

## NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT NGHỊCH ĐẢO VẬN TỐC (TOMOGRAPHY) THEO THỜI GIAN TRUYỀN

Phạm Thế Hoàng Hà, Đoàn Huy Hiền, Tạ Quang Minh, Mai Thị Lụa, Nguyễn Hoàng Anh

Viện Dầu khí Việt Nam

Email: hapth@vpi.pvn.vn

<https://doi.org/10.47800/PVJ.2021.10-01>

### Tóm tắt

Mô hình vận tốc là thông tin thiết yếu trong xử lý tín hiệu địa chấn, đóng vai trò quan trọng trong quá trình dịch chuyển địa chấn cũng như chuyển đổi giữa miền thời gian và miền độ sâu. Trong số các kỹ thuật được sử dụng để xây dựng mô hình vận tốc, nghịch đảo vận tốc (tomography) là kỹ thuật phổ biến và hiệu quả. Tomography là phiên bản nâng cấp của phân tích vận tốc thủ công, được xây dựng dựa trên phương pháp dò tia (ray tracing) và phương pháp tối ưu hóa gradient liên hợp (conjugate gradient). Mô hình vận tốc xây dựng bằng kỹ thuật tomography (mô hình vận tốc tomography) được sử dụng như mô hình ban đầu chất lượng cao cho các module dựng ảnh địa chấn phức tạp hơn như dịch chuyển thời gian ngược (reverse-time migration) hoặc nghịch đảo toàn dạng sóng (full waveform inversion). Nhóm tác giả phát triển module tomography theo thời gian truyền (travel-time reflection tomography - SeisT) để nghiên cứu độ chính xác của kỹ thuật và nâng cao năng lực công nghệ trong xử lý địa chấn. Hiệu quả và độ chính xác của module trong quá trình xử lý và vận hành được kiểm tra đánh giá trên dữ liệu mô hình và dữ liệu thực địa.

**Từ khóa:** Xử lý tín hiệu địa chấn, phản xạ địa chấn, dò tia, mô hình hóa vận tốc, địa chấn tomography, tomography.

### 1. Giới thiệu

Mô hình vận tốc là kết quả quan trọng được trích xuất từ tài liệu địa chấn phản xạ, có thể được sử dụng cho các mục đích khác nhau như: dựng ảnh trên miền độ sâu, chuyển đổi giữa miền độ sâu và miền thời gian hay xây dựng mô hình địa - cơ. Độ phân giải của mô hình vận tốc phụ thuộc nhiều vào độ phức tạp của phương pháp ước tính cũng như độ phân giải của mô hình vận tốc ban đầu và dữ liệu địa chấn. Ví dụ, phân tích vận tốc thủ công (velocity analysis) là phương pháp đơn giản và nhanh nhất để xây dựng mô hình vận tốc. Tuy nhiên, độ phân giải của phương pháp này không cao theo cả trục không gian và trục thời gian vì khoảng cách giữa 2 CDP (common depth point) liên tiếp được phân tích vận tốc lớn hơn nhiều so với khoảng cách thực tế của 2 CDP cạnh nhau trong lưới tài liệu. Tương tự, trong phổ phân tích vận tốc tại mỗi CDP, khoảng thời gian giữa 2 điểm được bắt vận tốc cao hơn nhiều so với tỷ lệ lấy mẫu trên miền thời gian. Ở chiều ngược lại, phương pháp nghịch đảo toàn dạng sóng cho phép tạo ra mô hình vận tốc có độ phân giải cao

và chính xác. Tuy nhiên, phương pháp này lại yêu cầu tài nguyên và chi phí tính toán cao nên không được sử dụng rộng rãi trong xử lý địa chấn phản xạ. Để cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán, tomography theo thời gian truyền (SeisT) được xem là phương pháp phù hợp để xây dựng mô hình vận tốc cho mục đích dịch chuyển hay được sử dụng làm mô hình ban đầu cho các bài toán nghịch đảo toàn dạng sóng.

Tomography là quá trình nghịch đảo, cung cấp công cụ để ước tính vận tốc từ dữ liệu phản xạ địa chấn đa kênh. Tomography có thể được thực hiện trong các miền trước hoặc sau khi dịch chuyển. Trong mỗi miền này, có thể chia các thông tin của dữ liệu thành 2 dạng: động học (thời gian truyền) và động lực học (biên độ, pha) [1]. Do đó, có ít nhất 4 cách giải quyết bài toán về tomography. Bảng 1 tóm tắt các phương pháp được sử dụng để ước tính vận tốc.

Nghiên cứu này tập trung vào phương pháp tomography theo thời gian truyền dựa trên tia, áp dụng để xây dựng các mô hình vận tốc nhân tạo cũng như thực địa. Quy trình thực hiện được thể hiện trong Hình 1. Nhóm nghiên cứu lựa chọn phương pháp này để ước tính vận tốc do các nguyên nhân sau:



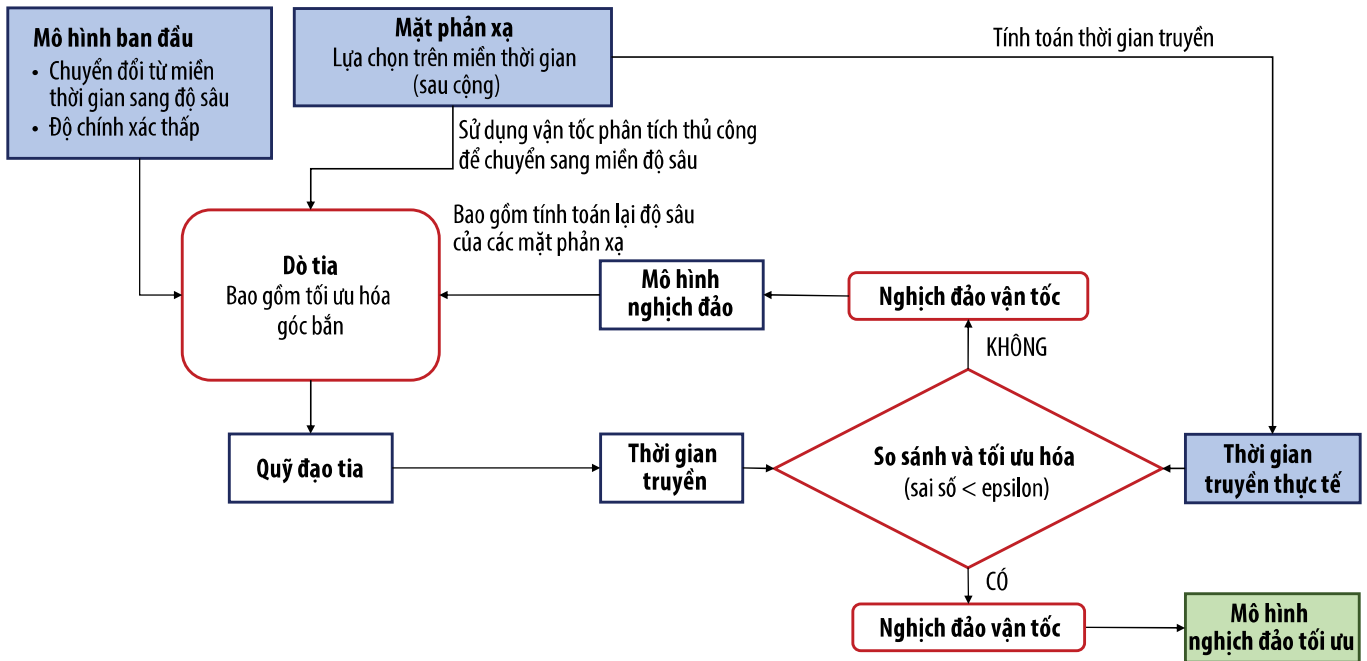
Ngày nhận bài: 7/12/2021. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 7 - 20/12/2021.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/12/2021.



**Bảng 1.** Các loại và các miền của phương pháp tomography để ước tính vận tốc

	Miền trước dịch chuyển	Miền sau dịch chuyển
Dựa trên tia (động học)	Tomography theo thời gian truyền Tomography truyền qua giếng Tomography sóng khúc xạ	Tomography trước cộng trên miền thời gian Tomography trước cộng trên miền độ sâu
Dựa trên dạng sóng (động lực học)	Nghịch đảo toàn dạng sóng (còn được gọi là tomography dạng sóng, tomography phương trình sóng hay tomography tán xạ)	Phân tích vận tốc dịch chuyển theo phương trình sóng (WEM-VA) Tomography đường sóng



**Hình 1.** Quy trình thực hiện nghịch tomography theo thời gian truyền dựa trên tia.

Trong miền sau dịch chuyển, dữ liệu đã được dịch chuyển bằng tài liệu vận tốc chưa được tối ưu hóa, do đó, miền trước dịch chuyển có nhiều thông tin vật lý hơn miền sau dịch chuyển.

Mặc dù tomography dựa trên dạng sóng có thể tạo ra mô hình vận tốc rất chi tiết và chính xác, phương pháp này yêu cầu tài nguyên và chi phí tính toán lớn. Trong khi đó, phương pháp tomography dựa trên tia tạo ra mô hình vận tốc có độ phân giải thấp hơn nhưng vẫn có chất lượng đủ tốt nếu được thực hiện cẩn thận [2].

## 2. Cơ sở lý thuyết

Giống như các phương pháp nghịch đảo địa vật lý khác, tomography theo thời gian truyền dựa trên tia gồm 2 bước cơ bản:

- Xác định các đường phản xạ và ước tính thời gian truyền ứng với các cặp thu nổ nằm ở vị trí khác nhau dựa trên nghiệm của phương trình eikonal.
- Tối ưu mô hình vận tốc bằng cách cực tiểu hóa sai số giữa thời gian truyền tính toán được và thời gian truyền

thực tế cho mỗi cặp thu nổ, với mỗi đường phản xạ được xác định. Ở bước này, phương pháp gradient liên hợp được sử dụng.

### 2.1. Phương trình dò tia và nghiệm số

Phương pháp ray-tracing được thực hiện bằng thuật toán Runge-Kutta trong miền độ sâu, do đó, các tham số đầu vào của phương pháp này, bao gồm mô hình vận tốc và các đường phản xạ, phải được chuyển đổi từ miền thời gian sang miền độ sâu.

Phương pháp ray-tracing được sử dụng để tính toán đường đi của tia sóng truyền trong môi trường có vận tốc, đặc tính hấp thụ và phản xạ của các bề mặt thay đổi. Bởi những tính chất kể trên của môi trường, đường đi của tia có thể bị uốn cong, thay đổi hướng hoặc phản xạ tại các mặt phân cách.

Quý đạo của tia được tính toán bằng cách giải một phương trình vi phân có nguồn gốc từ phương trình sóng [3]:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{v^2(\vec{x})} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

Giả sử phương trình (1) có một nghiệm ở dạng:

$$\psi(\vec{x}, t) = A(\vec{x})e^{2\pi i f(t-T(\vec{x}))} \quad (2)$$

Trong đó  $A(\vec{x})$  và  $T(\vec{x})$  là các hàm chưa biết mô tả biên độ và thời gian truyền thay đổi theo vị trí.

Thay phương trình (2) vào phương trình (1), giả định trường vận tốc thay đổi chậm trong không gian (gradient vận tốc nhỏ), cũng như các tần số cao không phụ thuộc vào gradient vận tốc, có các kết quả sau:

$$\frac{A}{2} \nabla^2 T + \vec{\nabla} A \cdot \vec{\nabla} T = 0 \quad (3)$$

$$[\vec{\nabla} T]^2 - \frac{1}{v(\vec{x})^2} = 0 \quad (4)$$

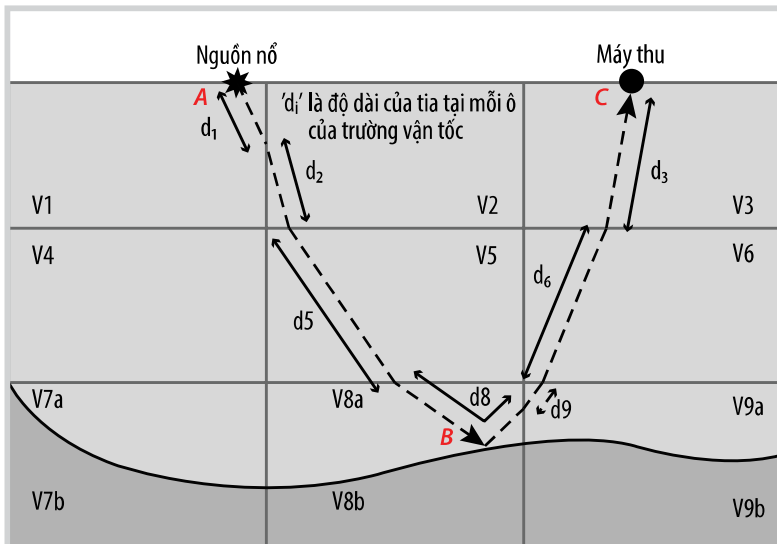
Phương trình (3) được gọi là phương trình truyền hình học vì nghiệm mô tả dòng năng lượng dọc theo đường truyền của tia.

Phương trình (4) là phương trình đạo hàm riêng, phi tuyến có tên là phương trình eikonal. Đối với trường hợp tần số cao hoặc trường vận tốc thay đổi chậm như giả định, nghiệm của phương trình eikonal chỉ ra thời gian truyền chính xác qua các môi trường phức tạp [3]. Phương trình eikonal có thể được biến đổi thành hệ phương trình vi phân thường bậc nhất (ordinary differential equations), có thể giải được bằng các phương pháp số chuẩn:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}}{dt} &= v^2(\vec{x})\vec{p} \\ \frac{d\vec{p}}{dt} &= -\frac{\vec{\nabla} v(\vec{x})}{v(\vec{x})} \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó,  $\vec{p}$  là vector slowness, thể hiện hướng và độ lớn vận tốc của tia tại điểm tham chiếu;  $dt$  là bước thời gian mà đường đi của tia được tính toán.

Trong nghiên cứu này, hệ phương trình vi phân trên được giải bằng phương pháp Runge-Kutta [4].



Hình 2. Dò tia trong trường vận tốc.

Bước thời gian  $dt$  phải được chọn phù hợp. Nếu  $dt$  quá lớn, các tần số cao sẽ bị bỏ qua, dẫn tới đường đi của tia sóng được tính toán không chính xác, đặc biệt tại những khu vực có địa chất phức tạp. Nếu  $dt$  quá nhỏ, số bước dò tìm để một tia từ điểm nổ tới điểm thu sẽ rất lớn, dẫn đến thời gian tính toán lớn.

Mô hình vận tốc được rời rạc hóa thành các ô lưới để thuận tiện cho việc tính toán. Trong lưới vận tốc này, quỹ đạo của tia được tính toán lại sau mỗi khoảng thời gian cố định  $dt$  (Hình 2). Cuối mỗi bước, vị trí hiện tại của tia được cập nhật, các tham số trên lưới vận tốc gần nhất với vị trí này được sử dụng để xác định vị trí tiếp theo của tia. Ngoài ra, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phép nội suy tuyến tính để đảm bảo đường đi của tia sóng được tính toán tại tất cả các điểm thuộc lưới vận tốc mà tia đi qua.

Trong quá trình mô phỏng thu nổ địa chấn, sóng bắt đầu từ một điểm nổ (nguồn) trên hoặc gần bề mặt, lan truyền trong các lớp đất đá, trải qua các quá trình phản xạ và khúc xạ, đi đến bộ thu, cũng nằm trên hoặc gần bề mặt. Quá trình phức tạp này có thể được mô tả trên mô hình vận tốc, như đã đề cập ở trên, bằng cách sử dụng phương pháp ray-tracing Runge-Kutta. Hình 2 mô tả đơn giản quá trình thu nổ của 1 tia sóng đi từ nguồn nổ, lan truyền xuống lòng đất, sau đó phản xạ tại 1 đường phản xạ và quay ngược lại bộ thu.

Một đặc điểm quan trọng của tomography là tia sẽ bị phản xạ trên đường phản xạ đã chọn trước khi quay lại bộ thu. Cách xác định vector slowness của tia phản xạ tại đường phản xạ được trình bày trong Hình 3, trong đó  $\vec{p}_1$  và  $\vec{p}_2$  lần lượt là vector slowness của tia tới và tia phản xạ. Trong hệ tọa độ Ogh, tại điểm phản xạ, thành phần tiếp tuyến của vector slowness không thay đổi, trong khi thành phần pháp tuyến thì thay đổi về dấu. Do đó, vector slowness của tia phản xạ được tính toán thông qua vector slowness của tia tới như sau:

$$\begin{aligned} pg_2 &= pg_1 \\ ph_2 &= -ph_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Trong đó  $pg_{1,2}$  và  $ph_{1,2}$  lần lượt là các thành phần của vector slowness của tia tới và tia phản xạ trong hệ tọa độ Ogh.



Ngoài ra, tia phản xạ được thể hiện trong Hình 2 có thể truyền đi theo nhiều cách khác và thậm chí có thể bị bẻ cong trước khi gặp đường phản xạ như trong Hình 8 (turning ray). Điều này là do có sự phản xạ toàn phần tại các mặt phân cách nông hơn (góc tới lớn hơn góc tới hạn). Mặc dù các tia đạt góc tới hạn này cũng rất hữu ích cho việc phân tích tomography gần bề mặt (như xây dựng mô hình vận tốc để khảo sát địa chấn trên đất liền), đây không phải là mục tiêu của nghiên cứu này.

Một vấn đề quan trọng trong việc ray-tracing là đối với cặp thu nổ cụ thể, phương pháp xác định góc bắn của tia từ nguồn nổ để có thể đến được vị trí của máy thu dự kiến. Nếu bắn tia theo một góc tùy ý, chắc chắn sẽ không đến được máy thu mục tiêu. Để tìm góc bắn phù hợp, phương pháp đơn giản nhất để tính góc bắn là sử dụng phép tính hình học cơ bản như trong Hình 4. Cho vị trí của S và R (nguồn nổ và máy thu), góc dip  $\beta$  của đường phản xạ (gần CDP), khi đó góc bắn  $\alpha$  có thể được tính bằng công thức:

$$\alpha = \gamma - \beta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{2h}\right) - \beta \quad (7)$$

Trong đó:

d: Khoảng cách giữa nguồn nổ và máy thu (offset);

h: Độ sâu của hình chiếu của điểm giữa lên đường phản xạ.

Trong thực tế, trong môi trường có vận tốc biến đổi liên tục, phương pháp hình học này dĩ nhiên không cho ra giá trị góc bắn chính xác, tuy nhiên, được sử dụng như giá trị dự đoán ban đầu để thực hiện các tính toán tối ưu hóa góc bắn. Một số thuật toán tối ưu được thử nghiệm và sử dụng trong nghiên cứu này như: phương pháp chia đôi (bisection), phương pháp Gauss-Newton và phương pháp đường dốc nhất (steepest descent) [4]. Nhóm nghiên cứu nhận thấy rằng thuật toán độ dốc nhất thường đưa ra các ước tính góc tốt nhất với số lần lặp có thể chấp nhận được. Trong trường hợp phương pháp độ dốc nhất không hoạt động do sự xuất hiện của các cực tiểu cục bộ (local minimum), phương pháp

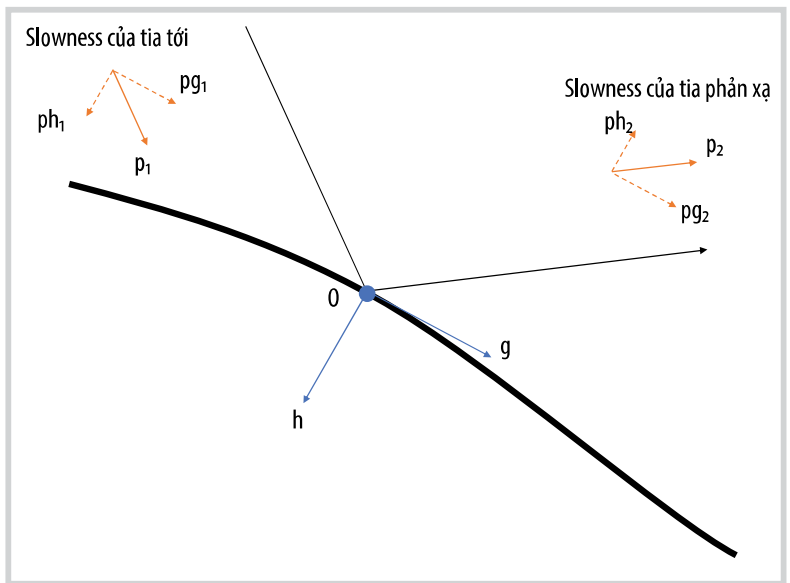
chia đôi sẽ được sử dụng để ước tính góc bắn sao cho tia đến gần máy thu nhất.

Đối với các máy thu nằm ở xa nguồn nổ, có thể sử dụng phương pháp hồi quy bình phương tối thiểu (least squares regression) [4] để tính toán góc bắn ban đầu từ những góc bắn đã được tối ưu của những máy thu gần nguồn nổ. Khi đó, số lần lặp trong phương pháp độ dốc nhất sẽ giảm đi đáng kể so với việc ước lượng góc ban đầu bằng phương pháp hình học. Bảng 2 chỉ ra số lượng lần lặp để tính toán được góc bắn tối ưu khi sử dụng các phương pháp ước lượng góc ban đầu khác nhau.

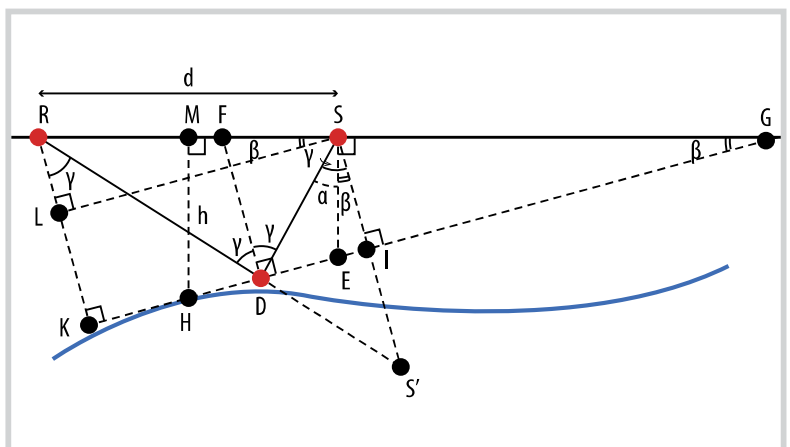
Trong quá trình thử nghiệm và tính toán, để cải thiện tốc độ hội tụ và độ chính xác của quá trình tối ưu hóa, 1 bộ lọc làm mịn sẽ cần được áp dụng cho mô hình vận tốc và tất cả các đường phản xạ.

### 2.2. Bài toán nghịch đảo

Nếu mô hình vận tốc sai lệch nhiều so với mô hình thực, sai số giữa thời gian truyền của tia được tính bằng phương pháp dò tia với



Hình 3. Tính toán lại vector slowness tại điểm phản xạ trên horizon.



Hình 4. Phương pháp hình học dùng để xác định góc bắn.

Bảng 2. Số vòng lặp để ước tính góc bắn với sai số ± 3 m quanh vị trí của máy thu

		Vị trí của nguồn nổ (m)					Phương pháp để ước tính giá trị ban đầu cho tối ưu hóa độ dốc nhất
		0	1.000	2.000	3.000	4.000	
Offset (m)	125	4	2	4	3	2	Phương pháp hình học
	137,5	2	3	3	2	2	
	150	0	1	2	1	0	
	162,5	0	1	1	1	0	Hồi quy bình phương tối thiểu
	175	0	0	0	1	1	
	187,5	0	1	2	1	1	
	200	0	1	1	0	1	
	212,5	0	1	1	1	1	
	225	0	1	1	1	0	
	237,5	1	1	1	1	1	

giá trị thực sẽ lớn. Vì vậy, cần cực tiểu hóa sai số bằng cách sử dụng các phương pháp tối ưu hóa. Bằng cách này, mô hình vận tốc ước lượng sẽ dần tiến về mô hình thực.

Xét mô hình vận tốc được mô tả trong Hình 2. Mô hình này được chia thành 9 ô vận tốc với giá trị vận tốc của mỗi ô là 1 hằng số. Tia phát ra từ nguồn nổ A, phản xạ trên horizon tại B và được thu tại C. Thời gian truyền  $T_{ABC}$  theo đường ABC được xác định bằng phương trình (7) là:

$$T_{ABC} = \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} + \frac{d_5}{v_5} + \frac{d_8}{v_{8a}} + \frac{d_9}{v_{9a}} + \frac{d_6}{v_6} + \frac{d_3}{v_3} \quad (8)$$

Dựa trên đường đi của các tia khác nhau trong môi trường, thu được hệ các phương trình (với thời gian truyền T đã biết và ẩn số là phần tử  $v_i$  của trường vận tốc). Việc giải hệ các phương trình này (được gọi là tomography) sẽ giúp xác định được giá trị vận tốc tại các ô dọc theo đường đi của tia.

Có nhiều phép đo thời gian truyền cho cặp thu nổ đối với một đường phản xạ xác định. Xét bộ 4 tia truyền trong môi trường như trong Hình 5, thời gian truyền tương ứng được thể hiện trong Hình 6. Thời gian truyền của 4 tia này có thể được biểu diễn bởi phương trình:

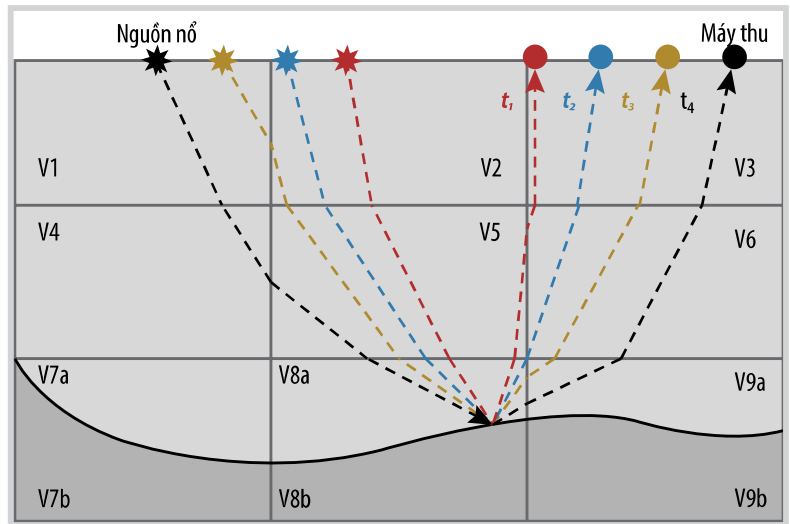
$$t_i = \sum_{j=1}^N \frac{d_{ij}}{v_j} = \sum_{j=1}^N d_{ij} s_j \quad (9)$$

Hay biểu diễn trong ma trận:

$$T = DS \quad (10)$$

Trong đó:

$t_i$ : Thời gian truyền của tia thứ i;



Hình 5. Mô hình vận tốc đơn giản gồm 9 ô ( $j = 1, 9$ ) [1].

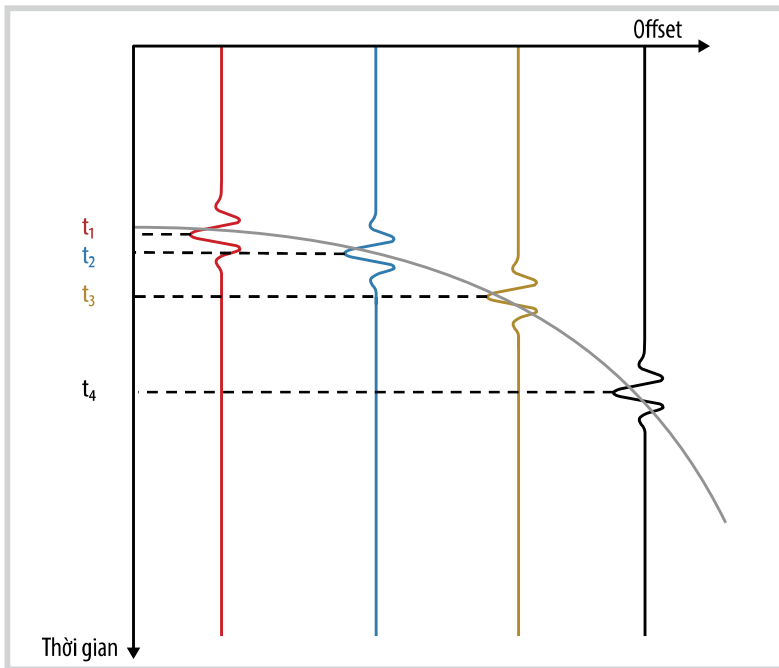
$d_{ij}$ : Quãng đường di chuyển của tia thứ i trong ô thứ j;

$v_j$ : Vận tốc của ô thứ j;

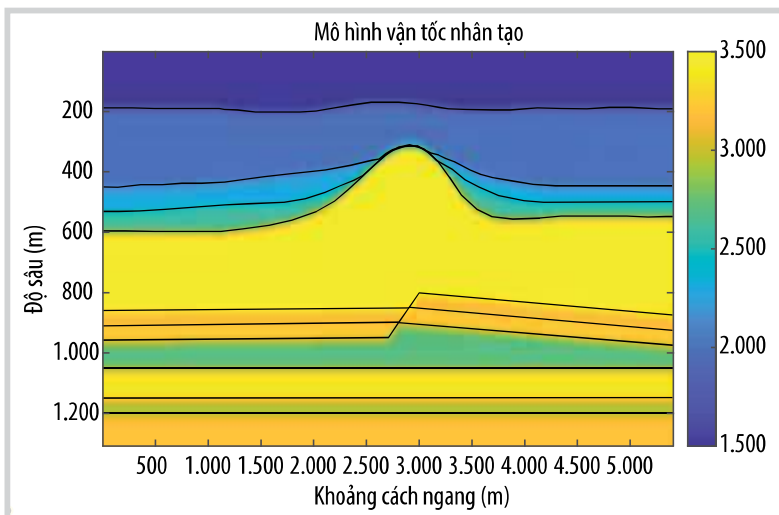
$s_j$ : Slowness trong ô thứ j, có N ô trong mô hình (trong trường hợp này,  $N = 9$ ).

Trong phương trình (10), T là vector của thời gian truyền 2 chiều đối với sóng âm phát ra từ 1 nguồn, truyền trong lòng đất, phản xạ trên mặt phân cách, sau đó quay trở lại máy thu. D là ma trận quãng đường di chuyển của tia trong mỗi ô của mô hình vận tốc (Hình 2) [1]. Ma trận D được xác định trong bước 1 bằng kỹ thuật dò tia. S là vector của mô hình vận tốc và được ước tính bằng phương pháp số.

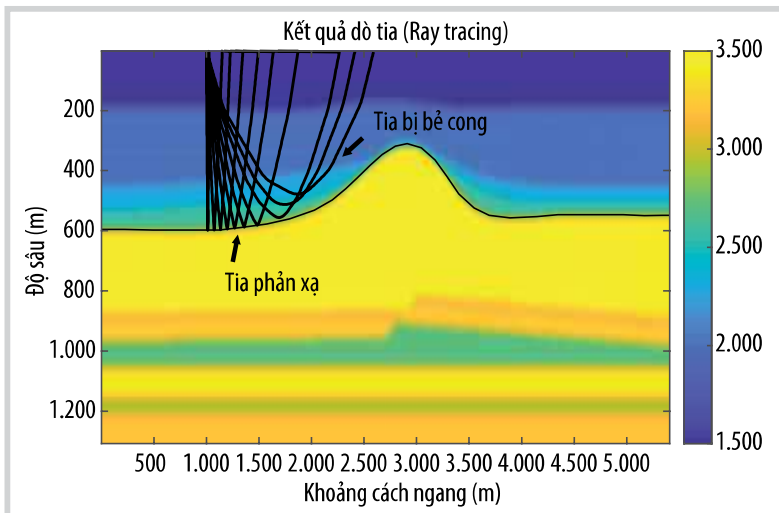
Thông thường, phương pháp bình phương tối thiểu được áp dụng để tính S trong phương trình (10). Tuy nhiên, phương pháp gradient liên hợp (conjugate gradient - CG) cho thấy độ hiệu quả cao hơn do khả năng tính toán nhanh hơn. CG là phương pháp lặp phổ biến nhất để giải các hệ phương trình tuyến tính lớn như hệ phương trình (9) vì CG có độ phức tạp theo thời gian là  $O(m\sqrt{k})$ , trong khi phương pháp độ dốc nhất (steepest decent) có độ phức tạp theo thời gian là  $O(mk)$ ; cả 2 thuật toán đều có độ phức tạp theo không gian là



Hình 6. Tập hợp CDP mô phỏng cho 1 mặt phản xạ.



Hình 7. Mô hình vận tốc nhân tạo với các mặt phản xạ được chọn sẵn.



Hình 8. Dò tia dựa trên thuật toán Runge-Kutta với 1 mặt phản xạ.

O(m) (k là số điều kiện phổ của ma trận D và m là số giá trị khác 0 trong ma trận) [5]. Sau một số lần lặp CG, mô hình vận tốc thu được có giá trị gần với giá trị thực hơn nhiều so với các phương pháp khác.

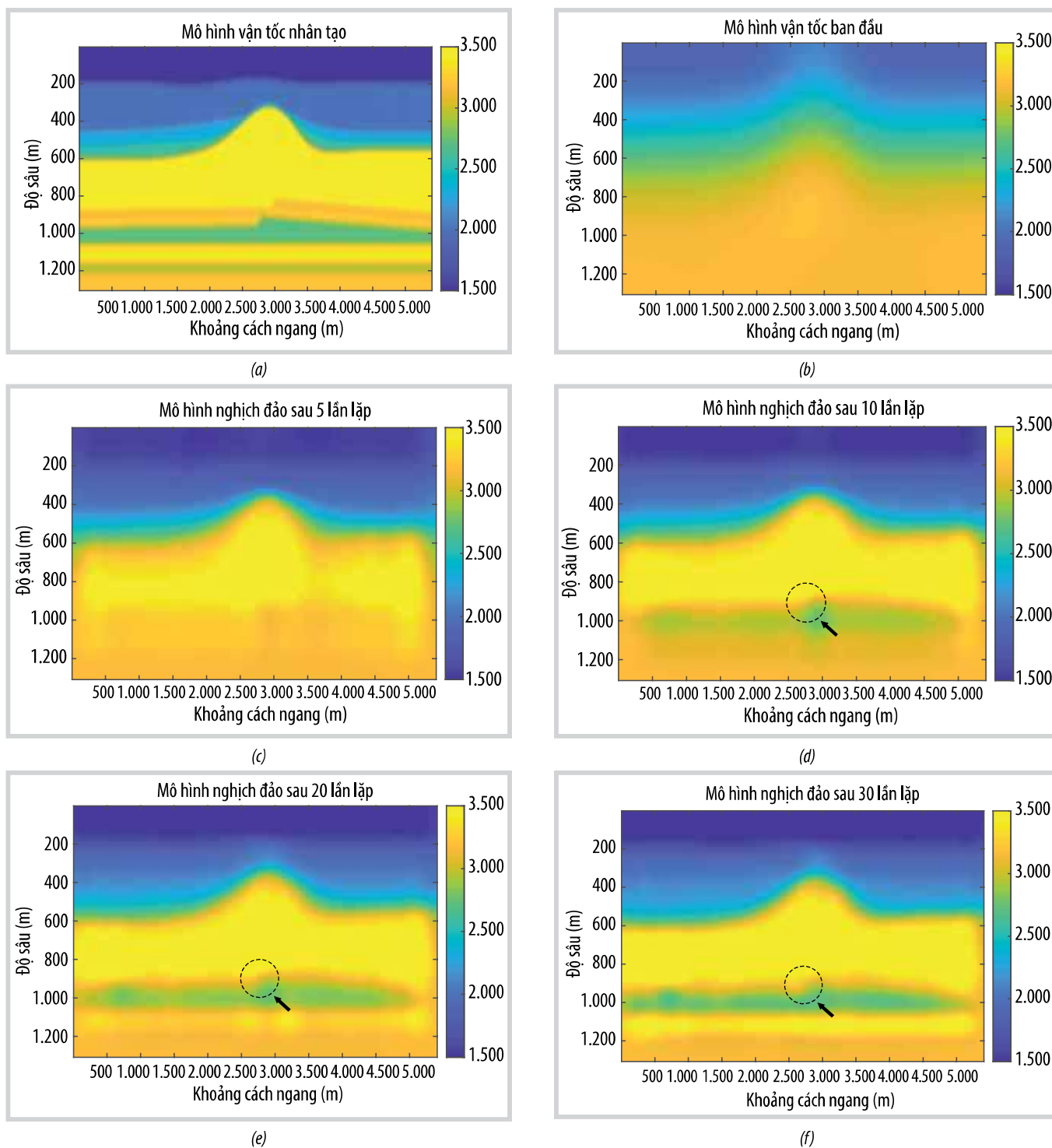
### 3. Ứng dụng trên mô hình nhân tạo

Mô hình vận tốc nhân tạo (Hình 7) được sử dụng để xác minh tính hiệu quả của phương pháp tomography theo thời gian truyền. Mô hình được xây dựng trong miền độ sâu, chứa 10 mặt phản xạ với 1 nếp gấp trong vùng vận tốc cao, ngoài ra còn chứa cấu trúc tương tự vết đứt gãy ở trị trí sâu hơn.

Quá trình tối ưu hóa được áp dụng trên mô hình vận tốc thực để ước tính góc bắn chính xác và thời gian truyền của tia cho từng cặp thu nổ, các giá trị này được sử dụng làm tham số đầu vào của quá trình lặp (đóng vai trò như dữ liệu tham chiếu).

Cấu hình thu nổ là 1 hệ chứa 207 nguồn nổ (khoảng cách giữa các nguồn nổ là 25 m) và 10 máy thu cho mỗi nguồn (khoảng cách giữa các máy thu là 12,5 m); tất cả được đặt trên mặt nước. Thời gian truyền của tất cả các cặp thu nổ trên mô hình thực được dùng làm dữ liệu tham chiếu trong quá trình phân tích tomography. Phương pháp gradient liên hợp được sử dụng để giải hệ các phương trình phi tuyến như đã đề cập trong phần 2.2. Mô hình vận tốc ban đầu là mô hình vận tốc đã được làm mượt (smooth) mạnh từ mô hình vận tốc gốc. Kết quả của quá trình tomography trên mô hình nhân tạo theo số lần lặp được thể hiện như trong Hình 9.

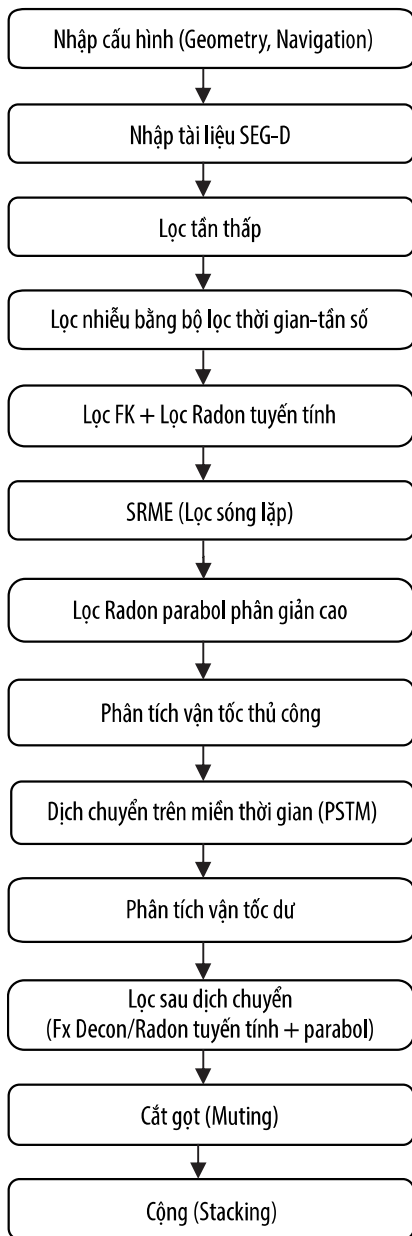
Thuật toán bắt đầu từ 1 mô hình được làm mịn rất mạnh (Hình 9b), không có bất kỳ đặc điểm địa chấn rõ ràng nào. Sau 30 bước lặp, thu được mô hình rất gần với mô hình thực (Hình 9f). Khu vực nông và phần vận tốc cao được xây dựng lại chỉ sau 5 lần lặp CG. Tăng số lần lặp CG, các lớp sâu hơn của mô hình vận tốc được nghịch đảo chính xác hơn. Trong Hình 9d, cấu trúc tương tự vết đứt gãy được hồi phục chỉ sau 10 lần lặp. Độ chính xác của thuật toán có thể được ước tính bằng độ lệch chuẩn (root-mean-square error - RMSE). RMSE



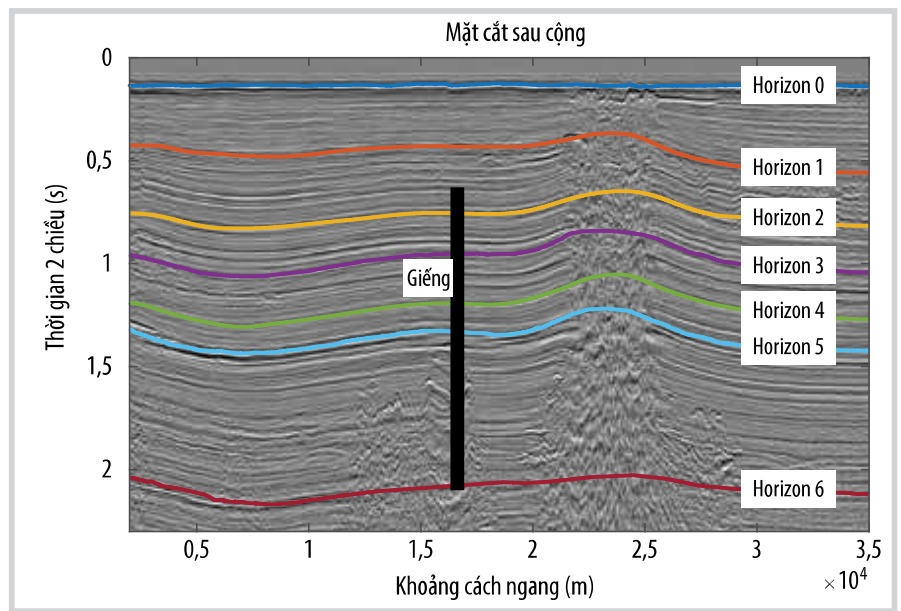
**Hình 9.** Kết quả của quá trình tomography. a) Mô hình vận tốc gốc; b) Mô hình ban đầu; c) Mô hình vận tốc sau 5 bước lặp tomography; d) Mô hình vận tốc sau 10 bước lặp nghịch đảo cắt lớp; e) Mô hình vận tốc sau 20 bước tomography; f) Mô hình vận tốc sau 30 bước lặp tomography.

**Bảng 3.** Độ lệch chuẩn của các mô hình vận tốc ước tính

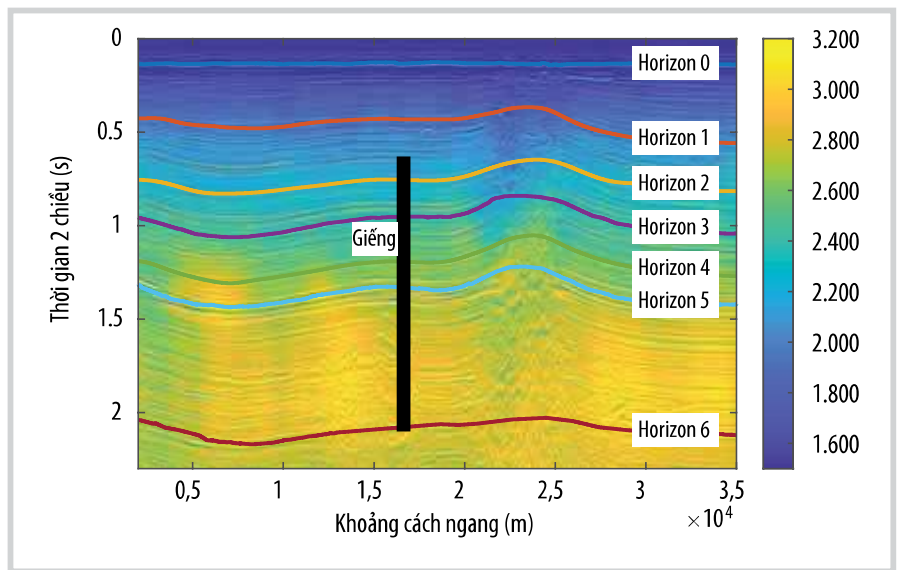
Model	RMSE (m/s)	Sai số tương đối trung bình của mô hình vận tốc (%)
Mô hình ban đầu	370,6	18,15
Mô hình sau 5 lần lặp CG	219,6	10,75
Mô hình sau 10 lần lặp CG	176,4	8,65
Mô hình sau 20 lần lặp CG	156,1	7,65
Mô hình sau 30 lần lặp CG	152,9	7,5



Hình 10. Các bước xử lý cơ bản.



Hình 11. Tuyến địa chấn với các mặt phản xạ và vị trí giếng được chọn.



Hình 12. Mô hình vận tốc tomography chống lên dữ liệu địa chấn.

càng nhỏ, sự chính xác của mô hình vận tốc ước tính so với mô hình vận tốc thực càng cao. Các giá trị RMSE được thể hiện như trong Bảng 3.

#### 4. Ứng dụng trên dữ liệu thực địa

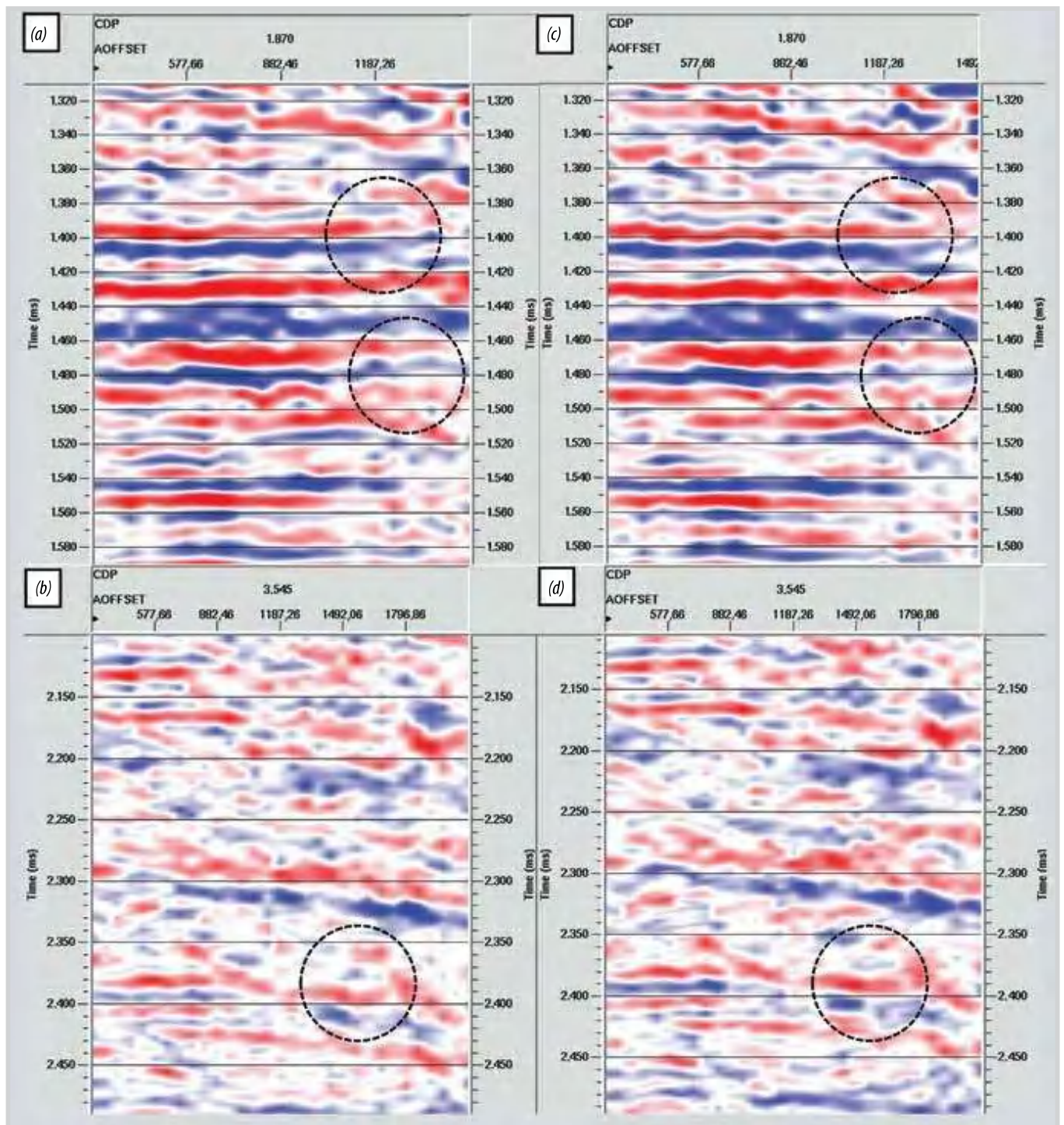
Thuật toán tomography được ứng dụng cho dữ liệu địa chấn 2D ngoài khơi Việt Nam. Dữ liệu được xử lý và minh giải bởi Viện Dầu khí Việt Nam (VPI). Các bước xử lý cơ bản được thể hiện trong Hình 10.

Điểm khác biệt lớn nhất của tài liệu thực địa (dữ liệu địa chấn, vận tốc RMS và các đường phản xạ được chọn) so với mô hình nhân tạo là tài liệu thực địa nằm trong miền thời gian. Do đó, khi ứng dụng phương pháp tomography theo thời gian truyền cho tài liệu thực địa, cần phải chuyển

đổi tài liệu đầu vào từ miền thời gian sang miền độ sâu ngay trong quá trình lặp, nghĩa là các mặt phản xạ không phải nằm ở độ sâu thực, mà là ở độ sâu tùy thuộc vào mô hình vận tốc hiện tại đang cập nhật. Bằng cách cực tiểu hóa sai số của thời gian truyền, nhóm nghiên cứu hy vọng độ sâu sẽ hội tụ đến giá trị thực tế. Do đó, bên cạnh các vòng lặp CG xây dựng mô hình vận tốc để thực hiện dò tia với các mặt phản xạ, sẽ có thêm 1 vòng lặp bên ngoài để cập nhật độ sâu của các mặt phản xạ sau mỗi lần mô hình vận tốc được cập nhật lại (Hình 1). Quá trình nghịch đảo diễn ra tương tự như trường hợp mô hình nhân tạo.

Hình 11 cho thấy dữ liệu địa chấn sau cộng với các đường phản xạ và vị trí giếng được chọn. Từ quá trình thử nghiệm tomography trên mô hình tổng hợp, nhóm





Hình 13. So sánh các tập hợp CDP sau PSTM với (a, b) vận tốc được phân tích thủ công và (c, d) vận tốc tomography.

nguyên cứu nhận thấy nếu chọn càng nhiều đường phân xạ thì kết quả thu được càng gần với giá trị thực. Tuy nhiên, sử dụng nhiều đường phân xạ hơn cũng đồng nghĩa với thời gian tính toán lớn hơn, đặc biệt đối với dữ liệu thực địa có số lượng các cặp thu nổ thường rất lớn. Trong ví dụ này, 7 mặt phân xạ được chọn, trong đó 5 mặt đi qua khu vực có dữ liệu đo đạc từ giếng.

Mô hình vận tốc được tính toán bằng tomography theo thời gian tuyến sẽ được biểu diễn chồng lên mặt

cắt địa chấn sau cộng, bằng cách đó, sự thay đổi vận tốc cũng như những dị thường có thể liên quan đến sự tích tụ hydrocarbon có thể được nhận biết như trong Hình 12. Trong tuyến địa chấn này, mô hình vận tốc địa chấn đã được nghịch đảo thành công bởi thuật toán nghịch đảo được phát triển, vận tốc xung quanh vị trí giếng, nơi khí được phát hiện, có xu hướng nhỏ hơn so với khu vực xung quanh.

Khác với mô hình nhân tạo, đối với dữ liệu thực địa, do



không có mô hình vận tốc chính xác tuyệt đối để so sánh các kết quả tomography, nhóm nghiên cứu phải thử các cách khác để kiểm tra tính chính xác của thuật toán. Có 2 phương pháp khác nhau để kiểm soát chất lượng trong nghiên cứu này. Một là sử dụng mô hình vận tốc ước tính làm đầu vào cho module dịch chuyển trên miền thời gian (PSTM); đầu ra được kỳ vọng sẽ chứa các sự kiện địa chấn được làm phẳng trong các tập hợp CDP (CDP gathers) (Hình 13). Phương pháp còn lại là so sánh mô hình vận tốc được nghịch đảo với dữ liệu giếng nằm gần khu vực nghiên cứu.

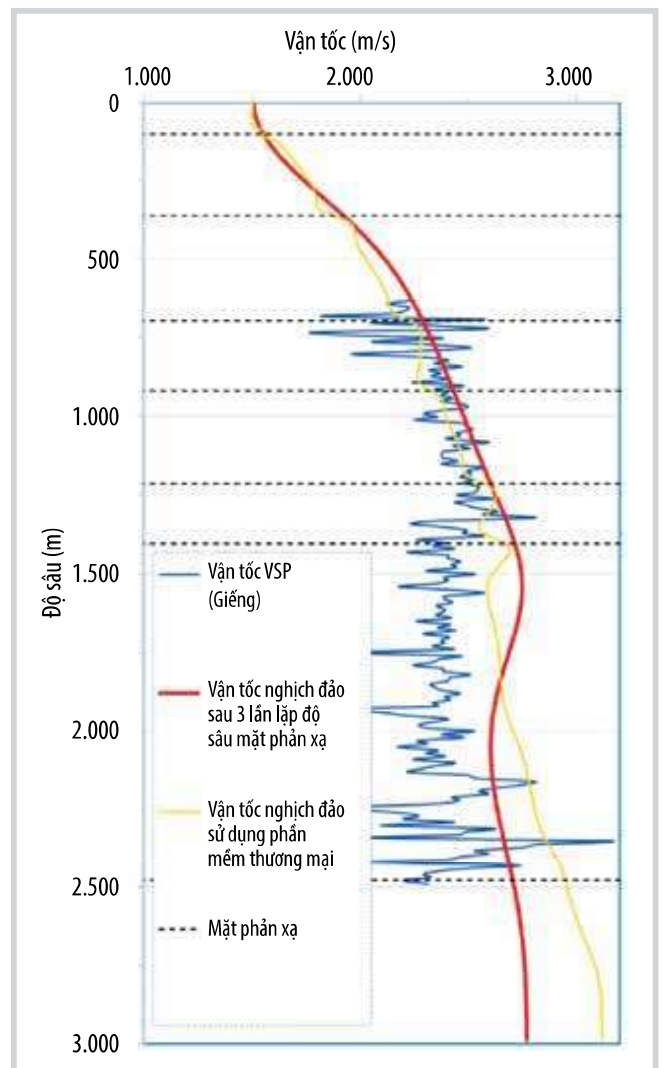
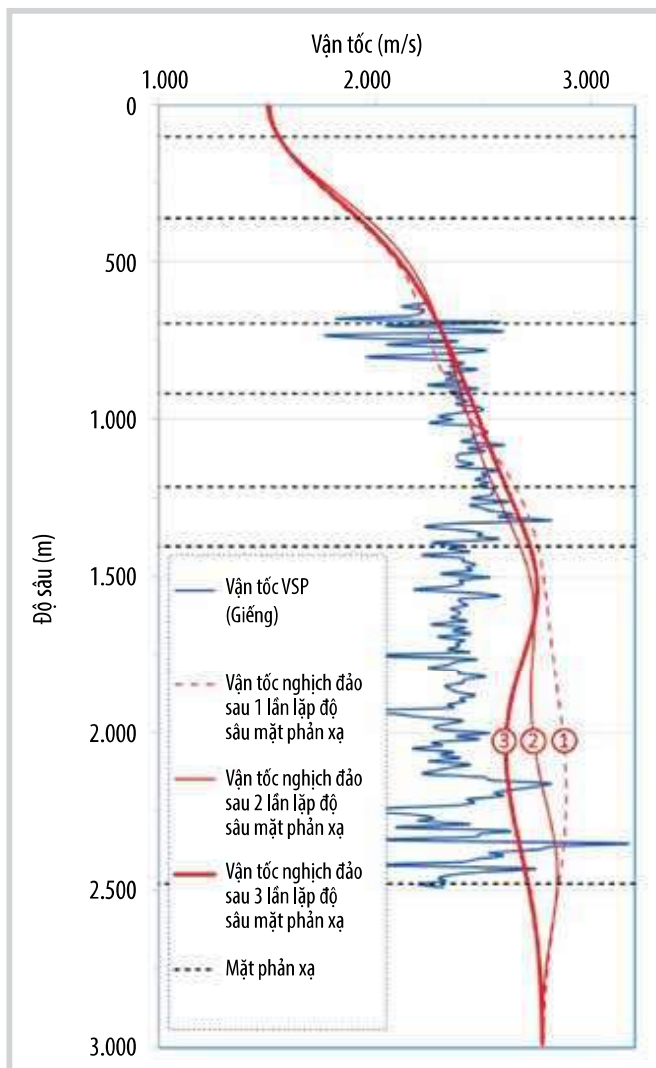
Sai số trung bình của mô hình vận tốc ước tính được sử dụng như phương pháp xác minh bổ sung. Với sai số được xác định là chênh lệch giữa thời gian truyền ước tính bằng phương pháp dò tia và thời gian truyền thực, sai số trung bình sau các lần lặp CG được tính toán và thể hiện trong Bảng 4.

Từ Bảng 4, có thể thấy rằng, khi tăng số vòng lặp CG, sai số trung bình của mô hình vận tốc ước tính giảm ngày càng chậm. Điều này có thể được giải thích là khi sai số trung bình càng gần khoảng thời gian lấy mẫu, quá trình tối ưu hóa sẽ càng khó cải thiện kết quả hơn.

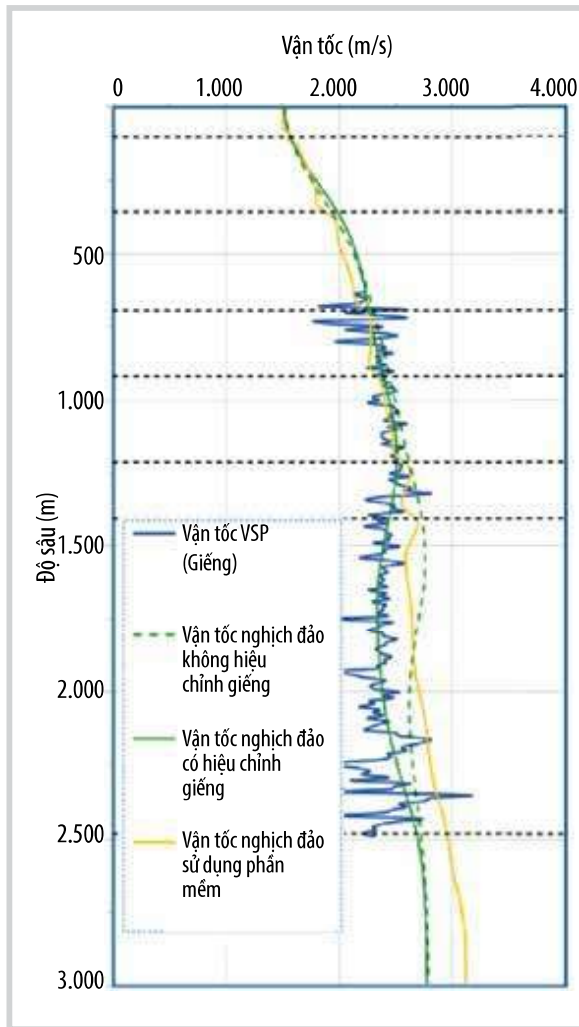
Vị trí của các mặt phản xạ trong miền độ sâu được tính toán bằng mô hình vận tốc ban đầu (phân tích thủ công). Điều này có nghĩa là nếu mô hình vận tốc được cập nhật lại bằng tomography, vị trí của các mặt phản xạ cũng cần được tính toán lại. Vì lý do đó, nhóm nghiên cứu đã thực

**Bảng 4.** Sai số trung bình của mô hình vận tốc

Mô hình	Sai số thời gian lan truyền trung bình (m/s)
Mô hình sau 10 lần lặp CG	3.664
Mô hình sau 20 lần lặp CG	3.147
Mô hình sau 30 lần lặp CG	3.093
Mô hình sau 50 lần lặp CG	3.033



**Hình 14.** So sánh vận tốc tomography với (a) vận tốc (VSP) từ dữ liệu giếng và (b) phần mềm thương mại.

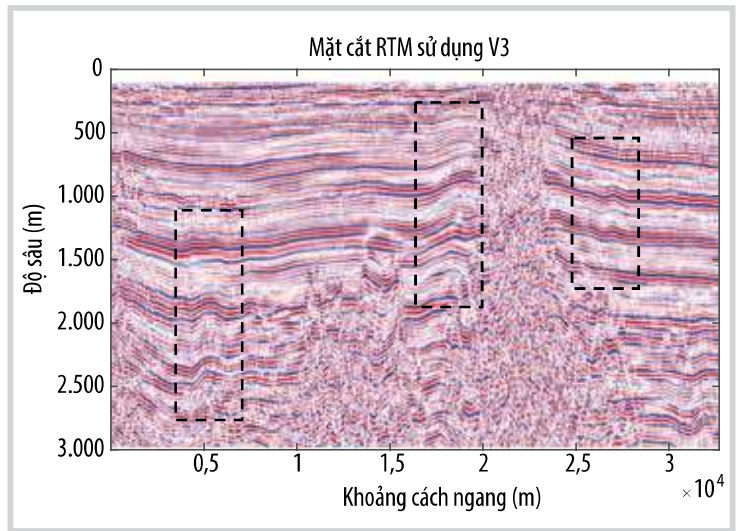


Hình 15. So sánh vận tốc tomography sử dụng hiệu chỉnh giếng với dữ liệu giếng.

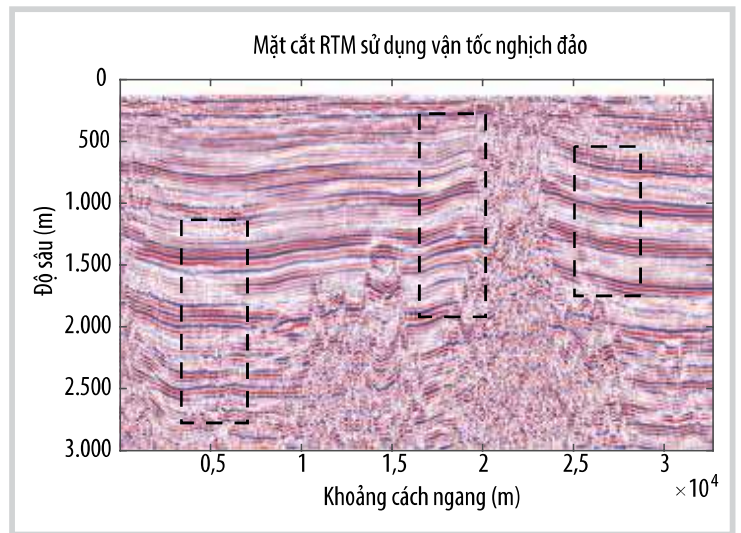
hiện các lần lặp tính toán lại độ sâu của các mặt phản xạ. Sự cải thiện của quy trình lặp lại này được thể hiện trong Hình 14a.

Có thể thực hiện kiểm tra độc lập kết quả tomography bằng cách so sánh với vận tốc VSP của giếng khoan gần khu vực nghiên cứu (Hình 14); vị trí giếng như trong Hình 11. Có thể thấy, vận tốc tomography cao hơn một chút so với vận tốc VSP của giếng, vì vậy kết quả khá tin cậy. Kết quả tomography bằng phần mềm thương mại cũng được thể hiện trong Hình 14b. Mô hình tính toán bằng phần mềm thương mại (dựa trên thuật toán grid-tomo) tốt hơn về tần số - trong tương lai sẽ được cải thiện. Tuy nhiên, thuật toán của nhóm nghiên cứu cho vận tốc ước tính gần với giá trị vận tốc VSP hơn trong vùng tốc độ chậm - bất thường (1.500 - 2.500 m).

Ngoài ra nhóm nghiên cứu cũng đánh giá ảnh hưởng của phương pháp "hiệu chuẩn giếng"



(a)



(b)

Hình 16. Ảnh dụng bằng module RTM sử dụng (a) vận tốc phân tích thủ công V3 và (b) vận tốc tomography.

(thường được sử dụng trong công nghiệp) đến kết quả của quá trình tomography. Cụ thể, mô hình vận tốc được sử dụng để chuyển đổi các mặt phản xạ từ miền thời gian sang miền độ sâu được hiệu chỉnh để đạt giá trị gần với vận tốc VSP của giếng (tại giếng, mô hình được khớp với dữ liệu giếng). Khi đó, kết quả vận tốc tomography có sự tương đồng tốt với thành phần tần số thấp (xu hướng) của vận tốc VSP (Hình 15).

### 5. Ứng dụng của kết quả tomography

Nhóm nghiên cứu đã sử dụng module dịch chuyển thời gian ngược (reverse time migration - RTM) để thực hiện dịch chuyển trên miền độ sâu (với hy vọng) có thể chứng minh sự cải thiện của mô hình vận tốc tomography so với mô hình vận tốc được phân tích thủ công. Các sự kiện địa chấn trong mặt cắt RTM sử dụng vận tốc tomography (Hình 16b) chứa ít dị thường hơn so với trong mặt cắt RTM sử dụng mô hình vận tốc được phân tích



thủ công (V3) (Hình 16a). Kết quả trong Hình 16b khá tương đồng với kết quả dịch chuyển Kirchoff (Hình 11).

Việc chọn mặt phản xạ có vai trò quan trọng tomography theo thời gian truyền dựa trên tia vì các mặt phản xạ được sử dụng như giá trị tham chiếu cho quá trình nghịch đảo. Các mặt phản xạ (sau khi được chuyển sang miền độ sâu) cũng được sử dụng cho quá trình dò tia để ước tính thời gian truyền đối với mỗi cặp thu nổ trên mô hình vận tốc đang được cập nhật. Sau đó, thời gian ước tính này sẽ được so sánh với thời gian tham chiếu để tối ưu hóa mô hình vận tốc. Do vậy, chất lượng của tomography theo thời gian truyền dựa trên tia phụ thuộc nhiều vào chất lượng của việc chọn mặt phản xạ (hiện được thực hiện thủ công). Để cải thiện chất lượng của mặt phản xạ, có thể sử dụng phần mềm thương mại như Kingdom, Landmark và Petrel... Phần mềm PaleoScan lựa chọn tốt hơn, vì có thể chọn đồng thời nhiều mặt phản xạ theo thứ tự thời gian [6]. Việc sử dụng các phần mềm tự động không chỉ cải thiện chất lượng mà còn tăng số lượng của các mặt phản xạ chỉ trong thời gian ngắn.

Trong trường hợp không thấy rõ các mặt phản xạ địa chấn, chẳng hạn như trong móng hoặc các cột muối/bùn, tomography theo thời gian truyền có thể gặp khó khăn. Khi đó, cần phải xem xét các cách tiếp cận khác, như tomography điểm tập trung (common focus point tomography) [7] hoặc tomography tán xạ [8].

Trong quá trình thực hiện thuật toán tomography, cần lưu ý rằng, hệ phương trình (9) chỉ có thể giải được (theo bình phương nhỏ nhất) nếu số phương trình lớn hơn số ẩn số. Số phương trình bằng số cặp thu nổ nhân với số mặt phản xạ; số ẩn số bằng với số ô trong lưới mô hình vận tốc. Nếu hệ phương trình không thỏa mãn điều kiện trên (thường xảy ra trường hợp này) thì cần áp dụng thêm các ràng buộc để giải hệ phương trình. Ràng buộc phổ biến là sử dụng bộ lọc làm mịn để tương quan hóa các điểm lân cận. Các kỹ thuật khác như ràng buộc bằng "dip/azimuth" hoặc "shaping regularization" [9] cũng có thể được áp dụng. Ngay cả khi có các ràng buộc, điều kiện nghiệm không duy nhất (non-uniqueness) vẫn có thể xảy ra và độ chính xác của mô hình vận tốc ban đầu là yếu tố ảnh hưởng lớn đến chất lượng của mô hình tối ưu hóa cuối cùng. Mô hình ban đầu càng gần với mô hình vận tốc thực thì tốc độ tính toán càng nhanh (thời gian hội tụ ít hơn). Đối với dữ liệu thực địa, nhóm nghiên cứu sử dụng mô hình vận tốc phân tích thủ công đã được làm mượt (V3) để làm mô hình ban đầu.

Nhìn chung, công nghệ tomography theo thời gian truyền của nhóm nghiên cứu VPI đã đạt được kết quả:

- Đối với dữ liệu mô hình, tomography đã khôi phục một số đặc điểm địa chấn như các đặc trưng phân lớp và đứt gãy;
- Trong dữ liệu thực địa, vận tốc nghịch đảo tạo ra các sự kiện phẳng hơn trên các tập hợp CDP so với vận tốc phân tích thủ công sau dịch chuyển trước cộng;
- Kết quả tomography cũng có thể được sử dụng làm mô hình vận tốc cho module RTM với những cải thiện về dị thường so với việc sử dụng mô hình vận tốc được phân tích thủ công.

Tuy nhiên, vẫn còn những sai lệch nhỏ so với dữ liệu giếng. Điều này có thể là hệ quả của quá trình làm mịn quá trường vận tốc, không đủ số lượng mặt phản xạ và/hoặc thiếu mô phỏng các hiện tượng vật lý khác (dị hướng, hiệu ứng Q...), điều này có thể được khắc phục bằng phương pháp hiệu chuẩn giếng.

## 6. Kết luận

Trong nghiên cứu này, công nghệ tomography theo thời gian truyền thực hiện tại VPI được thể hiện thông qua các kết quả ứng dụng trên mô hình nhân tạo và tài liệu thực địa. Các vấn đề mà nhóm nghiên cứu gặp phải trong quá trình nghiên cứu, phát triển phương pháp tomography theo thời gian truyền dựa trên tia đã được thảo luận. Chất lượng của kết quả tomography phụ thuộc vào nhiều yếu tố, đặc biệt là độ chính xác của mô hình vận tốc ban đầu và chất lượng của việc lựa chọn mặt phản xạ. Phương pháp này có thể tối ưu hơn nữa bằng cách áp dụng các kỹ thuật khác (làm mịn) và/hoặc mô hình hóa những hiện tượng vật lý phức tạp hơn (như mô hình hóa hiệu ứng Q và/hoặc hiệu ứng dị hướng).

Tại thời điểm này, nhóm nghiên cứu đã phát triển được phần mềm tomography cơ bản và chu trình tính toán kèm theo. Việc hoàn thành các phần công việc trên đã cho thấy một số chi tiết quan trọng về quá trình phát triển chu trình tomography, bao gồm:

- Thuật toán, module phần mềm và quy trình làm việc cần thiết để làm chủ các kỹ thuật cốt lõi (dò tia, tối ưu hóa, nghịch đảo) được sử dụng trong tomography;
- Việc thực hiện phương pháp tomography cho mô hình vận tốc đàn hồi tốt hơn so với phương pháp phân tích vận tốc thủ công.

Mô hình cơ bản sẽ cần phát triển thêm gồm các mô hình vật lý phức tạp hơn, chẳng hạn như mô hình hóa Q, tomography dị hướng. Các phiên bản nâng cao hơn của xây dựng mô hình vận tốc như tomography 3D hoặc

ngịch đảo toàn dạng sóng cũng nằm trong số các mục tiêu trong tương lai.

### Lời cảm ơn

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Viện Dầu khí Việt Nam (VPI) đã hỗ trợ phát triển công nghệ tomography theo thời gian truyền.

### Tài liệu tham khảo

[1] Ian F. Jones, *An introduction to: Velocity model building*. EAGE, 2010.

[2] R.G. Pratt, F. Gao, C. Zelt, and A. Levander, "A comparison of ray-based and waveform tomography-implications for migration", *64<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, 2002*. DOI: 0.3997/2214-4609-pdb.5.B023.

[3] Gary F. Margrave, "Ray tracing for inhomogeneous media", *Numerical Methods of Exploration Seismology with Algorithms in MATLAB*. The University of Calgary, 2003, pp. 105 - 112.

[4] Steven C. Chapra and Raymond P. Canale, *Numerical methods for engineers*. McGraw-Hill Education, 2015.

[5] Jonathan Richard Shewchuk, "An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain". School of Computer Science Carnegie Mellon University, 1994.

[6] Eliis, "PaleoScan software". [Online]. Available: <https://www.eliis-geo.com/paleoscan-overview-a.html>.

[7] B.E.Cox and D.J.Verschuur, "Tomographic inversion of focusing operators", *63<sup>rd</sup> EAGE Conference & Exhibition, Netherlands, 11 - 15 June 2001*. DOI:10.3997/2214-4609-pdb.15.M-35.

[8] Mahasweta Mahapatra and Samiran Mahapatra, "Seismic diffraction tomography technique using very fast simulated annealing", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 67, No. 2, pp. 125 - 129, 2009. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2008.10.004.

[9] Sergey Fomel, "Shaping regularization in geophysical estimation problems", *Geophysics*, Vol. 72, No. 2, 2007. DOI: 10.1190/1.2433716.

## SOME RESULTS OF SEISMIC TRAVEL-TIME REFLECTION TOMOGRAPHY STUDY

**Pham The Hoang Ha, Doan Huy Hien, Ta Quang Minh, Mai Thi Lua, Nguyen Hoang Anh**

Vietnam Petroleum Institute

Email: haphth@vpi.pvn.vn

### Summary

Velocity model is essential for seismic data processing as it plays an important role in migration processes as well as time depth conversion. There are several techniques to reach that goal, among which tomographic inversion is an efficient one. As an upgrade version of handpicked velocity analysis, the tomography technique is based on the reflection ray tracing and conjugate gradient method to estimate an optimum velocity model and can create an initial high quality model for other intensive imaging and modelling module such as reverse-time migration (RTM) and full-waveform inversion (FWI). For the mentioned benefit, we develop a seismic travel-time reflection tomography (SeisT) module to study the accuracy of the approach along with building the technical capability in seismic processing. The accuracy of the module has been tested by both synthetic and real seismic field data; the efficiency and the accuracy of the model have been proven in terms of development method as well as field data application.

**Key words:** Seismic signal processing, seismic reflection, ray tracing, velocity modelling, seismic tomography, tomographic inversion.