

Phân tích dữ liệu từ vùng vĩ độ thấp sử dụng phép biến đổi wavelet và thuật toán marquardt

Dương Quốc Chánh Tín^{1,*}, Dương Hiếu Đầu², Phạm Ngọc Ngân², Nguyễn Thanh Hải¹, Danh An¹



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Khi phân tích dữ liệu từ vùng vĩ độ rất thấp như Tây Nam Bộ (vĩ độ $\leq 11,07^\circ$), khó khăn lớn nhất là phương của vectơ cường độ từ hóa và phương của trường từ Trái đất nơi đo đạc thường nằm nghiêng làm cho các dị thường từ có dạng bất đối xứng và nằm lệch đi so với nguồn. Trong bài báo này, phép biến đổi wavelet liên tục hai chiều (2-D) sử dụng hàm wavelet Farshad-Sailhac sẽ được nghiên cứu, áp dụng để đưa dị thường bất đối xứng về dạng đối xứng và dịch chuyển tâm dị thường về tâm nguồn, qua đó xác định được vị trí tâm vật thể gây ra dị thường bằng phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet (WTMM – Wavelet Transform Modulus Maxima). Tiếp theo, dữ liệu dị thường từ được trích xuất theo hai phương vuông góc nhau đi qua tâm nguồn để thực hiện phép biến đổi wavelet liên tục một chiều (1-D) nhằm ước lượng hình dạng, độ sâu và kích thước theo phương ngang của nguồn. Sau đó, sử dụng thuật toán Marquardt để giải bài toán ngược bằng phương pháp bình phương tối thiểu nhằm xác định thêm các thông số đặc trưng khác của nguồn như: kích thước theo phương thẳng đứng và vectơ từ hóa dư. Độ tin cậy của phương pháp đề xuất được kiểm chứng qua các mô hình lý thuyết trước khi áp dụng phân tích dữ liệu từ hàng không ở vùng Tây Nam Bộ. Các kết quả minh giải có sai số bình phương trung bình (Rmse - Root mean square error) nhỏ, phù hợp với tài liệu lỗ khoan sâu, góp phần luận giải tốt hơn về bản chất địa chất của các nguồn dị thường từ trong khu vực nghiên cứu.

Từ khoá: kích thước theo phương thẳng đứng, phép biến đổi wavelet liên tục hai chiều, thuật toán Marquardt, vectơ từ hóa dư, vĩ độ thấp

MỞ ĐẦU

Trong những nghiên cứu cơ bản của Địa Vật lý thăm dò, việc giải bài toán ngược trường địa từ giữ một vai trò quan trọng, góp phần minh giải một cách định lượng 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 vectơ từ hóa dư. Đây là bài toán đa trị nên đã có nhiều phương pháp được đề xuất để giải quyết nó, trong đó có phép 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 để phân tích các tín hiệu địa chấn¹. Kể từ đó, những tiến bộ đáng kể trong toán học đã góp phần làm cho lý thuyết wavelet được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau^{2,3}. Trong việc minh giải dữ liệu trường thế (trong đó có trường dị thường từ), phép biến đổi wavelet được sử dụng để lọc nhiễu, tách trường địa phương ra khỏi trường khu vực quan sát, định vị các nguồn đồng nhất cùng các thuộc tính của chúng^{4,5}.

Với dữ liệu từ vùng vĩ độ thấp, để đưa 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; vì ở đó, cả hai vectơ cường độ từ hóa và trường từ của Trái đất có phương thẳng đứng. Tuy nhiên, ở vùng vĩ độ thấp phổ biến độ của toán tử biến đổi trường về cực bị khuếch đại ở tần số cao (độ dài sóng ngắn) có dạng một hình quạt hẹp, hệ quả là tạo ra 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 chưa giải quyết được một cách triệt để các khó khăn của việc chuyển trường về cực⁶.

Trong bài báo này, phép biến đổi wavelet liên tục được sử dụng kết hợp với thuật toán Marquardt⁷ để giải bài toán ngược thăm dò từ nhằm 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 vectơ từ hóa dư.

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

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 biến tín hiệu một chiều theo không gian

¹Khoa Sư phạm, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

Liên hệ

Dương Quốc Chánh Tín, Khoa Sư phạm, Trường Đại học Cần Thơ, Việt Nam

Email: dqctin@ctu.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 21-09-2020
- Ngày chấp nhận: 25-03-2021
- Ngày đăng: 03-5-2021

DOI: 10.32508/stdjns.v5i2.957



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Trích dẫn bài báo này: Tín D Q C, Đầu D H, Ngân P N, Hải N T, An D. **Phân tích dữ liệu từ vùng vĩ độ thấp sử dụng phép biến đổi wavelet và thuật toán marquardt.** *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.*; 5(2):1216-1230.

$f(x) \in L^2(R)$ thành hàm hai chiều $W(a, b)$ ở dạng tích chập:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx = \langle f(x) | \psi_{a,b}(x) \rangle \quad (1)$$

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

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (2)$$

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

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

$$W(a, b_x, b_y) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \psi\left(\frac{x-b_x}{a}, \frac{y-b_y}{a}\right) dx dy \quad (3)$$

Ở đây, $\psi\left(\frac{x-b_x}{a}, \frac{y-b_y}{a}\right)$ là wavelet con của wavelet mẹ hai chiều $\psi(x, y)$; b_x, b_y là tham số dịch chuyển theo phương x và phương y .

Nếu: $\psi(x, y) = \psi(x) \cdot \psi(y)$ thì biểu thức (3) có thể biến đổi thành:

$$W(a, b_x, b_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b_x}{a}\right) dx \right] \times \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{y-b_y}{a}\right) dy \quad (4)$$

Biểu thức (4) sẽ được thỏa mãn khi áp dụng biến đổi wavelet liên tục 1-D trên hai phương x, y riêng biệt⁸.

Phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet

Trong xử lý ảnh, xác định biên là một bước rất quan trọng. 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 giống như dữ liệu trọng lực, hay dữ liệu địa từ, hoặc dữ liệu 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 dựa trên việc tìm vị trí trên tỉ lệ đồ mà tại đó hệ số biến đổi wavelet đạt cực đại. Do đó kỹ thuật xác định biên bằng phép biến đổi wavelet⁹ còn được gọi là phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet (WTMM). Ứng dụng phương pháp này, phân tích dữ liệu từ giúp xác định vị trí, độ sâu và kích thước của các nguồn dị thường.

Hàm wavelet phức Farshad-Sailhac

Trong bài báo, hàm wavelet phức Farshad-Sailhac được xây dựng¹⁰ dựa trên nhân Farshad¹¹:

$$\theta(x, z) = \frac{1}{(x^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{1}{(x^2 + (z+1)^2)^{1/2}} \quad (5)$$

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

$$\psi^{(F)}(x) = \frac{\partial^2 \theta(x, z)}{\partial x^2} \Big|_{z=1} = \frac{4 - 2x^2}{(x^2 + 4)^{5/2}} - \frac{1 - 2x^2}{(x^2 + 1)^{5/2}} \quad (6)$$

và phần ảo chính là biến đổi Hilbert của phần thực¹²:

$$\psi^{(S)}(x) = \text{Hilbert} \left(\psi^{(F)}(x) \right) \quad (7)$$

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

$$\psi^{(FS)}(x) = \frac{4 - 2x^2}{(x^2 + 4)^{5/2}} - \frac{1 - 2x^2}{(x^2 + 1)^{5/2}} + i \cdot \left(\frac{5}{2}x - \frac{4}{5}x^3 \right) \left[\frac{1}{(x^2 + 4)^{5/2}} - \frac{1}{(x^2 + 1)^{5/2}} \right] \quad (8)$$

Wavelet phức Farshad-Sailhac sẽ 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.

Thuật toán Marquardt

Mục đích cuối cùng của việc minh giải địa chất các tài liệu Địa Vật lý nói chung, với tài liệu từ nói riêng là cần phải tìm ra những tham số thực của nguồn gây ra dị thường đã quan sát được. Các nhà Địa Vật lý vẫn thường gọi là giải bài toán ngược. Có thể mô tả cách giải bài toán ngược bằng biểu thức sau:

$$F = \left(\sum [T_{qs}(x, y) - T_{lt}(x, y, a_j)]^2 \right)_{min} \quad (9)$$

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

Trong biểu thức (9), điều kiện để hàm F có cực tiểu là:

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = -2 \sum \frac{[T_{qs}(x, y) - T_{lt}] \partial T_{lt}}{\partial a_k} = 0 \quad (10)$$

Phương trình (10) 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 theo một quy luật, trong đó, giá trị tham số ở lần lặp sau $l+1$ được tính dựa vào giá trị lần lặp trước đó theo công thức:

$$a_{l+1,k} = a_{l,k} - D^{-1} \text{grad} [F(a_{l,k})] \quad (11)$$

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 (MxM) phần tử:

$$D_{kl} = \frac{\partial^2 F}{\partial a_k \partial a_l}; k, l = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

Để có thể đảm bảo chắc chắn rằng cho hàm F tiến về cực tiểu thì ma trận D phải là ma trận xác định dương⁷. 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 $\lambda > 0$ đủ lớn sao cho:

$$\begin{cases} D'_{kk} = D_{kk}(1 + \lambda) \text{ khi } l = k \\ D'_{kl} = D_{kl} \text{ khi } l \neq k \end{cases} \quad (13)$$

Thông thường các phần tử của D_{kl} có giá trị nhỏ, việc đưa λ vào theo quy luật trên làm cho ma trận này luôn đảm bảo tính xác định dương. Sau mỗi lần lặp các tham số của mô hình được thay đổi và tính T_{it} rồi so sánh với trường quan sát, nếu hàm F 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. Quá trình tính tiếp tục cho đến khi hàm F đạt giá trị đủ nhỏ.

Quy trình phân tích các dị thường từ vùng vĩ độ thấp bằng phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt

Việc xác định các thông số của nguồn dị thường từ sử dụng 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.

Thực hiện biến đổi wavelet Farshard-Sailhac 2-D trên dữ liệu dị thường từ. Vẽ bản đồ trường của hệ số biến đổi wavelet 2-D ở các tỉ lệ khác nhau theo kinh độ và vĩ độ. Xác định tọa độ tâm nguồn từ các điểm cực đại địa phương của hệ số biến đổi wavelet trên các bản đồ.

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.

Trích xuất dữ liệu dị thường dọc theo các tuyến khác nhau đi qua tâm nguồn để thực hiện biến đổi wavelet Farshad-Sailhac đa phân giải. Vẽ đẳng trị và đẳng pha hệ số biến đổi wavelet Farshard-Sailhac trong mặt phẳng tỉ lệ đồ (a, b).

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 $bx(p)$ (nếu phân tích dữ liệu theo phương x) hoặc $by(t)$ và $by(p)$ (nếu phân tích

dữ liệu theo phương y). Khi đó, kích thước của nguồn theo hai phương x, y được xác định bởi biểu thức sau:

$$\begin{aligned} D_x &\approx [bx(p) - bx(t)] \times \Delta & (a) \\ D_y &\approx [by(p) - by(t)] \times \Delta & (b) \end{aligned} \quad (14)$$

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 $\log(W/a^2) = \beta \log(a+z) + c$, sau đó ước tính chỉ số cấu trúc¹²: $N = -\beta - 3$ (15), qua đó ước lượng hình dạng tương đối của nguồn (Bảng 1).

Xác định độ sâu của các nguồn trường

Với từng nguồn, chỉ số cấu trúc N đã được xác định, tính hệ số k ¹⁰.

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

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 như sau:

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

Bước 3: Sử dụng thuật toán Marquardt để giải bài toán ngược nhằm xác định thêm các thông số đặc trưng khác của nguồn dị thường từ gồm: kích thước theo phương z và vectơ từ hóa dư. Việc giải bài toán ngược bằng thuật toán Marquardt được thực thi 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).

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

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, vĩa móng; nguồn dị thường từ gồm các vật thể có hình dạng khác nhau phân bố không quá gần nhau. Ngoài ra, nhằm làm tăng tính thuyết phục của kết quả khi phân tích, nhiều ngẫu nhiên cũng được đưa vào dữ liệu mô hình. Sai số bình phương trung bình thu được từ kết quả phân tích các dữ liệu mô hình ấy là nhỏ chứng tỏ phương pháp phân tích là đáng tin cậy. Trong khuôn khổ bài viết này, kết quả xử lý trên hai mô hình lý thuyết điển hình sẽ được giới thiệu.

Bảng 1: Chỉ số cấu trúc N của nguồn dị thường từ và hình dạng tương ứng¹³

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

Mô hình 1: Nguồn dị thường từ đơn

Trong mô hình này, nguồn trường là một khối lăng trụ hình chữ nhật 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 lăng trụ: $x = 45-55; y = 45-55; z = 1,5-4,5$.

Giả sử vectơ từ hóa của khối lăng trụ và của trường địa từ có cùng hướng với độ từ khuynh $I = 4^\circ$; góc phương vị $\lambda = 0^\circ$; cường độ từ hóa $J = 2,6$ A/m.

Nhiều được tạo bởi hàm random trong Matlab nhân cho 2,0% độ lớn cực trị của dị thường phân tích (cực đại của nhiễu tương đương 7,0 nT).

Hình 1a mô tả dị thường từ của khối lăng trụ đồng nhất gây ra trên mặt phẳng quan sát. Sự phân bố các đường đẳng trị của dị thường này 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 4) trên dữ liệu dị thường từ (sử dụng hàm wavelet Farshad-Sailhac trong công thức 8). Kết quả vẽ đẳng trị hệ số biến đổi wavelet 2-D ở tỉ lệ $a = 3$ được thể hiện trong Hình 1b cho thấy tồn tại duy nhất một điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet – tương ứng với vị trí của tâm nguồn: $(x = 50,0; y = 50,0)$ (km). Như vậy, cực đại của hệ số biến đổi wavelet 2-D trên dữ liệu dị thường từ, sử dụng hàm wavelet Farshad-Sailhac cho phép xác định chính xác vị trí tâm nguồn trên mặt phẳng quan sát trong điều kiện từ hóa nghiêng, đặc biệt với góc từ khuynh nhỏ.

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 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, vật thể gây từ được thiết kế trong mô hình dạng đẳng thức 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 phân dương - âm - dương, trong đó cực trị âm ở gần km thứ 50 của tuyến (gần tâm nguồn).

Hình 2b là đường biểu diễn của $\log(W/a^2)$ theo $\log(a+z)$. Dựa vào phương trình đường thẳng $Y = -4,7.X + 12,4$ ta ước lượng được bậc đồng nhất của nguồn là $\beta = -4,7$; từ đó tìm được chỉ số cấu trúc: $N = 1,7$ (công thức 15); suy ra: $k = 0,5403$ (công thức 16). Hình 2c cho phép xác định được vị trí điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet: $a = 2,8 = a_m$; do đó độ sâu đến tâm nguồn tính được là: $z = 3,0$ km (công thức 17).

Ngoài ra, giá trị biên trái và biên phải được xác định để dùng trên Hình 2d cho phép ước lượng kích thước của nguồn theo công thức (14a): $D_x = 10,0$ km.

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

Tiếp theo sử dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương z , cũng như vectơ độ từ hóa của nguồn (các thông số về vị trí, hình dạng, kích thước theo hai phương x, y được giữ cố định).

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

Nhằm tăng tính thuyết phục của phương pháp được đề xuất, nghiên cứu sẽ tiếp tục thực hiện trên các số liệu mô hình được tạo bởi nhiều nguồn trường được bố trí theo các phương khác nhau.

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

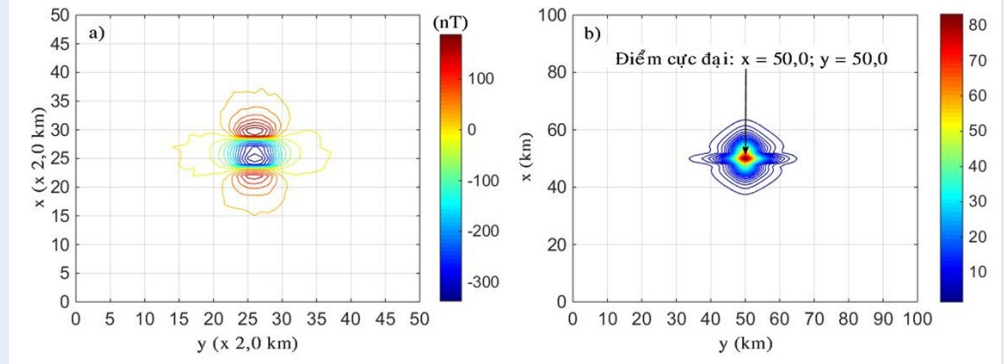
Trong mô hình này, nguồn trường gồm ba khối vật chất đồng nhất khác nhau được biểu diễn trong hệ tọa độ ba chiều x, y, z (km) với các thông số được cho bởi Bảng 3.

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

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

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

Hình 4a thể hiện dị thường từ toàn phần tính được từ mô hình 2. Dị thường này vẫn thể hiện tính lưỡng cực



Hình 1: a) Dị thường từ do khối lãg trụ 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 $a = 3$.

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)	Vectơ từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
		D_x	D_y	D_z		J (A/m)	λ ($^\circ$)	I ($^\circ$)	
1,7	Lãg trụ	10,0	10,0	3,1	1,5	2,2	-0,2	4,2	2,094

Bảng 3: Các thông số của mô hình 2

Số hiệu	Thông số	Tọa độ (km)			Góc phương vị ($^\circ$)
		x	y	z	
N1	Lãg trụ	67-73	47-53	1,0-5,0	15
N2	Khối cầu	37-43	37-43	1,5-7,5	0
N3	Vĩa ngang	45-55	55-65	2,0-3,0	-15

khá rõ ràng. Dựa vào sự phân bố của các đường đẳng trị ta xác định được thể 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 vật thể.

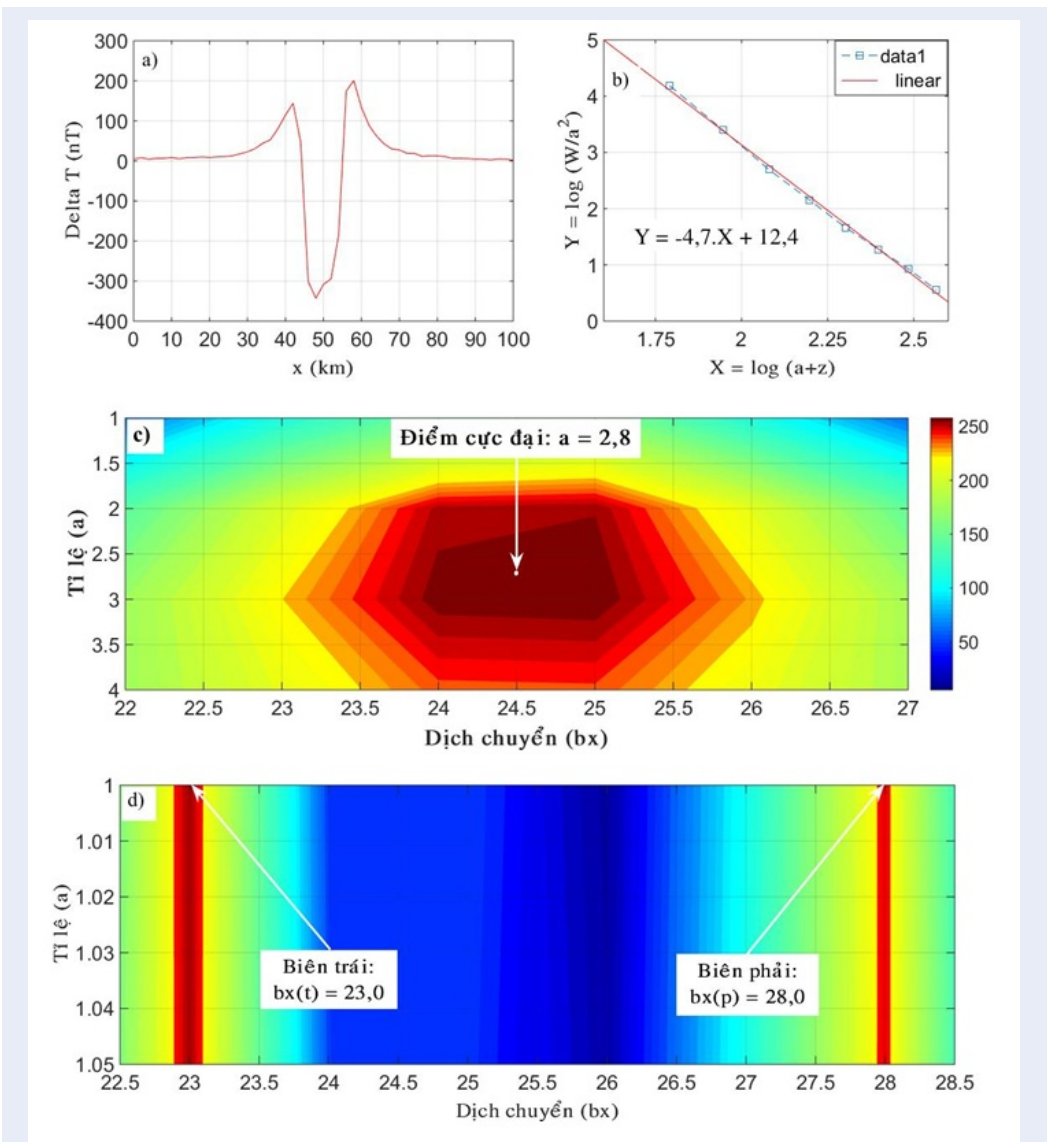
Áp dụng phép biến đổi wavelet 2-D trên tín hiệu dị thường từ toàn phần của mô hình 2. Kết quả vẽ đẳng trị hệ số biến đổi wavelet ở tỉ lệ $a = 3$ được biểu diễn trong Hình 4b cho thấy tồn tại ba điểm hội tụ, cho phép xác định tọa độ tâm của ba nguồn được thiết kế trong mô hình.

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 vật thể gây từ 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 .

Hình 5a thể hiện dị thường từ dọc theo tuyến $y_2 = 40,0$ km đi qua tâm nguồn dị thường N2. Dị thường có phần dương – âm – dương, trong đó cực trị âm ở gần km thứ 40 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 $Y = -6,0.X + 14,2$ ta ước lượng được bậc đồng nhất của nguồn là $\beta = -6,0$; từ đó tìm được chỉ số cấu trúc: $N = 3,0$ (công thức 15); suy ra: $k = 0,8933$ (công thức 16).



Hình 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 $\log(W/a^2)$ và $\log(z+a)$; c, d) Đẳng trị và đẳng pha hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường của tuyến.

Hình 5c cho phép xác định được vị trí điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet: $a_2 = 2,6 = a_{2m}$; do đó độ sâu đến tâm nguồn tính được là: $z = 4,6$ km (công thức 17).

Ngoài ra, giá trị biên trái và biên phải được xác định để dùng trên Hình 5d cho phép ước lượng kích thước của nguồn theo công thức (14a): $D_x = 5,8$ km.

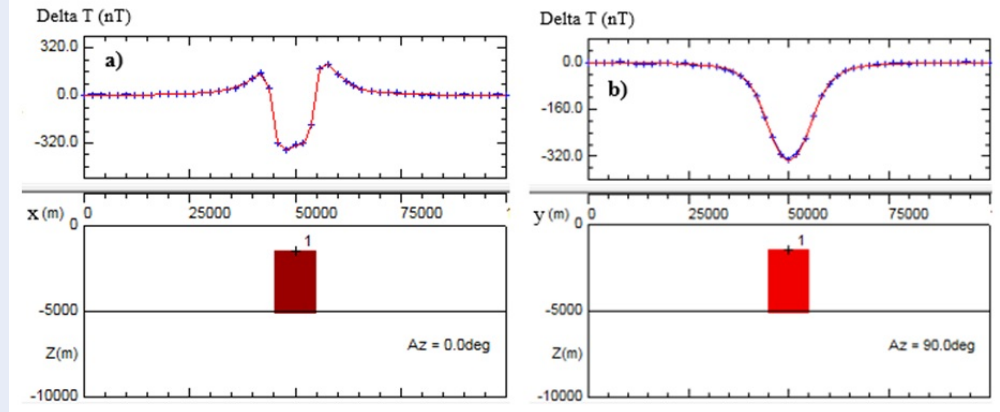
Để phân tích nguồn N1, dữ liệu dọc theo tuyến $y_1 = 50,0$ km đi qua tâm nguồn được chọn để thực hiện phép biến đổi wavelet 1-D.

Tương tự, dữ liệu dọc theo tuyến $y_3 = 60,0$ km đi qua tâm nguồn N3 được chọn để phân tích các thông số của nguồn N3.

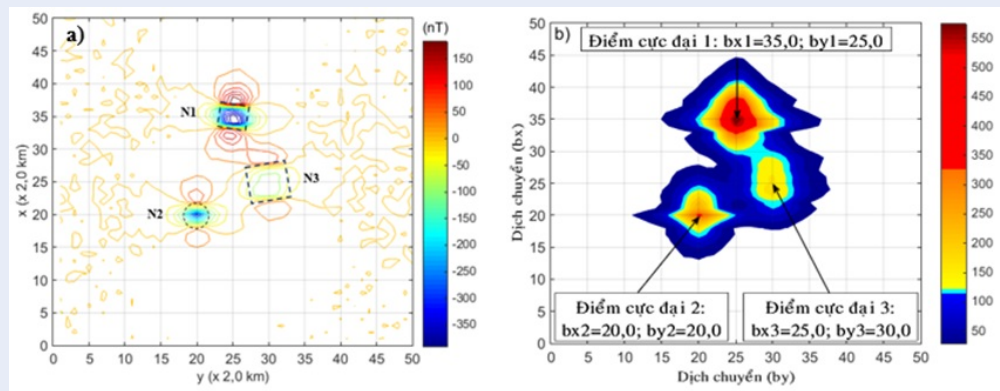
Thực hiện các phép tính tương tự như khi phân tích các thông số của nguồn N2 để phân tích nguồn N1 và N3 ta được các thông số về hình dạng, kích thước theo hai phương ngang, dọc và độ sâu đến tâm nguồn. Các thông số này được sử dụng khi áp dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương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

Các kết quả tính toán chỉ ra trong Bảng 4 khẳng định độ tin cậy cao của phương pháp (sai số bình phương



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.



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 $a = 3$.

trung bình giữa dị thường tính và dị thường quan sát thấp).

Công việc tiếp theo là ứng dụng phương pháp wavelet và thuật toán Marquardt vào việc minh giải dữ liệu từ ở vùng Tây Nam Bộ nhằm khẳng định khả năng ứng dụng thực tiễn của phương pháp được đề xuất.

Phân tích dữ liệu từ vùng Tây Nam Bộ

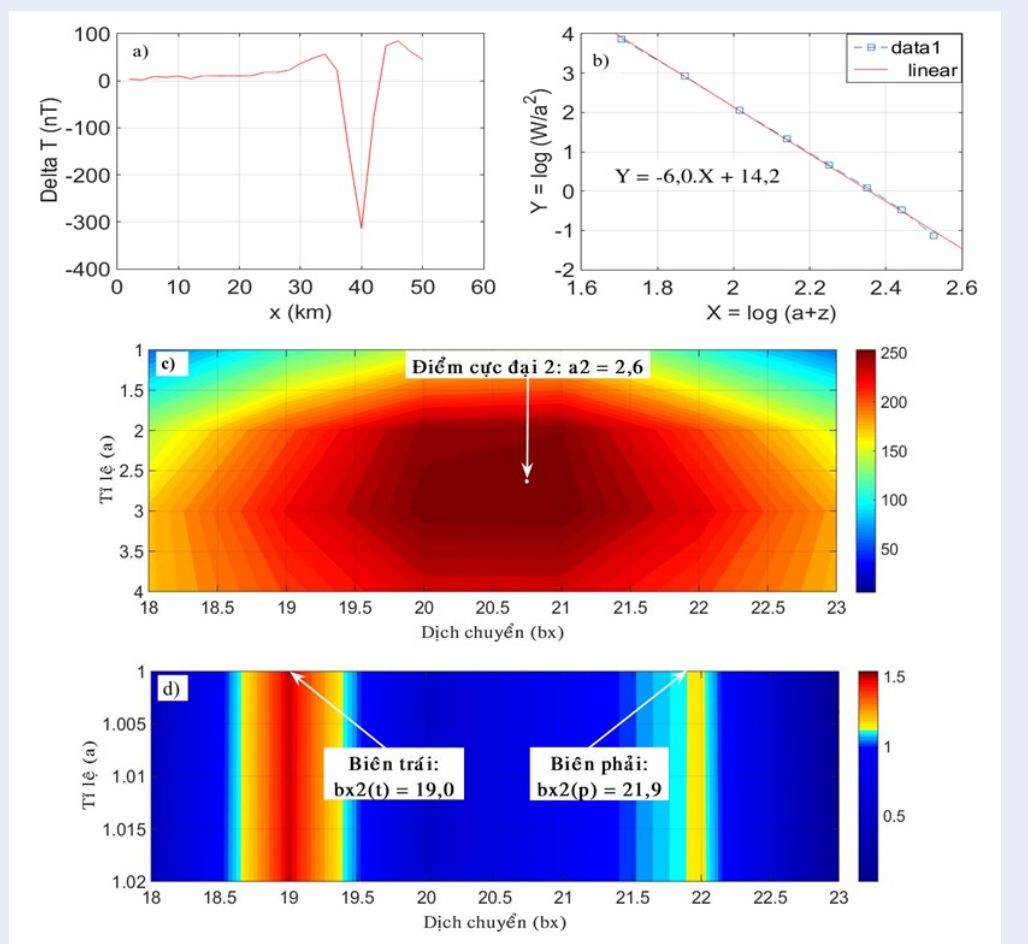
Sử dụng bản đồ dị thường từ toàn phần vùng Tây Nam Bộ với tỉ lệ 1/200.000 của Tổng cục Địa chất và khoáng sản Việt Nam, được đo và hoàn thành năm 1992 (Hình 7). Thiết bị đo là từ kế proton nằm trên máy bay, độ cao trung bình đến mặt đất là 300 m¹⁴. Khu vực được chọn phân tích chi tiết (ô chữ nhật màu đen trên Hình 7) có tọa độ trong khoảng $9,56^\circ - 10,04^\circ$ vĩ Bắc và $105,93^\circ - 106,54^\circ$ kinh Đông thuộc địa phận ba tỉnh: Sóc Trăng, Trà Vinh, Vĩnh Long (Hình 8). Trong khu vực tồn tại 3 dị thường đơn,

mỗi dị thường có 3 đới dương - âm - dương sắp xếp theo phương kinh tuyến, trong đó đới dương ở giữa là phần giao nhau của 3 dị thường có dạng kéo dài theo phương vĩ tuyến. Đới âm của 3 dị thường (gần tâm vật thể gây từ) phân bố không quá gần nhau.

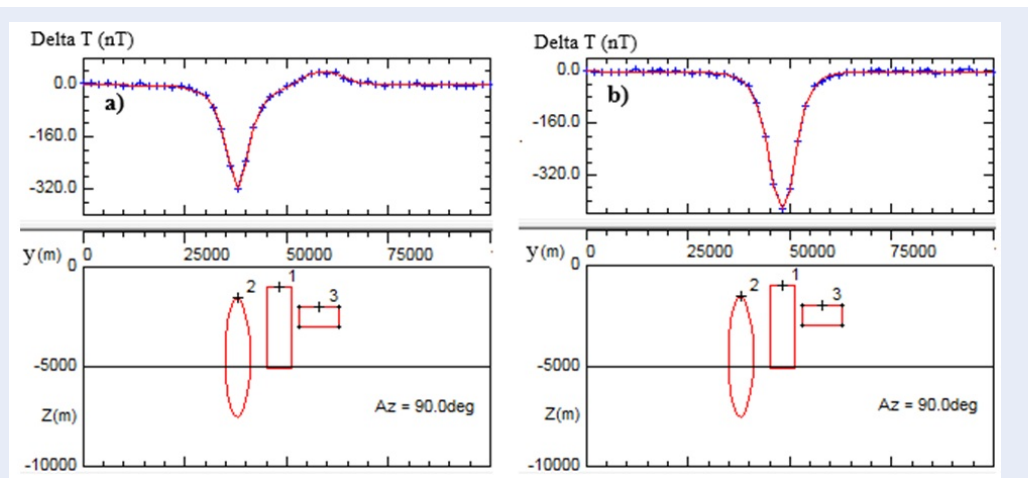
Áp dụng phép biến đổi wavelet Farshad-Sailhac 2-D trên dữ liệu dị thường từ ở vùng Tây Nam Bộ với các tỉ lệ khác nhau. Hình 9 là bản đồ trường hệ số biến đổi wavelet 2-D vùng Tây Nam Bộ ở các tỉ lệ $a = 3$. Bản đồ cho thấy sự hội tụ các đường đẳng trị về tâm nguồn.

Dựa vào các điểm cực đại địa phương hệ số biến đổi wavelet trong khu vực nghiên cứu, tọa độ tâm 3 nguồn dị thường (theo kinh độ và vĩ độ) đã được xác định. Cụ thể: $M_1 (106,03^\circ; 9,62^\circ)$, $M_2 (106,46^\circ; 9,71^\circ)$, $M_3 (106,12^\circ; 9,93^\circ)$.

Để ước lượng hình dạng, độ sâu và kích thước của vật thể gây ra dị thường từ M_1 , một tuyến dữ liệu (K3a)



Hình 5: Các đồ thị thể hiện kết quả xử lý tuyến $y_2 = 40,0$ km. a) Dị thường từ dọc theo tuyến; b) Tương quan giữa $\log(W/a^2)$ 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 $x = 40,0$ km; b) Tuyến $x = 70,0$ km.

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

Số hiệu	Chỉ số cấu trúc N	Hình dạng	Kích thước (km)			Độ sâu đến mặt trên (km)	Vectơ từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
			D_x	D_y	D_z		J (A/m)	λ ($^\circ$)	I ($^\circ$)	
N1	1,7	Lăng trụ	6,0	6,0	4,1	1,0	2,3	13,8	3,8	3,517
N2	3,0	Cầu	5,8	5,8	6,0	1,5	2,3	-0,1	4,1	
N3	1,2	Vĩa	10,0	10,0	1,0	2,0	2,3	-17,6	3,9	

đọc theo kinh tuyến $106,03^\circ$ và tuyến (V3a) dọc theo vĩ tuyến $9,62^\circ$ (đi qua tâm nguồn M1) được trích xuất từ bản đồ địa thường từ vùng Tây Nam Bộ. Khoảng cách giữa các điểm đo trên mỗi tuyến đều bằng nhau = 2,0 km (vì bản đồ tỉ lệ 1/200.000).

Hình 10a cho phép xác định tọa độ điểm cực đại: $a1 = 3,5 = a1_m$.

Bậc đồng nhất của nguồn M1 được xác định từ Hình 10b tương ứng là $\beta_1 = -4,7$; suy ra chỉ số cấu trúc $N_1 = 1,7$ (lăng trụ); từ đó ước tính được: $k_1 = 0,5403$. Độ sâu đến tâm nguồn được ước lượng từ công thức (17), sau đó hiệu chỉnh độ cao máy bay 0,3 km.

Hình 4.11a và 4.11b biểu diễn kết quả vẽ đẳng pha hệ số biến đổi wavelet trên dữ liệu địa thường dọc theo tuyến K3a và V3a, cho phép xác định vị trí các biên trái, phải tương ứng: $bx1(t) = 15,3$; $bx1(p) = 19,9$; $by1(t) = 15,3$; $by1(p) = 18,9$. Từ đó, kích thước theo phương x (Bắc - Nam) và phương y (Đông - Tây) được ước lượng theo công thức (14a) và (14b):

$$D_{x1} = (19,9 - 15,3) \times 2,0 = 9,2 \text{ km}$$

$$D_{y1} = (18,9 - 15,3) \times 2,0 = 7,2 \text{ km}$$

Tương tự với nguồn địa thường M2, M3 dữ liệu theo tuyến (K3b); (V3b) và (K3c) và (V3c) được chọn để phân tích định lượng bằng phép biến đổi wavelet Farshad-Sailhac 1-D.

Các thông số của nguồn xác định từ phép biến đổi wavelet (tọa độ tâm nguồn, hình dạng, kích thước theo hai phương ngang và dọc) được sử dụng khi áp dụng thuật toán Marquardt để xác định thêm kích thước theo phương thẳng đứng, cũng như vectơ độ từ hóa dư của nguồn.

Sau 50 vòng lặp, kết quả tính toán được trình bày ở Hình 12 và Bảng 5.

Trong khu vực nghiên cứu, có một lỗ khoan sâu - Cừu Long 1 ($106,32^\circ$ Đ; $9,62^\circ$ B). Lỗ khoan này đạt đến độ sâu tới móng đá của khu vực là 2,1 km. Theo thông tin từ cột địa tầng của lỗ khoan này¹⁵ (Hình 13), trong khoảng độ sâu 2,0 km là các đá phun trào trung tính

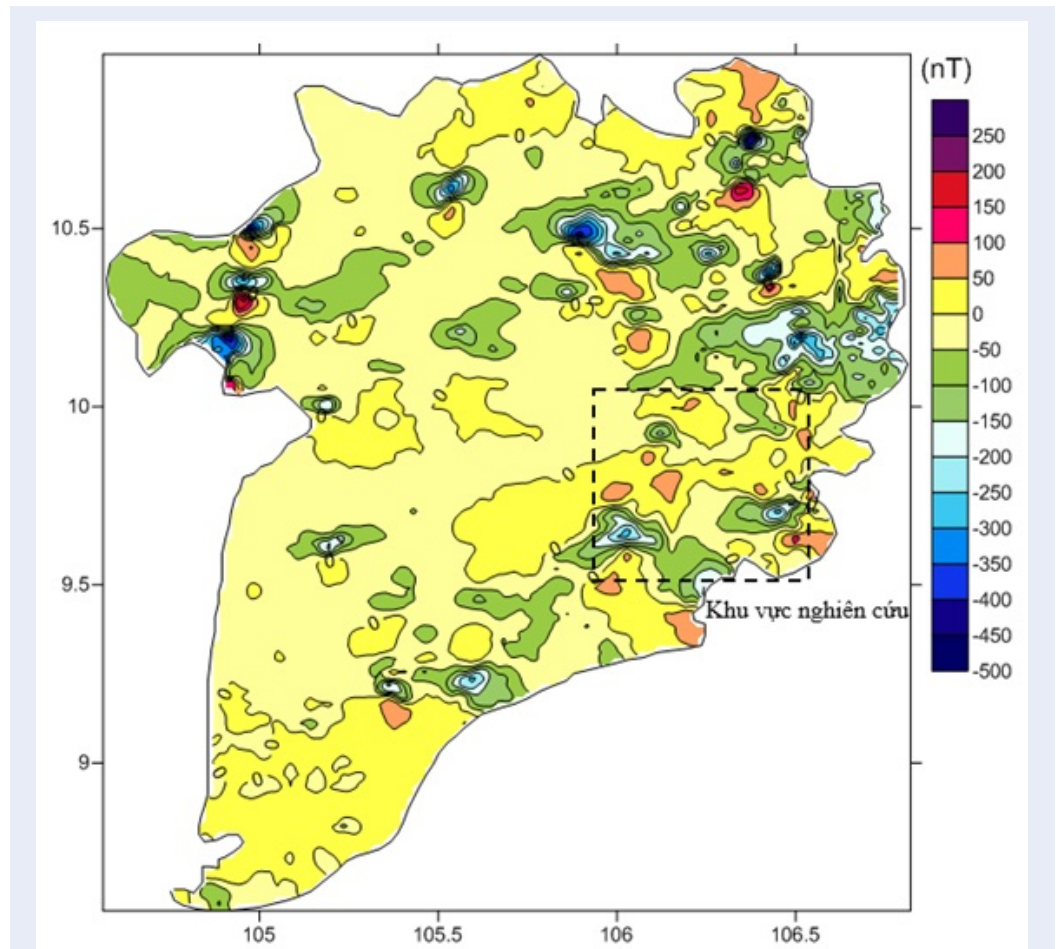
thuộc hệ tầng Long Bình tuổi J_3-K_{1-2} bao gồm Andesite, Ryolite, Andezito, Porphyrite. Như vậy, độ sâu của nguồn các nguồn M1, M2 và M3 được phân tích trong bài báo khá trùng khớp với tài liệu lỗ khoan sâu của vùng nghiên cứu.

KẾT LUẬN

Trong bài báo, phép biến đổi wavelet liên tục 2-D sử dụng hàm wavelet phức Farshad-Sailhac đã được áp dụng để phân tích dữ liệu từ vùng vĩ độ thấp nhằm đưa địa thường dạng lưỡng cực (gồm 3 đôi dương - âm - dương) về dạng đối xứng, trong đó tâm nguồn được xác định từ điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet. Từ đó, dữ liệu địa thường dọc theo hai tuyến vuông góc đi qua tâm nguồn dọc theo kinh tuyến và vĩ tuyến được trích xuất để phân tích định lượng bằng phép biến đổi wavelet 1-D sử dụng hàm wavelet phức Farshad-Sailhac nhằm xác định các thông số cơ bản của nguồn gồm: chỉ số cấu trúc, hình dạng, kích thước ngang theo hai phương vuông góc và độ sâu. Các thông số này được sử dụng khi giải bài toán ngược áp dụng thuật toán Marquardt (góp phần giảm thiểu tính đa trị và thời gian tính toán) nhằm xác định thêm các thông số khác của nguồn như: kích thước theo phương thẳng đứng, vectơ 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 Tây Nam Bộ. 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 của vùng.

LỜI CẢM ƠN

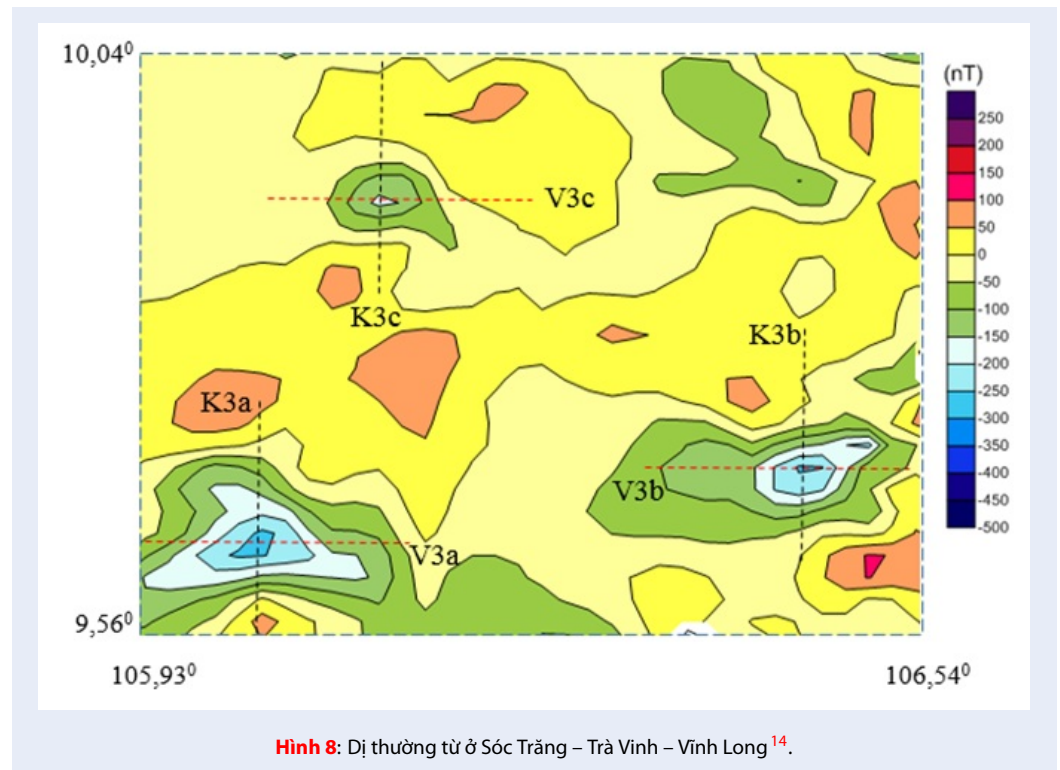
Tác giả cảm ơn công ty Giải pháp phần mềm Địa Vật lý của Úc (Geophysical Software Solutions Pty. Ltd, Australia) đã hỗ trợ một licence để vận hành phần mềm Potent v4.16.07, góp phần nâng cao hiệu quả nghiên cứu.



Hình 7: Bản đồ dị thường từ vùng Tây Nam Bộ¹⁴ (các đường đẳng trị cách nhau 50 nT).

Bảng 5: Tổng hợp kết quả phân tích các thông số nguồn dị thường M1, M2 và M3

Thông số	Chỉ số cấu trúc N	Hình dạng	Kích thước (km)			Độ sâu đến mặt trên (km)	Vectơ từ hóa			Sai số bình phương trung bình (nT)
			D_x	D_y	D_z		J (A/m)	λ ($^\circ$)	I ($^\circ$)	
Số hiệu										
M1	1,7	Lăng trụ	9,2	7,2	3,9	1,7	1,8	8,3	3,5	34,781
M2	1,3	Vía dày	5,8	7,1	0,5	2,0	1,6	-19,9	-2,1	
M3	1,4	Vía dày	5,7	7,1	0,6	2,2	1,2	14,0	0,1	



DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

1-D (One-dimensional): một chiều

2-D (Two-dimensional): hai chiều

CWT (Continuous Wavelet Transform): phép biến đổi wavelet liên tục

WTMM (Wavelet Transform Modulus Maxima): cực đại độ lớn biến đổi wavelet

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH TÁC GIẢ

Các tác giả tuyên bố rằng họ không có xung đột lợi ích.

ĐÓNG GÓP CỦA TỪNG TÁC GIẢ

Dương Quốc Chánh Tín: Nghiên cứu lý thuyết, đề xuất phương pháp, xây dựng quy trình phân tích dữ liệu, tổ chức thực hiện quy trình, thảo luận kết quả, viết và chịu trách nhiệm về bài báo.

Dương Hiếu Đầu: Thảo luận kết quả, góp ý sửa chữa bản thảo.

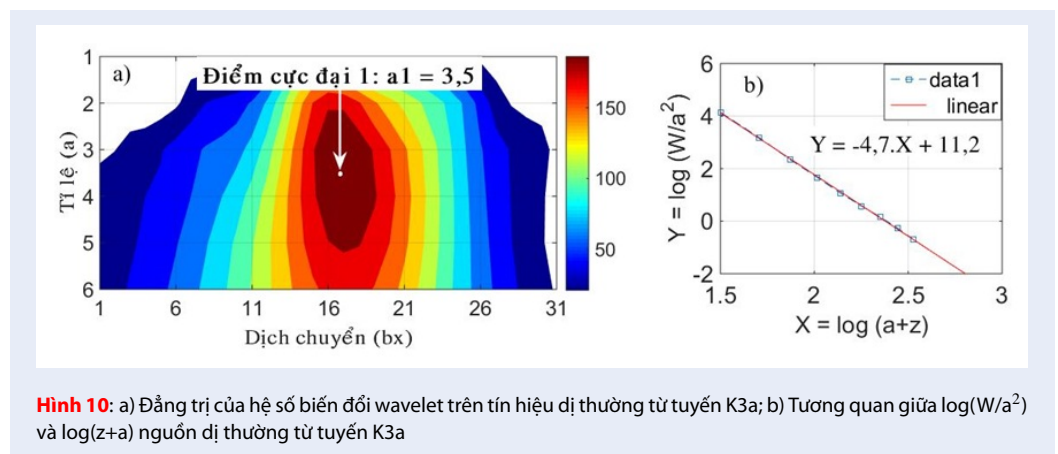
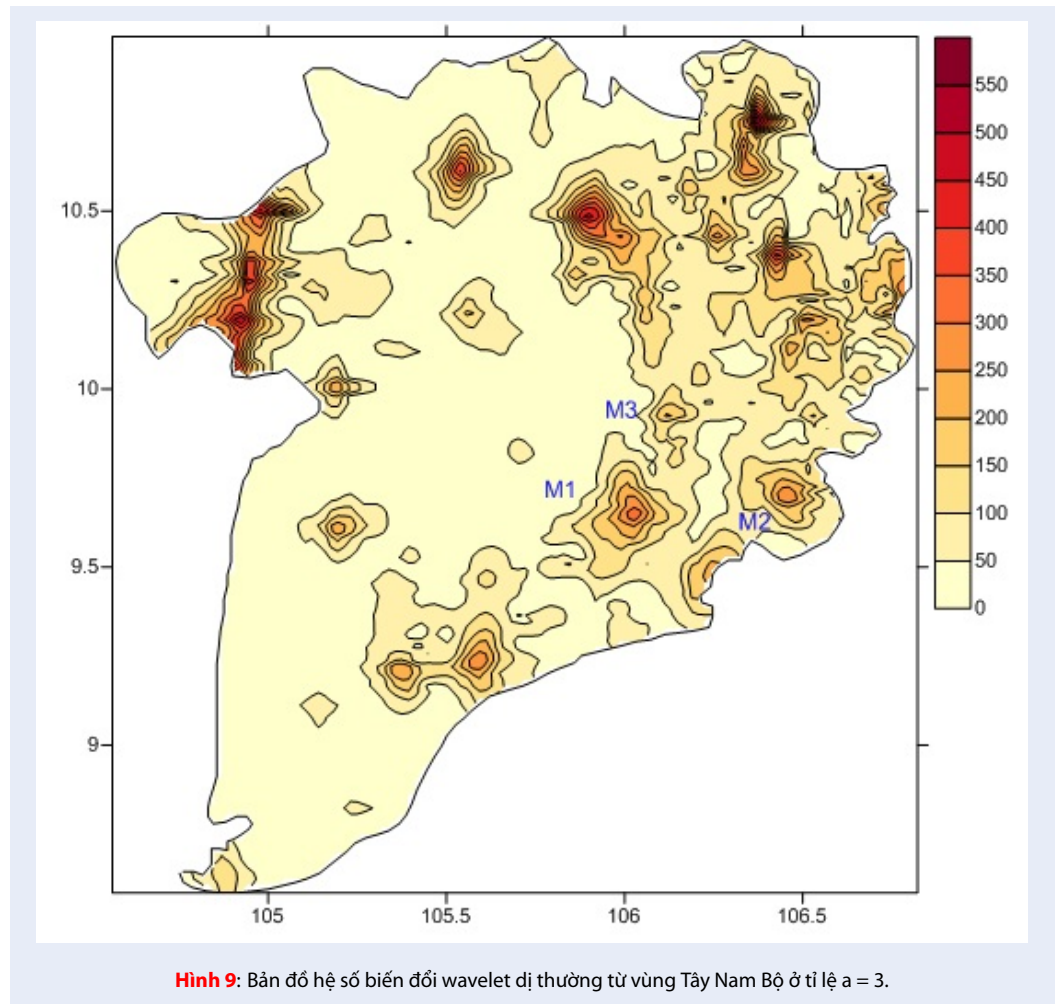
Phạm Ngọc Ngân: Áp dụng quy trình phân tích dữ liệu qua các mô hình lý thuyết và thực nghiệm sử dụng kết hợp phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt.

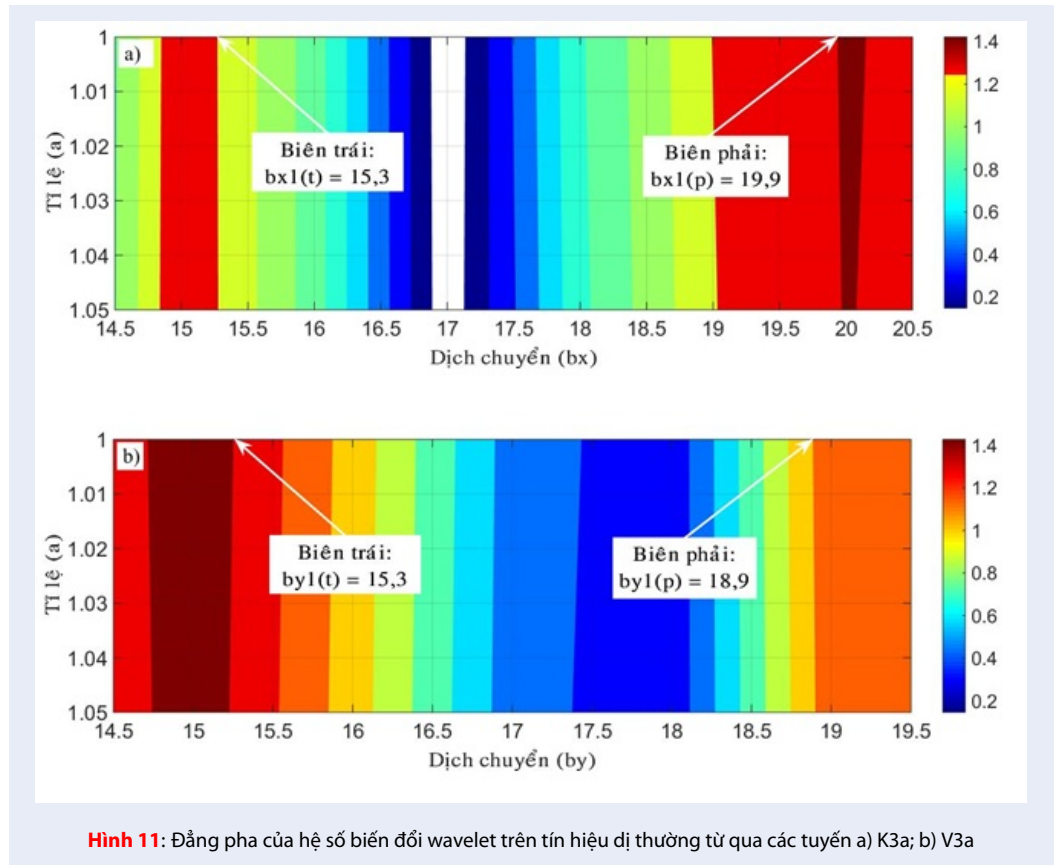
Nguyễn Thanh Hải: Áp dụng quy trình phân tích dữ liệu qua các mô hình lý thuyết và thực nghiệm sử dụng phép biến đổi wavelet.

Danh An: Áp dụng quy trình phân tích dữ liệu qua các mô hình lý thuyết và thực nghiệm sử dụng thuật toán Marquardt.

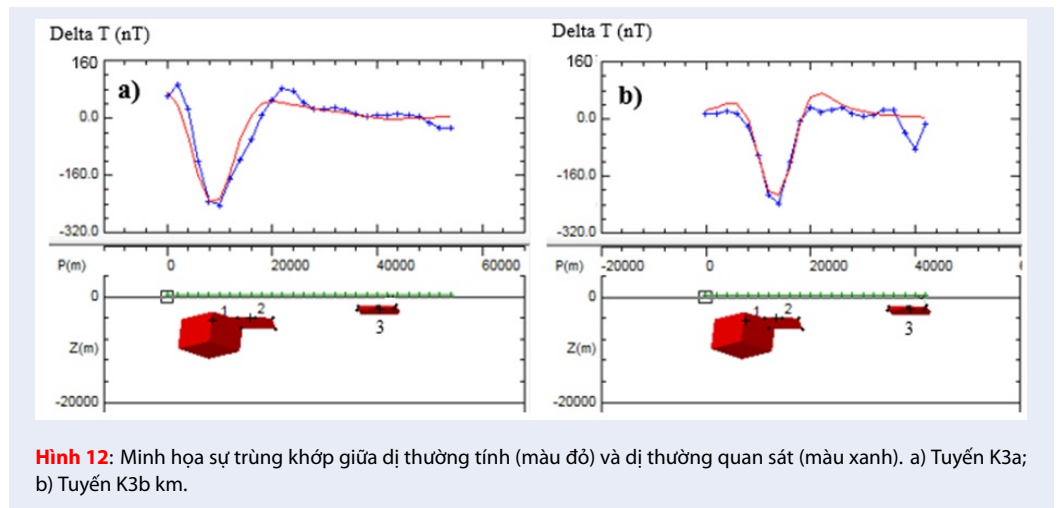
TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Kumar P, Fofoula-Georgiou E. Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*. 1997;35(4):385–412. Available from: <https://doi.org/10.1029/97RG00427>.
2. Daubechies I. *Ten lectures of wavelets*. Springer - Verlag Press. 1992;341. PMID: 18296155. Available from: <https://doi.org/10.1137/1.9781611970104>.
3. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic. San Diego Press. 1998;p. 824. Available from: <https://doi.org/10.1016/B978-012466606-1/50008-8>.
4. Fedi M, Quarta T. Wavelet analysis for the regional - residual separation of potential field anomalies. *Geophysical Prospecting*. 1998;46(5):507–525. Available from: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1998.00105.x>.
5. Fedi M, Cella F, Quarta T, Villani A V. 2D Continuous Wavelet Transform of potential fields due to extended source distributions. *Appl Comput Harmon Anal*. 2010;28:320–337. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.acha.2010.03.002>.
6. Hải NH, Nhân HT, Liệt DV, Thu NN. Nâng cao chất lượng minh giải tài liệu từ ở vùng vĩ độ thấp. *Tạp chí phát triển KH - CN, ĐHQG TP HCM*. 2017;20(T4-2017):105–114.
7. Marquardt DW. An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. U.S.A. 1963;11(2):431–441. Available from: <https://doi.org/10.1137/0111030>.
8. Yang Y, Li Y, Liu T. Continuous wavelet transform, theoretical aspects and application to aeromagnetic data at the Huanghua Depression, Dagang Oilfield, China. *Geophysical Prospecting, European Association of Geoscientists & Engineers*. 2010;58:669–684. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00847.x>.

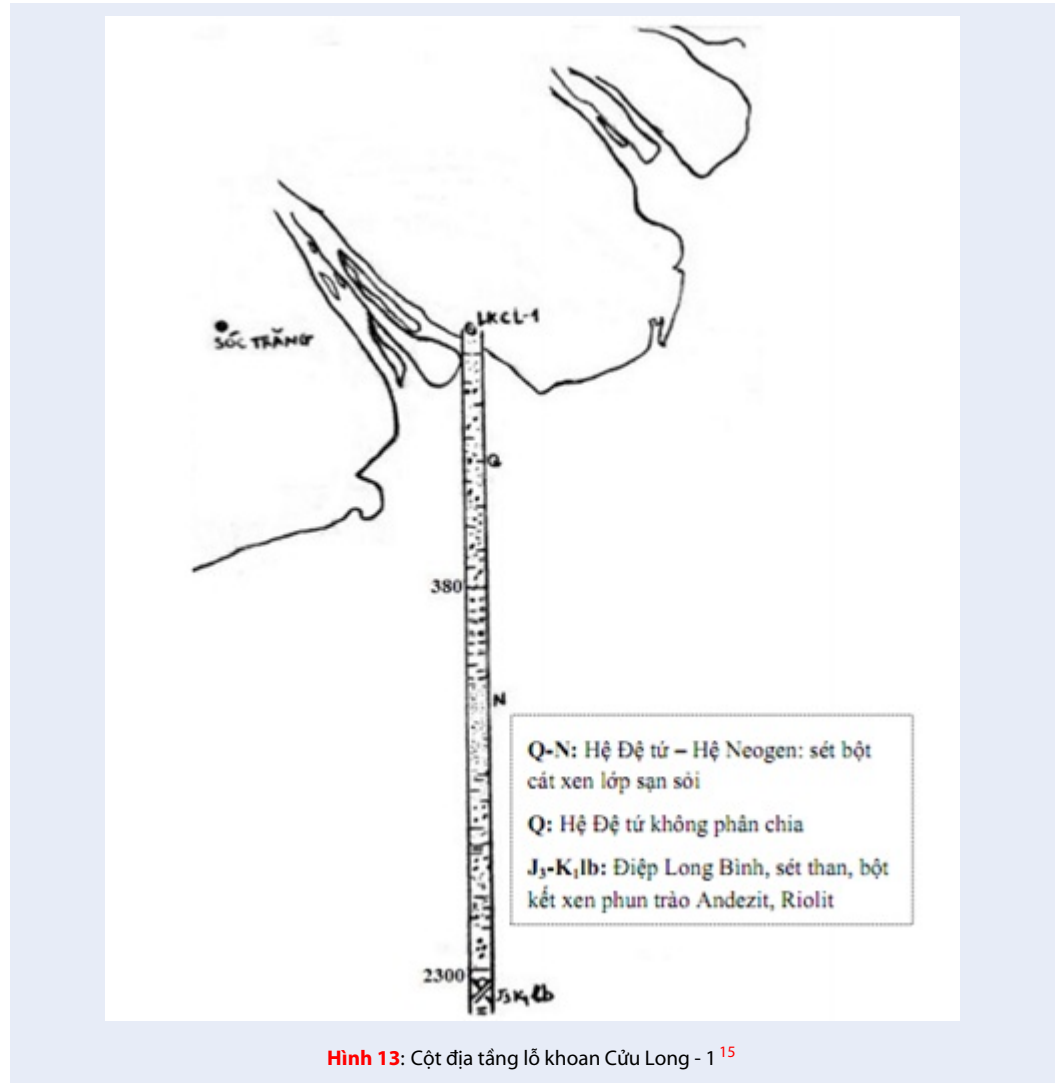




Hình 11: Đồ thị biểu diễn pha của hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường từ qua các tuyến a) K3a; b) V3a



Hình 12: Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (màu đỏ) và dị thường quan sát (màu xanh). a) Tuyến K3a; b) Tuyến K3b km.



- Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets. IEEE Transactions on information Theory. 1992;38(2):617–643. Available from: <https://doi.org/10.1109/18.119727>.
- Tín DQC. Sử dụng phép biến đổi wavelet đa phân giải để xử lý dữ liệu từ, trọng lực và ra đa xuyên đất. Luận án tiến sĩ Vật lý, Trường ĐH KHTN, TP HCM. 2019;p. 164.
- Farshard S, Amin R K, SiahKoochi H R. Interpretation 2-D Gravity Data using 2-D Continuous Wavelet Transform Introduction. 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC. 2010; Barcelona. Spain;p. 304–309. Available from: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201400715>.
- Sailhac P, Galdeano A, Gibert D, Moreau F, Delor C. 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. 2000;105(B8):19455–19475. Available from: <https://doi.org/10.1029/2000JB900090>.
- Thompson DT. EULDPH: A new technique for making computer- assisted depth estimates from magnetic data. Geophysics. 1982;47(1):31 –37. Available from: <https://doi.org/10.1190/1.1441278>.
- Sơn NX. 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 ĐH Mỏ - Địa chất, Hà Nội. 1996;95.
- Liet DV, Quyet PQ, Phuoc NH. The model of the tertiary basement rock beneath the interior of Mekong Delta Using gravity data. Final Report, Salamander Energy Vietnam 2008; HCM City;45.

Interpretation for magnetic data at low latitude areas using continuous wavelet transform and marquardt algorithm

Duong Quoc Chanh Tin^{1,*}, Duong Hieu Dau², Pham Ngoc Ngan², Nguyen Thanh Hai¹, Danh An¹



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

As analyzing geomagnetic data at low latitude areas for instance the Mekong Delta (latitudes $\leq 11,07^\circ$), significant problem is that both of the magnetization and ambient field are not vertical totally, making magnetic anomalies antisymmetrical and often skewed to the location of the sources. In this paper, two-dimensional continuous wavelet transform (2-D CWT), using Farshad-Sailhac complex wavelet function is studied and applied for reducing the magnetic anomaly to a symmetrical one - this located on the source of the anomaly, and then determining the position of the center of the object causing anomalies by wavelet transform modulus maxima (WTMM) method. Next, magnetic data is extracted in two perpendicular directions passing through the center of the source to perform one-dimensional continuous wavelet transform (1-D CWT) to estimate the shape, depth and size of the source. Then, using the Marquardt algorithm to solve the inverse problem by least-squares method to further identify other characteristic parameters of the source such as: vertical size, remanent magnetization vector. The reliability of the proposed method is verified through theoretical models before application for analyzing the geomagnetic data in the Mekong Delta. The results are consistency with deep hole data, having small root mean square error, contribute to a better interpretation of the geological nature of the magnetic anomaly sources in the study area.

Key words: low latitude, Marquardt algorithm, remanent magnetization vector, vertical size, 2-D CWT

¹School of Education, Can Tho University.

²College of Science, Can Tho University.

Correspondence

Duong Quoc Chanh Tin, School of Education, Can Tho University.

Email: dqctin@ctu.edu.vn

History

- Received: 21-09-2020
- Accepted: 25-3-2021
- Published: 03-5-2021

DOI : 10.32508/stdjns.v5i2.957



Copyright

© VNU-HCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Tin D Q C, Dau D H, Ngan P N, Hai N T, An D. Interpretation for magnetic data at low latitude areas using continuous wavelet transform and marquardt algorithm. *Sci. Tech. Dev. J. - Nat. Sci.*; 5(2):1216-1230.