ thứ 20 khi phân tích các tín hiệu địa chấn (Kumar & Foufoula, 1997). Kể từ đó, những tiến bộ đáng kể trong toán học đã góp phần hoàn chỉnh lý thuyết wavelet mang lại nhiều ứng dụng đa dạng (Daubechies, 1992; Mallat, 1998). Trong việc minh giải dữ liệu trường địa từ, biến đổi wavelet được sử dụng để lọc nhiễu, tách trường địa phương ra khỏi trường khu vực, định vị các nguồn đồng nhất cùng các thuộc tính của chúng (Fedi & Quarta, 1998; Fedi et al., 2010).

Với dữ liệu từ vùng vĩ độ rất thấp ở Đồng bằng sông Cửu Long ($8{,}55^o \leq$ vĩ độ $\leq 11{,}07^o$), để chuyển dị thường từ về dạng đối xứng với vị trí của dị thường nằm trên nguồn, người ta thường sử dụng phép chuyển trường về cực (Blakely, 1995); ở đó, cả hai vector cường độ từ hóa và trường từ của Trái đất có phương thẳng đứng. Tuy nhiên, ở vùng vĩ độ thấp, phổ biên độ của toán tử biến đổi trường về cực bị khuếch đại ở tần số cao (độ dài sóng ngắn) tạo thành dạng một hình quạt hẹp, hình thành các dị thường giả kéo dài theo phương của từ thiên. Do đó, đã có nhiều phương pháp biến đổi trường ở vùng vĩ độ thấp được đưa ra để khắc phục khuyết điểm này, tuy nhiên hầu hết các phương pháp này không mang lại hiệu quả cao (Nguyễn Hồng Hải và ctv., 2017).

Trong bài báo này, phép biến đổi wavelet liên tục (Daubechies, 1992) được sử dụng kết hợp với thuật toán Marquardt (Marquardt, 1963) để giải bài toán ngược trường địa từ, xác định các thông số đặc trưng của nguồn gây ra dị thường gồm vị trí trên bình đồ, độ sâu, hình dạng, kích thước ba chiều và vector từ hóa dư.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thuật toán Marquardt

Mục đích cuối cùng của việc minh giải địa chất các tài liệu Địa Vật lý nói chung và với tài liệu từ nói riêng là cần phải tìm ra những tham số thực của nguồn gây ra dị thường quan sát. Lời giải của bài toán ngược như trên, có thể mô tả bằng trình tự cực tiểu hàm F sau:

$$F = \left(\sum \left[T_{qs}(x,y) - T_{lt}(x,y,a_j) \right]^2 \right)_{\min} \qquad (1)$$

Với x, y là tọa độ điểm quan sát, a_j là tham số của mô hình.

Trong biểu thức (1), điều kiện để hàm F có cực tiểu là:

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = -2\sum \frac{\left[T_{qs}(x,y) - T_{lt}(x,y,a_k) \right] \partial T_{lt}}{\partial a_k} = 0 \qquad (2)$$

Phương trình trên không phải là tuyến tính đối với T_{lt} nên việc cực tiểu hóa phiếm hàm F được thực hiện bằng quá trình tính lặp trên cơ sở thay đổi các tham số của mô hình, trong đó, giá trị tham số ở lần lặp sau $l+1$ được tính dựa vào giá trị lần lặp liền trước theo công thức:

$$a_{l+1,k} = a_{l,k} - D^{-1} grad\left[F(a_{lk}) \right] \qquad (3)$$

Ở đây a là các tham số; $a_{l+1,k}$ là tham số a_k tại lần tính lặp thứ $l+1$; D là ma trận đối xứng Hessian $(\mathrm{M} \times \mathrm{M})$ phần tử:

$$D_{kl} = \frac{\partial^2 F}{\partial a_k \partial a_l};\ k,l = 1,2,...,\mathrm{M} \qquad (4)$$

Để đảm bảo hàm F tiến về cực tiểu thì ma trận xác định D phải là ma trận dương (Marquardt, 1963). Đây cũng là nội dung quan trọng nhất của thuật toán Marquardt. Điều kiện ràng buộc này được thực hiện bằng cách đưa vào tham số $\gamma > 0$ đủ lớn sao cho:

$$\begin{cases} D'_{kk} = D_{kk}(1+\gamma) \text{ khi } l = k \\ D'_{kl} = D_{kl} \text{ khi } l \neq k \end{cases} \qquad (5)$$

Thông thường các phần tử của D_{kl} có giá trị nhỏ, sao cho việc đưa γ vào theo quy luật trên luôn làm cho ma trận D là xác định dương. Sau mỗi lần lặp các tham số của mô hình được thay đổi và T_{lt} được tính lại để so sánh với trường quan sát, nếu hàm F được tính sau mỗi lần lặp nhỏ hơn lần trước

($F_k < F_{k-1}$) thì tham số a_k mới lại được đưa vào vòng lặp tiếp sau. Quá trình tính tiếp tục cho đến khi hàm *F* đạt giá trị ngưỡng đủ nhỏ.

2.2. Phép biến đổi wavelet liên tục

Phép biến đổi wavelet liên tục một chiều (1-D CWT, One-dimensional continuous wavelet transform) là một ánh xạ chuyển tín hiệu một chiều theo không gian $f(x) \in L^2(R)$ thành tín hiệu hai chiều $W(a,b)$ ở dạng tích chập (Daubechies, 1992):

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\psi_{a,b}(x)dx = \left\langle f(x) \middle| \psi_{a,b}(x) \right\rangle \quad (6)$$

Trong đó, $\psi_{a,b}(x)$ là wavelet con của hàm wavelet mẹ $\psi(x)$ ở tỉ lệ *a* và dịch chuyển *b*, với:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (7)$$

$W(a,b)$: hệ số biến đổi wavelet liên tục của của tín hiệu $f(x)$; $a \in R^+$: tham số tỉ lệ (nghịch đảo của tần số) đặc trưng cho sự dãn ($a>1$) hoặc nén ($a<1$) của sóng wavelet; b: tham số dịch chuyển, cung cấp thông tin về vị trí của cửa sổ wavelet được tịnh tiến dọc theo trục x; $\frac{1}{\sqrt{a}}$: hệ số chuẩn hóa.

Phép biến đổi wavelet liên tục hai chiều (2-D CWT) được cho bởi biểu thức:

$$W(a,b_x,b_y) = \frac{1}{a}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\,\psi\left(\frac{x-b_x}{a},\frac{y-b_y}{a}\right)dxdy \quad (8)$$

Ở đây, $\psi\left(\frac{x-b_x}{a},\frac{y-b_y}{a}\right)$ là wavelet con của hàm wavelet mẹ hai chiều $\psi(x,y)$; b_x, b_y lần lượt là tham số dịch chuyển theo phương *x* và phương *y*; hệ số $\frac{1}{a}$ dùng để chuẩn hóa năng lượng của hàm sóng wavelet 2-D được suy ra từ trường hợp 1-D. Tín hiệu $f(x,y)$ cũng là hàm hai biến không gian *x* và *y*.

Nếu: $\psi(x,y) = \psi(x).\psi(y)$ thì biểu thức (8) có thể biến đổi thành:

$$W(a,b_x,b_y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{x-b_x}{a}\right)dx\right].\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{y-b_y}{a}\right)dy \quad (9)$$

Biểu thức (9) sẽ được thỏa mãn khi áp dụng biến đổi wavelet liên tục 1-D trên hai phương *x, y* riêng biệt (Yang et al., 2010).

2.3. Phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet

Trong xử lý ảnh, xác định biên là giai đoạn then chốt. Theo lý thuyết xử lý ảnh, biên của ảnh là những vùng mà tại đó cường độ sáng có sự thay đổi đột ngột hoặc màu sắc có sự tương phản mạnh. Với những tín hiệu biến đổi theo không gian tương tự dữ liệu trọng lực, hay dữ liệu địa từ, hoặc sóng địa chấn,… những điểm mà biên độ của tín hiệu thay đổi nhanh hoặc đột ngột được xem là biên của tín hiệu. Phương pháp xác định biên sử dụng biến đổi wavelet (Mallat & Hwang, 1992) dựa trên việc tìm vị trí trên tỉ lệ đồ mà tại đó hệ số biến đổi wavelet đạt cực đại. Kỹ thuật này được gọi tên là phương pháp xác định cực đại độ lớn biến đổi wavelet (WTMM) đã sử dụng phổ biến trong việc xác định vị trí, độ sâu và kích thước của các nguồn dị thường.

2.4. Hàm wavelet phức Farshad-Sailhac

Hàm wavelet phức Farshad-Sailhac được xây dựng (Tin & Dau, 2016) dựa trên nhân Farshad (Farshard *el al.*, 2010):

$$\theta(x,z) = \frac{1}{\left(x^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\left(x^2+(z+1)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

Phần thực của hàm wavelet là đạo hàm cấp hai theo phương ngang của nhân Farshad và được tính bởi biểu thức:

$$\psi^2(x) = \left.\frac{\partial^2\theta(x,z)}{\partial x^2}\right|_{z=1} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[\frac{1}{(x^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(x^2+(z+1)^2)^{\frac{1}{2}}}\right]_{z=1}$$

$$= \frac{4-2x^2}{(x^2+2^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1-2x^2}{(x^2+1^2)^{\frac{5}{2}}} = \psi^{(F)}(x) \quad (11)$$

và phần ảo là biến đổi Hilbert của phần thực (Sailhac *et al.*, 2000) trong wavelet (11):

$$\psi^{(S)}(x) = Hilbert(\psi^{(F)}(x)) \quad (12)$$

Nên, dạng cụ thể của wavelet phức Farshad-Sailhac được cho bởi biểu thức sau:

$$\psi^{(FS)}(x) = \frac{4-2x^2}{(x^2+2^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1-2x^2}{(x^2+1^2)^{\frac{5}{2}}} + i.\left(\frac{5}{2}x - \frac{4}{5}x^3\right)\left[\frac{1}{(x^2+4)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1}{(x^2+1)^{\frac{5}{2}}}\right] \quad (13)$$

Wavelet phức Farshad-Sailhac được sử dụng trong phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet nhằm xác định vị trí, chỉ số cấu trúc, độ sâu và kích thước theo phương ngang của nguồn dị thường từ.

2.5. Quy trình mô hình hóa các nguồn dị thường từ dựa trên sự kết hợp giữa phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt

Việc mô hình hóa các nguồn dị thường từ dựa trên sự kết hợp giữa phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt có thể tóm lược trong quy trình gồm các bước sau:

Bước 1: Xác định tọa độ tâm nguồn dị thường theo kinh độ và vĩ độ.

B1.1. Vẽ bản đồ dị thường từ toàn phần. Xác định thế nằm cơ bản của các vật thể gây ra dị thường từ dựa trên hình ảnh phân bố các đường đẳng trị trên bản đồ.

B1.2. Thực hiện biến đổi wavelet Farshard-Sailhac 2-D trên dữ liệu dị thường từ

B1.3. Vẽ bản đồ trường hệ số biến đổi wavelet 2-D ở các tỉ lệ khác nhau theo kinh độ và vĩ độ.

B1.4. Xác định tọa độ tâm nguồn từ các điểm cực đại địa phương của các hệ số biến đổi wavelet trên các bản đồ.

Dựa vào sự dịch chuyển tọa độ tâm nguồn dị thường được xác định ở các tỉ lệ khác nhau trong bước B1.4, hướng cắm tương đối của nguồn so với phương thẳng đứng có thể được ước lượng.

Bước 2: Phân tích chi tiết các nguồn vừa định vị ở bước 1, nhằm xác định chỉ số cấu trúc, hình dạng tương đối, kích thước và độ sâu của chúng.

B2.1. Trích xuất dữ liệu dị thường dọc theo các tuyến khác nhau đi qua tâm nguồn để thực hiện biến đổi wavelet Farshad-Sailhac 1-D.

B2.2. Thay đổi tham số tỉ lệ a và thực hiện lặp lại phép biến đổi wavelet Farshard-Sailhac đa phân giải.

Các hệ số wavelet tạo thành sau biến đổi wavelet phức với cùng một tham số tỉ lệ a sẽ gồm 4 thành phần là: thành phần thực, thành phần ảo, thành phần độ lớn và thành phần pha. Dữ liệu của thành phần độ lớn và thành phần pha sẽ được tiếp tục xử lý ở các bước sau.

B2.3. Vẽ các họ đường đẳng trị và đẳng pha của hệ số biến đổi wavelet Farshard-Sailhac trong mặt phẳng tỉ lệ đồ (a, b).

B2.4. Ước lượng kích thước của nguồn dị thường theo các tuyến được chọn.

Trên đồ thị đẳng pha, xác định các điểm cực đại của hệ số wavelet thành phần pha ở hai biên trái và phải tương ứng là: $bx(t)$ và $bx(\mathrm{p})$ (nếu phân tích dữ liệu theo phương x) hoặc $by(t)$ và $by(\mathrm{p})$ (nếu phân tích dữ liệu theo phương y). Khi đó, kích thước ước lượng của nguồn theo hai phương x, y được xác định bởi biểu thức sau:

$$D_x \approx \left[bx(p) - bx(t)\right] \times \Delta \quad (14a)$$

$$D_y \approx \left[by(p) - by(t)\right] \times \Delta \quad (14b)$$

B2.5. Tính chỉ số cấu trúc và ước lượng hình dạng tương đối của các nguồn.

Với mỗi nguồn, vẽ đường biểu diễn $\log(W / a^2)$ theo $\log(a+z)$, với W là hệ số biến đổi wavelet tính tại các điểm lân cận tọa độ nguồn dị thường; từ đó xác định hệ số góc β (cũng chính là bậc đồng nhất của nguồn trường) của đường thẳng có phương trình $\log\left(W / a^2\right) = \beta \log(a+z) + c$, sau đó ước tính chỉ số cấu trúc (Sailhac *et al.*, 2000) theo phương trình: $N = -\beta - 3$ (15), từ đó ước lượng hình dạng tương đối của nguồn (Bảng 1).

Bảng 1. Chỉ số cấu trúc *N* của nguồn dị thường từ và hình dạng tương ứng (Thompson, 1982)

Chỉ số cấu trúc *N*	Hình dạng
3	Hình cầu hoặc khối hộp vuông
2	Hình trụ tròn hoặc lăng trụ dài
1	Vỉa mỏng

B2.6. Xác định độ sâu của các nguồn trường.

Với từng nguồn, chỉ số cấu trúc đã được xác định từ bước 2.5, tính thêm hệ số k (Tín, 2019).

$$k \approx -0,1078.N^2 + 0,7782.N - 0,4711 \quad (16)$$

Từ đồ thị đẳng trị xác định điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet a_m. Khi đó độ sâu của mỗi nguồn dị thường sẽ được ước lượng từ hệ thức:

$$z = k.(a_m.\Delta) \quad (17)$$

Bước 3: Sử dụng thuật toán Marquardt, giải bài toán ngược để xác định thêm các đặc trưng khác của nguồn gồm: kích thước theo phương thẳng đứng và vector từ hóa dư. Giải thuật Marquardt được thực thi chi tiết bằng phần mềm Potent v4.16.07, cung cấp bởi công ty Giải pháp phần mềm Địa Vật lý của Úc (Geophysical Software Solutions Pty. Ltd, Australia).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình lý thuyết

Để kiểm chứng độ tin cậy của phương pháp được đề xuất, nhiều mô hình lý thuyết khác nhau đã được thử nghiệm gồm: các nguồn dị thường đơn có hình dạng khác nhau như: khối cầu, khối lăng trụ chữ nhật, vỉa mỏng; nguồn dị thường từ gồm các vật thể có hình dạng khác nhau phân bố không quá gần nhau. Ngoài ra, để tăng tính thực tiễn, nhiễu ngẫu nhiên cũng được cộng vào dữ liệu mô hình. Sai số bình phương trung bình thu được từ kết quả phân tích các mô hình lý thuyết là đủ nhỏ để chứng tỏ phương pháp phân tích là đáng tin cậy. Trong bài viết này, kết quả xử lý trên hai mô hình lý thuyết điển hình sẽ được giới thiệu.

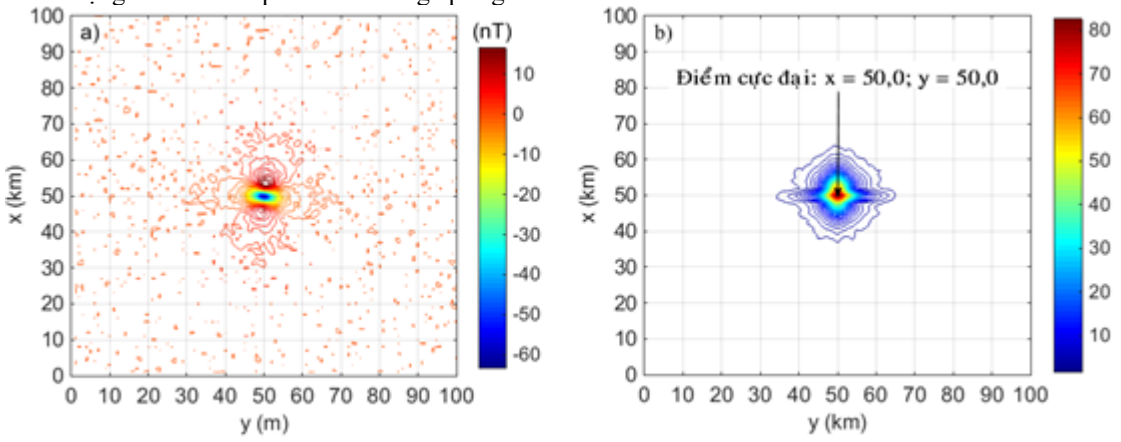
3.1.1. Mô hình 1: Nguồn dị thường từ đơn

Trong mô hình này, nguồn trường là một khối cầu đồng nhất được biểu diễn trong hệ tọa độ ba chiều *x, y, z* (km). Trong đó: trục Ox hướng theo cực Bắc địa lý, trục Oy hướng Đông, trục Oz hướng thẳng đứng xuống dưới.

Mạng lưới quan sát: x = 0:2:100; y = 0:2:100; z = 0.

Khối cầu có đường kính D = 2,8 km; tọa độ tâm (x_0 = 50,0; y_0 = 50,0; z_0 = 3,0).

Giả sử vector từ hóa của khối cầu và của trường địa từ có cùng hướng với độ từ khuynh I = 4°; góc phương vị λ = 15°; cường độ từ hóa J = 2,6 A/m.



Hình 1. a) Dị thường từ do khối cầu đồng nhất gây ra trên mặt phẳng quan sát;

b) Đẳng trị hệ số biến đổi wavelet 2-D trên dữ liệu dị thường từ ở tỉ lệ a = 3

Nhiễu được tạo bởi hàm random trong Matlab nhân trọng số 3,0% độ lớn cực trị của dị thường phân tích (cực đại của nhiễu tương đương 1,8 nT).

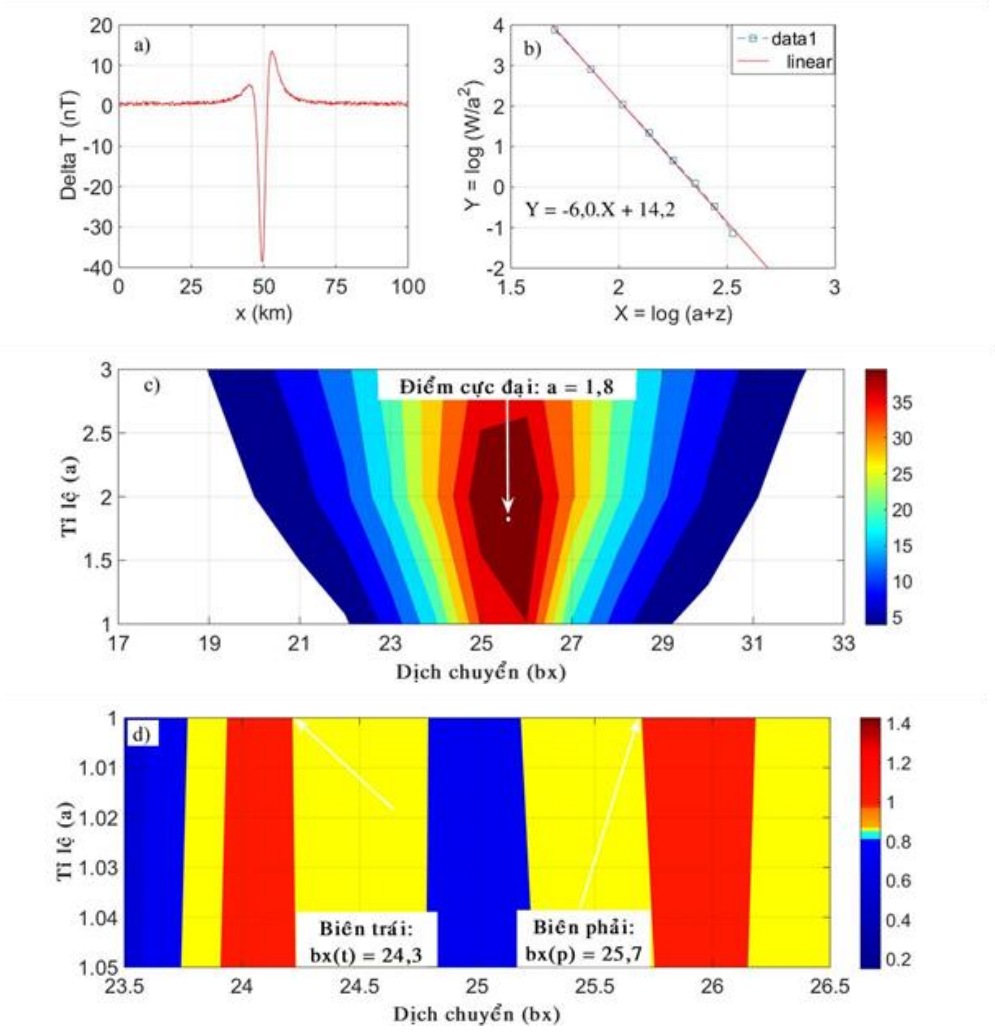
Hình 1a mô tả dị thường từ của khối cầu đồng nhất gây ra trên mặt phẳng quan sát. Sự phân bố các đường đẳng trị của dị thường, thể hiện tính lưỡng cực, gồm một dị thường âm nằm giữa hai dị thường dương; các dị thường có dạng elip dẹt và nằm lệch với hai trục *x, y* so với tâm nguồn.

Áp dụng biến đổi wavelet 2-D (công thức 9) trên dữ liệu dị thường từ (sử dụng hàm wavelet Farshad - Sailhac - công thức 13). Kết quả vẽ đẳng trị hệ số biến đổi wavelet 2-D ở tỉ lệ $a = 3$ trong hình 1b cho thấy tồn tại duy nhất một điểm cực đại của hệ số biến đổi wavelet – tương ứng với vị trí của tâm nguồn: (x_0 = 50,0; y_0 = 50,0) (km). Như vậy, việc xác định vị trí tâm nguồn trên mặt phẳng quan sát trong điều kiện dị vật bị từ hóa nghiêng, đặc biệt với góc từ khuynh nhỏ chính là xác định vị trí cực đại của hệ số biến đổi wavelet 2-D sử dụng hàm wavelet Farshad - Sailhac trên dữ liệu dị thường từ.

Để xác định chỉ số cấu trúc, ước lượng độ sâu và kích thước của nguồn, dị thường từ dọc theo các

tuyến *y* (phương Bắc – Nam), *x* (phương Đông – Tây) đi qua tâm nguồn sẽ được chọn để phân tích, trong đó dị thường dọc theo tuyến *y* sẽ dùng để tính chỉ số cấu trúc, ước lượng độ sâu và kích thước theo phương kinh tuyến – kích thước dọc và dị thường dọc theo tuyến *x* chỉ dùng để ước lượng kích thước theo phương vĩ tuyến – kích thước ngang. Tuy nhiên, dị vật gây từ được thiết kế trong mô hình dạng đẳng thước trên mặt phẳng quan sát (Oxy), nên chỉ phân tích dị thường dọc theo tuyến *y*.

Hình 2a thể hiện dị thường từ dọc theo tuyến *y = 50,0* km đi qua tâm nguồn dị thường. Dị thường có phần dương - âm - dương, trong đó cực trị âm ở gần km thứ 50 của tuyến (gần tâm nguồn).



Hình 2. Các đồ thị thể hiện kết quả xử lý tuyến y = 50,0 km

a) Dị thường từ dọc theo tuyến; b) Tương quan giữa log(W/a²) và log(z+a); c), d) Đẳng trị và đẳng pha của hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường của tuyến

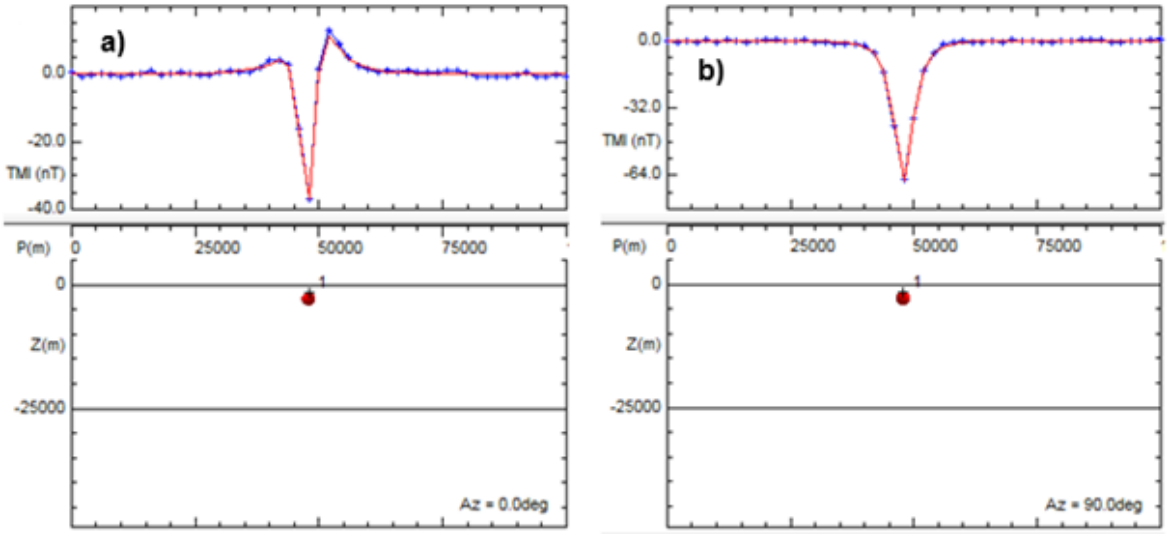
Hình 2b là đường biểu diễn của *log(W/a²)* theo *log(a+z)*. Dựa vào phương trình đường thẳng *Y* = -6,0*X* + 14,2 ta ước lượng được bậc đồng nhất của nguồn là β = -6,0; từ đó tìm được chỉ số cấu trúc: *N* = 3,0 (công thức 15); suy ra: *k* = 0,8933 (công thức 16). Hình 2c cho phép xác định vị trí điểm cực đại, hệ số biến đổi wavelet: *a* = 1,8 = a_m; do đó độ sâu đến tâm nguồn tính được là: *z* = 3,2 km (công thức 17).

Ngoài ra, giá trị biên trái và biên phải được xác định dễ dàng trên hình 2d cho phép ước lượng kích thước của nguồn theo công thức (14a): D_x = 2,8 km = D.

Vì nguồn gây ra dị thường trong mô hình có dạng đẳng thước trên mặt phẳng quan sát nên $D_y = D_x$.

Tiếp theo sử dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương *z*, cũng như vector từ hóa của nguồn (các thông số về hình dạng, kích thước theo hai phương *x*, *y* được sử dụng từ các kết quả xác định bằng phép biến đổi wavelet).

Kết quả tính toán sau 50 vòng lặp được trình bày ở Hình 3 và Bảng 2.



Hình 3. Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (đường liền nét màu đỏ) và dị thường quan sát (nét đứt màu xanh)

a) Tuyến y = 50,0 km; b) Tuyến x = 50,0 km

Bảng 2. Tổng hợp kết quả phân tích các thông số của mô hình 1

Chỉ số cấu trúc N	Hình dạng	Kích thước (km)			Độ sâu đến mặt trên (km)	Vector từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
		D_x	D_y	D_z		*J (A/m)*	*λ (º)*	*I (º)*	
3,0	Cầu	2,8	2,8	2,8	1,6	2,6	10	5,7	0,722

Để mô hình lý thuyết được gần với thực tế hơn, nghiên cứu tiếp tục thực hiện phân tích trên các mô hình được xây dựng với nhiều nguồn dị vật đa dạng và được bố trí theo các phương khác nhau.

3.1.2. Mô hình 2: Nguồn dị thường từ gồm các vật thể có hình dạng khác nhau phân bố không quá gần nhau

Trong mô hình này, nguồn trường gồm ba khối vật chất đồng nhất khác nhau được biểu diễn trong hệ tọa độ ba chiều *x*, *y*, *z* (km) với các thông số được cho bởi Bảng 3.

Vector từ hóa của các vật thể có cùng góc từ khuynh $I = 4^o$, nhưng góc phương vị λ khác nhau.

Mạng lưới quan sát: *x* = 0:2:100; *y* = 0:2:100; *z* = 0.

Nhiễu được tạo bởi hàm random trong Matlab nhân trọng số 3,0% độ lớn cực trị của dị thường phân tích (cực đại của nhiễu tương đương 12,0 nT).

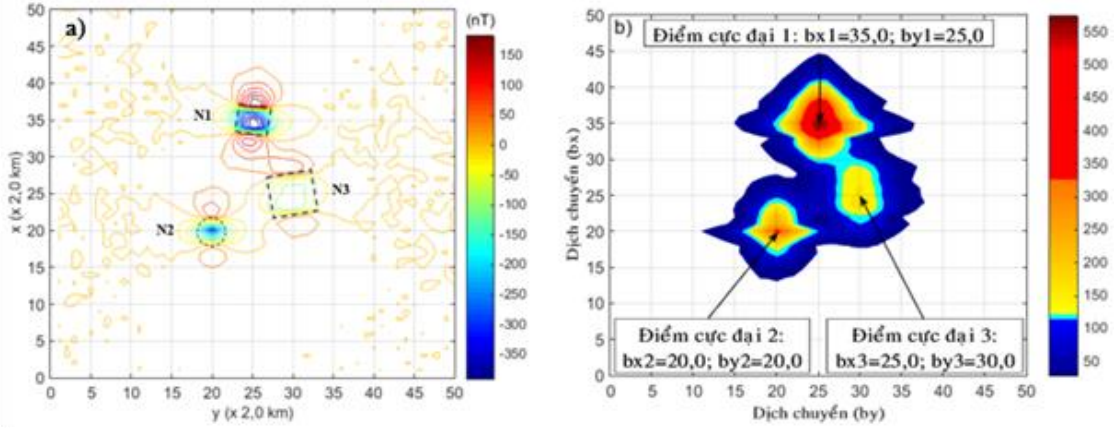
Bảng 3. Các thông số của mô hình 2

Số hiệu	Thông số / Vật thể	Tọa độ (km)			Góc phương vị (º)
		x	*y*	*z*	
N1	Lăng trụ	67-73	47-53	1,0-5,0	15
N2	Khối cầu	37-43	37-43	1,5-7,5	0
N3	Vỉa ngang	45-55	55-65	2,0-3,0	-15

Hình 4a thể hiện dị thường từ toàn phần tính được từ mô hình 2. Dị thường này vẫn thể hiện tính lưỡng cực khá rõ ràng. Sự phân bố các đường đẳng trị, cho phép xác định thế nằm của các vật thể, tương ứng với các góc phương vị trong bảng 3. Tuy nhiên,

rất khó xác định chính xác được tâm cũng như hình dạng và kích thước của các nguồn.

Biến đổi wavelet 2-D tiếp tục áp dụng trên tín hiệu dị thường từ toàn phần của mô hình 2. Kết quả vẽ đẳng trị hệ số biến đổi wavelet ở tỉ lệ a = 3 được biểu diễn trong Hình 4b cho thấy tồn tại ba điểm hội tụ, cho phép xác định tâm của ba nguồn dị vật trong mô hình.



Hình 4. a) Dị thường từ của mô hình 2 có trộn nhiễu;

b) Đẳng trị hệ số biến đổi wavelet 2-D trên dữ liệu dị thường từ ở tỉ lệ a = 3

Để xác định chỉ số cấu trúc, ước lượng hình dạng, độ sâu và kích thước của nguồn, dị thường từ dọc theo các tuyến *y* (phương Bắc – Nam), *x* (phương Đông – Tây) đi qua tâm mỗi nguồn sẽ được chọn để phân tích, trong đó dị thường dọc theo tuyến *y* sẽ dùng để tính chỉ số cấu trúc, ước lượng độ sâu và kích thước theo phương kinh tuyến – kích thước dọc và dị thường dọc theo tuyến *x* chỉ dùng để ước lượng kích thước theo phương vĩ tuyến – kích thước ngang. Tuy nhiên, các dị vật được thiết kế trong mô hình đều có dạng đẳng thước trên mặt phẳng quan sát (Oxy), nên chỉ phân tích dị thường dọc theo tuyến *y*.

Để phân tích nguồn N3, dữ liệu dọc theo tuyến *y3* = 60,0 km đi qua tâm nguồn được chọn để thực hiện phép biến đổi wavelet 1-D.

Hình 5a thể hiện dị thường từ dọc theo tuyến *y3* = 60,0 km đi qua tâm nguồn dị thường N3. Dị thường có phần dương - âm – dương, trong đó cực trị âm ở gần km thứ 50 của tuyến (gần tâm nguồn).

Hình 5b là đường biểu diễn của $log(W/a^2)$ theo $log(a+z)$. Dựa vào phương trình đường thẳng $Y = -4,2.X + 9,3$ ta ước lượng được bậc đồng nhất của nguồn là $\beta = -4,2$; từ đó tìm được chỉ số cấu trúc: $N = 1,2$ (công thức 15); suy ra: $k = 0,3075$ (công thức 16).

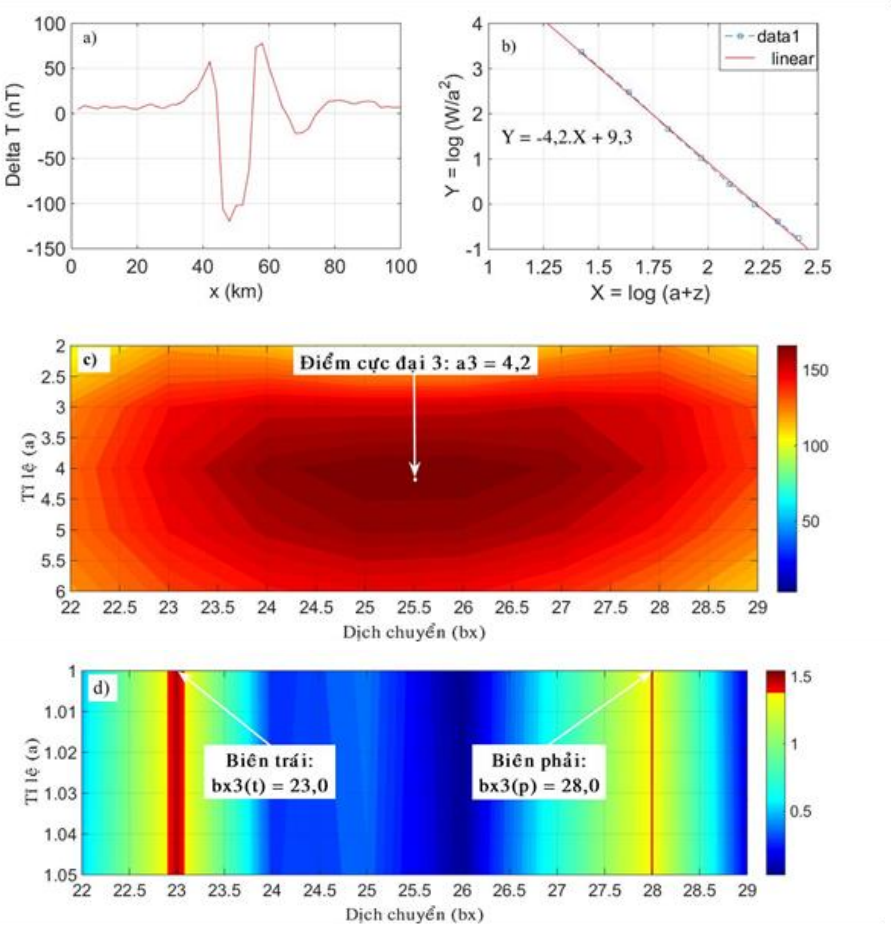
Hình 5c sẽ xác định được vị trí điểm cực đại, hệ số biến đổi wavelet: $a3 = 4,2 = a2_m$; do đó độ sâu đến tâm nguồn tính được là: $z = 2,6$ km (công thức 17).

Ngoài ra, giá trị biên trái và biên phải được xác định dễ dàng trên hình 5d cho phép ước lượng kích thước của nguồn theo công thức (14a): $D_x = 10,0$ km.

Tương tự, dữ liệu dọc theo tuyến *y1* = 50,0 km; *y2* = 40,0 km lần lượt đi qua tâm nguồn N1; N2 được chọn để phân tích các thông số của nguồn N1; N2.

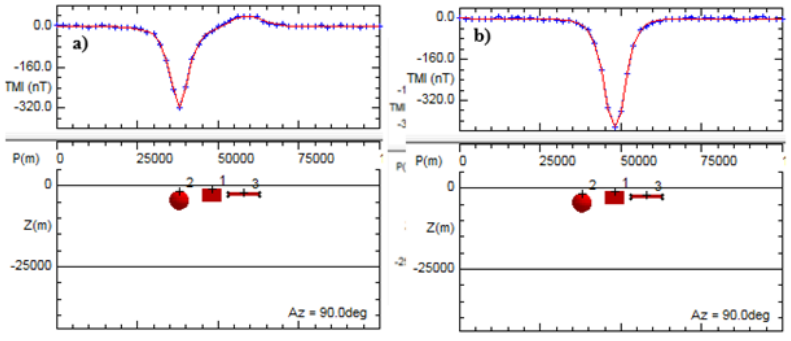
Thực hiện các phép tính tương tự như khi phân tích các thông số của nguồn N3 để phân tích nguồn N1 và N2 ta được các thông số về hình dạng, kích thước theo hai phương ngang, dọc và độ sâu đến tâm nguồn. Các thông số này được sử dụng khi áp dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương *z*, cũng như vector từ hóa của nguồn. Việc này giúp hạn chế đáng kể tính đa trị khi giải bài toán ngược, cũng như rút ngắn thời gian tính toán.

Sau 50 vòng lặp, kết quả tính toán được trình bày ở Hình 6 và Bảng 4.



Hình 5. Các đồ thị thể hiện kết quả xử lý tuyến y3 =60,0 km

Dị thường từ dọc theo tuyến; b) Tương quan giữa log(W/a2) và log(z+a); c), d) Đẳng trị và đẳng pha hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường của tuyến



Hình 6. Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (đường liền nét màu đỏ) và dị thường quan sát (nét đứt màu xanh)

a) Tuyến x = 70,0 km; b) Tuyến x = 40,0 km

Bảng 4. Tổng hợp kết quả phân tích các thông số của mô hình 2

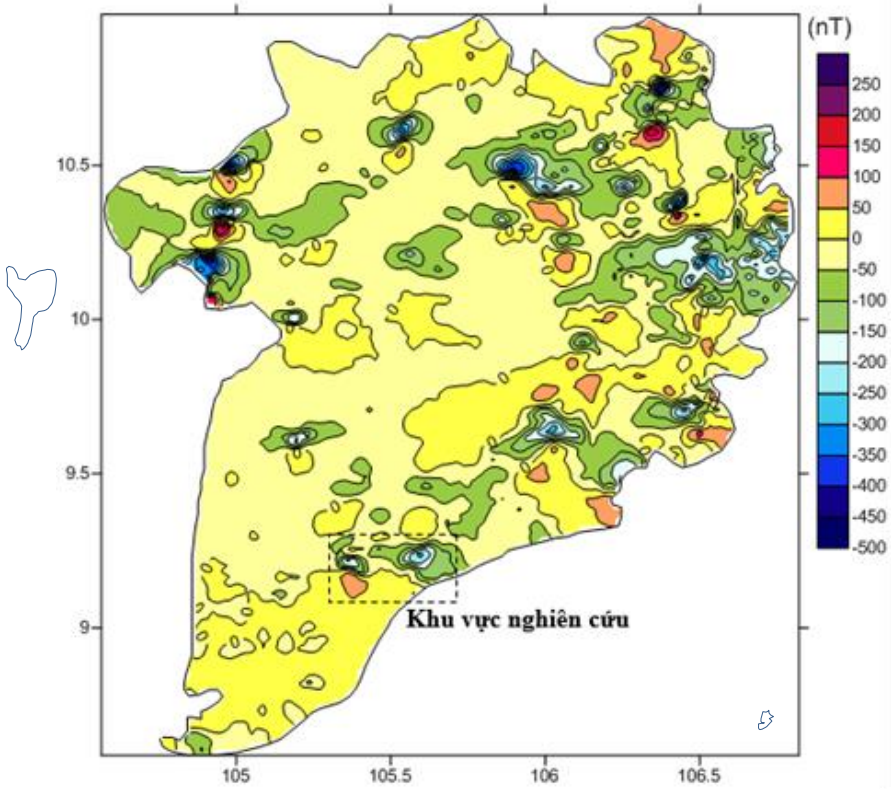
Thông số / Số hiệu	Chỉ số cấu trúc N	Hình dạng	Kích thước (km)			Độ sâu đến mặt trên (km)	Vector từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
			D_x	D_y	D_z		J (A/m)	Λ (°)	I (°)	
N1	1,7	Lăng trụ	6,0	6,0	4,1	1,0	2,3	13,8	3,8	
N2	3,0	Cầu	5,8	5,8	6,0	1,5	2,3	-0,1	4,1	1,875
N3	1,2	Vỉa	10,0	10,0	1,0	2,0	2,3	-17,6	3,9	

Các kết quả tính toán chỉ ra trong bảng 4 khẳng định độ tin cậy cao của phương pháp (sai số bình phương trung bình giữa dị thường tính và dị thường quan sát là rất thấp chỉ gần với giá trị là 1,875 nT).

Công việc tiếp theo là sử dụng kết hợp phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt vào việc minh giải dữ liệu từ ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long nhằm khẳng định khả năng ứng dụng thực tiễn của phương pháp được đề xuất.

3.2. Phân tích dữ liệu từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long

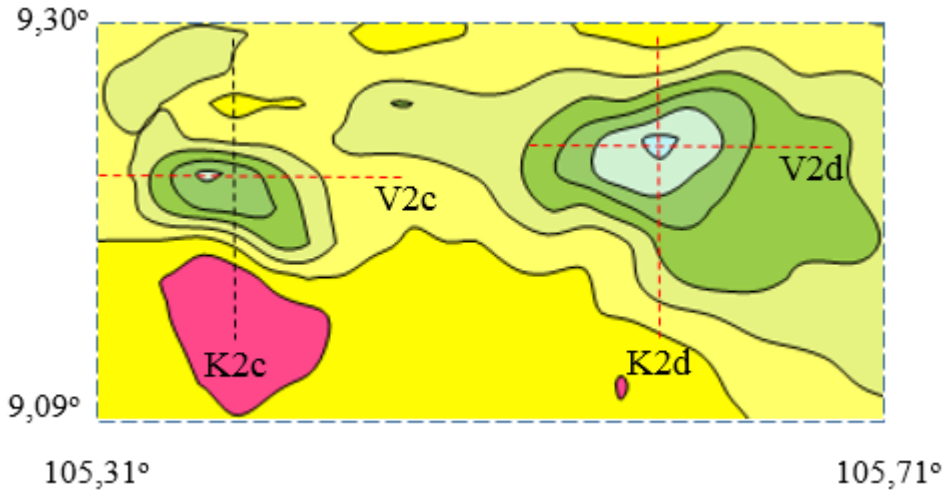
Sử dụng bản đồ dị thường từ toàn phần vùng Đồng bằng sông Cửu Long với tỉ lệ 1/200.000 của Tổng cục Địa chất và khoáng sản Việt Nam, được đo và hoàn thành năm 1992 (Hình 7). Thiết bị đo là từ kế proton nằm trên máy bay, độ cao trung bình đến mặt đất là 300 m (Nguyễn Xuân Sơn, 1996).



Hình 7. Bản đồ dị thường từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long (Nguyễn Xuân Sơn, 1996)

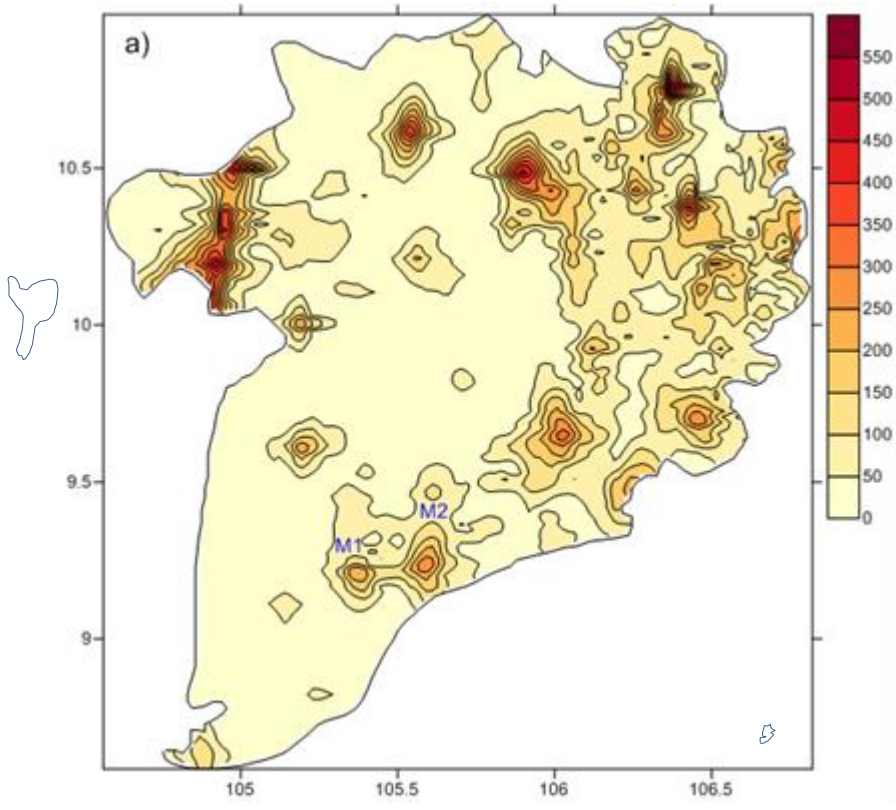
(các đường đẳng trị cách nhau 50 nT)

Khu vực được chọn phân tích chi tiết (ô chữ nhật màu đen trên hình 7) có tọa độ trong khoảng 9,09° - 9,30° vĩ Bắc và 105,31° - 105,71° kinh Đông thuộc địa phận tỉnh Bạc Liêu (Hình 8). Như vậy dữ liệu phân tích chính là dị thường từ được trích suất từ bản đồ tỉ lệ 1/200.000 nên khoảng cách giữa các điểm đo là Δ = 2,0 km. Trong khu vực tồn tại 2 dị thường đơn, mỗi dị thường có 3 đới dương - âm - dương sắp xếp theo phương kinh tuyến (giá trị đới âm rất lớn so với đới dương).



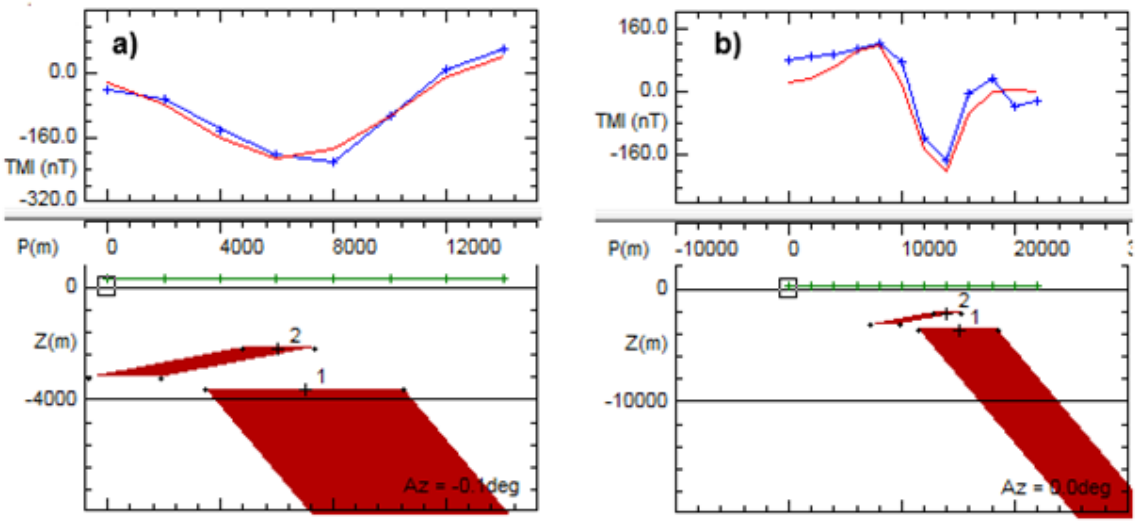
Hình 8. Dị thường từ ở Bạc Liêu (Nguyễn Xuân Sơn, 1996)

Áp dụng phép biến đổi wavelet Farshad-Sailhac 2-D trên dữ liệu dị thường từ ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long với các tỉ lệ khác nhau. Hình 9 là bản đồ trường hệ số biến đổi wavelet 2-D vùng Đồng bằng sông Cửu Long ở tỉ lệ a = 3. Bản đồ cho thấy sự hội tụ các đường đẳng trị về tâm nguồn.



Hình 9. Bản đồ hệ số biến đổi wavelet dị thường từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long ở tỉ lệ a = 3

Để ước lượng hình dạng, độ sâu và kích thước của vật thể gây ra dị thường từ M1, một tuyến dữ liệu (K2c) dọc theo kinh tuyến 105,38° và tuyến (V2c) dọc theo vĩ tuyến 9,22° (đi qua tâm nguồn M1) được trích xuất từ bản đồ dị thường từ vùng Đồng bằng sông Cửu Long.



Hình 10. Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (màu đỏ) và dị thường quan sát (màu xanh)

a) Tuyến K2c; b) Tuyến K2d

Tương tự với nguồn dị thường M2 dữ liệu theo tuyến (K2d) và (V2d) được chọn để phân tích định lượng bằng phép biến đổi wavelet Farshad-Sailhac 1-D.

Các thông số xác định từ phép biến đổi wavelet được sử dụng khi áp dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương *z*, cũng như vector từ hóa dư của nguồn.

Sau 50 vòng lặp, kết quả tính toán được trình bày ở Hình 10 và Bảng 5.

Bảng 5. Tổng hợp kết quả phân tích các thông số nguồn dị thường M1, M2

Thông số Số hiệu	Chỉ số cấu trúc N	Hình dạng	Kích thước (km)			Độ sâu đến mặt trên (km)	Vector từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
			D_x	D_y	D_z		J (A/m)	λ (^{o})	I (^{o})	
M1	1,2	Vỉa mỏng	7,0	19,8	0,1	1,2	1,8	10,2	-2,9	6,288
M2	1,1	Vỉa mỏng	8,4	7,0	0,1	1,9	3,2	3,5	6,5	

Từ các kết quả nghiên cứu, đối chiếu với các tài liệu địa chất (Nguyễn Xuân Sơn, 1996; Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2009) và tài liệu lỗ khoan trong vùng (Liet et al., 2008), cho thấy bản chất địa chất của các nguồn gây ra các dị thường từ M1 và M2 là trầm tích Kainozoi được xếp vào các phân vị địa tầng sau đây: hệ tầng Cù Lao Dung (ρ_{-cd}), hệ tầng Trà Cú (ρ_{-tc}), hệ tầng Phụng Hiệp (N_1ph), hệ tầng Cần Thơ (N_2ct) và lớp phủ Đệ Tứ. Trầm tích Kainozoi được đặc trưng bằng trầm tích đầm hồ, châu thổ, vũng vịnh và các lớp phun trào bazan.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo, để giảm thiểu tính đa trị và thời gian tính toán khi giải bài toán ngược trường địa từ vùng vĩ độ thấp, phép biến đổi wavelet liên tục 2-D và 1-D sử dụng hàm wavelet phức Farshad-Sailhac đã được áp dụng trước để xác định các thông số cơ bản của nguồn gồm: vị trí trên bình đồ, chỉ số cấu trúc, hình dạng, kích thước ngang theo hai phương vuông góc và độ sâu. Các thông số này tiếp tục được sử dụng khi giải bài toán ngược bằng thuật toán Marquardt nhằm xác định thêm các thông số đặc trưng khác của nguồn như: kích thước theo phương thẳng đứng, vector từ hóa dư. Sau khi kiểm chứng độ tin cậy qua các mô hình lý thuyết, phương pháp đề xuất đã áp dụng thành công để minh giải dữ liệu đo từ hàng không ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả minh giải có mức độ chi tiết khá phong phú, với sai số bình phương trung bình thấp và phù hợp với thông tin lỗ khoan sâu và các tài liệu địa chất của vùng.

LỜI CẢM TẠ

Nhóm tác giả cảm ơn Công ty Giải pháp phần mềm Địa Vật lý của Úc (Geophysical Software Solutions Pty. Ltd, Australia) đã hỗ trợ một licence

để vận hành phần mềm Potent v4.16.07, góp phần nâng cao hiệu quả nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Blakely, R. J. (1995). *Potential theory in Gravity and Magnetic application.* Cambridge University Press, 441 pages.

Bộ Tài nguyên và Môi trường, Cục địa chất và khoáng sản Việt Nam (2009). *Địa chất và tài nguyên Việt Nam*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ.

Daubechies, I. (1992). *Ten lectures of wavelets*. Springer – Verlag Press.

Emerson, D. W., Clark, D. A., & Saul, S. J. (1985). Magnetic exploration models incorporating remanence, demagnetization and anisotropy: HP 41C handheld computer algorithms. *Exploration Geophysics*, *16*(1), 1-122.

Farshard, S., Amin R.K. & SiahKoohi H.R. (2010). Interpretation 2-D Gravity Data using 2-D Continuous Wavelet Transform Introduction. *72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC.* Barcelona. Spain, 304-9.

Fedi, M. & Quarta, T. (1998). Wavelet analysis for the regional – residual separation of potential field anomalies. *Geophysical Prospecting*, *46*(5), 507-525.

Fedi, M., Cella, F., Quarta, T., & Villani, A. V. (2010). 2D continuous wavelet transform of potential fields due to extended source distributions. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, *28*(3), 320-337.

Nguyễn Hồng Hải, Huỳnh Thanh Nhân, Đặng Văn Liệt và Nguyễn Ngọc Thu. (2017). Nâng cao chất lượng minh giải tài liệu từ ở vùng vĩ độ thấp. *Tạp chí phát triển Khoa học Công nghệ, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 20*(T4-2017), 105-114.

Hinze, W. J., Frese, R.R.B.V., & Saad, A.H. (2012). *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press.

Kumar, P. & Foufoula, G.E. (1997). Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics, 35*(4), 385-412.

Liet, D. V., Quyet, P. Q., & Phuoc, N. H. (2008). The model of the tertiary basement rock beneath the interior of Mekong Delta Using gravity data. *Final Report, Salamander Energy Vietnam. Ho Chi Minh City*, 45 pages.

Mallat, S. & Hwang, W.L. (1992). Singularity Detection and Processing with Wavelets. *IEEE Transactions on information Theory, 38*(2), 617-643.

Mallat, S. (1998). *A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic*, San Diego Press, 824 pages.

Marquardt, D.W. (1963). An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, U.S.A, 11*(2), 431-441.

Sailhac, P., Galdeano, A., Gibert, D., Moreau, F., & Delor, C. (2000). Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Complex wavelets and applications to magnetic profiles in French Guiana. *Journal of Geophysical Research, 105*(B8), 19455-19475.

Nguyễn Xuân Sơn. (1996). *Giải đoán cấu trúc địa chất Miền Nam Việt Nam theo tài liệu từ hàng không tỉ lệ 1:200.000* (Luận án Phó tiến sĩ Địa lý – Địa chất). Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội.

Thompson, D.T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer- assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics, 47*(1), 31 – 37.

Tin, D. Q., & Dau, D. H. (2016). Interpretation of the geomagnetic anomaly sources in the Mekong Delta using the wavelet transform modulus maxima. In *Workshop on Capacity Building on Geophysical Technology in Mineral Exploration and Assessment on Land, Sea and Island, Ha Noi*, 121–128.

Yang, Y., Li, Y. & Liu, T. (2010). Continuous wavelet transform, theoretical aspects and application to aeromagnetic data at the Huanghua Depression, Dagang Oilfield, China. *Geophysical Prospecting, 58*(4), 669-684.