

# DỊCH CHUYỂN THỜI GIAN NGƯỢC CHO SỐ LIỆU ĐỊA CHẤN THÊM LỤC ĐỊA VIỆT NAM

Đoàn Huy Hiền, Tạ Quang Minh, Mai Thị Lụa  
Mai Thị Huyền Trang, Trần Ngọc Minh  
Viện Dầu khí Việt Nam  
Email: hiendh.epc@vpi.pvn.vn

## Tóm tắt

**Dịch chuyển thời gian ngược (RTM) được coi là phương pháp dịch chuyển sâu trước cộng chính xác nhất trong điều kiện địa chất phức tạp vì thực hiện mô phỏng trường sóng 2 chiều (thuận và ngược). Phương pháp này được ứng dụng nhiều trong công nghiệp vì phần cứng máy tính phát triển nhanh, đáp ứng yêu cầu xử lý số liệu lớn. Đặc biệt, bộ vi xử lý đồ họa (GPU) được áp dụng vào xử lý số liệu địa chấn đã nâng cao tốc độ và hiệu quả tính toán. Bài báo giới thiệu lý thuyết RTM, đồng thời kiểm chứng độ chính xác của thuật toán bằng số liệu mô phỏng và số liệu địa chấn thực của thêm lục địa Việt Nam. Nhóm tác giả cũng phát triển thuật toán của RTM tính toán bằng bộ vi xử lý đồ họa (GPU-RTM), được sử dụng tại Trung tâm Nghiên cứu Tìm kiếm Thăm dò và Khai thác Dầu khí (EPC) thuộc Viện Dầu khí Việt Nam (VPI). Kết quả cho thấy GPU-RTM sử dụng card đồ họa NVIDIA Quadro K5000 cho kết quả nhanh hơn hàng chục lần so với sử dụng bộ vi xử lý thông thường (CPU-RTM).**

**Từ khóa:** Dịch chuyển, dịch chuyển thời gian ngược, lan truyền sóng, đạo hàm riêng trường sóng, GPU-RTM.

## 1. Giới thiệu

Dịch chuyển (migration) trong xử lý địa chấn là bước quan trọng nhất nhằm đưa các tín hiệu địa chấn về đúng vị trí phân xạ để phục vụ cho các quá trình minh giải. Dịch chuyển địa chấn được phân loại như sau: dịch chuyển thời gian (time migration), dịch chuyển sâu (depth migration), dịch chuyển trước khi cộng (prestack migration) và dịch chuyển sau khi cộng (poststack migration). Tùy vào từng mục đích và độ phức tạp của điều kiện địa chất mà các thuật toán dịch chuyển được áp dụng, trong đó dịch chuyển sâu trước cộng (prestack depth migration) được coi là phương pháp chính xác nhất cho các điều kiện môi trường địa chất phức tạp, vận tốc truyền sóng thay đổi theo cả phương dọc và ngang. Dựa vào các cách tiệm cận lời giải phương trình sóng, thuật toán dịch chuyển sâu trước cộng được chia làm 3 phương pháp: phương pháp đường đi của tia sóng (ray tracing), phương pháp phương trình sóng 1 chiều (one way wave equation) và phương pháp phương trình sóng 2 chiều (two way wave equation). Trong các thuật toán dịch chuyển sâu trước cộng, dịch chuyển thời gian ngược (reverse time migration - RTM) là phương pháp chính xác để xây dựng mặt cắt địa chấn cho cấu trúc địa chất phức tạp và độ tương phản vận tốc của các đơn vị địa chất lớn như đụn muối (salt dome) [1 - 5].

Tuy nhiên, khối lượng tính toán cũng như xử lý thông tin vào ra của RTM lớn hơn nhiều so với bộ nhớ của máy tính cá nhân thông thường dẫn đến việc thực hiện trong công nghiệp của RTM không khả thi. Ngày nay, sự ra đời

của các hệ thống máy tính song song (cluster) cho phép sử dụng thuật toán RTM trong công nghiệp. Ngoài ra, bộ vi xử lý đồ họa (GPU) được sử dụng nhiều trong công nghệ tính toán giúp thực hiện các bài toán phức tạp trở nên dễ dàng hơn.

Bài báo giới thiệu lý thuyết của thuật toán RTM và kiểm tra tính đúng đắn bằng các số liệu mô phỏng và ứng dụng vào việc xây dựng mặt cắt sâu cho một tuyến địa chấn thêm lục địa Việt Nam. Thuật toán RTM này được phát triển cho các ứng dụng của bộ vi xử lý đồ họa (GPU-RTM) giúp giảm thời gian tính toán rất nhiều.

## 2. Dịch chuyển thời gian ngược

Phương trình sóng trong trường hợp rời rạc hóa có thể biểu diễn như sau [6]:

$$M\ddot{U}(t, p) + KU(t, p) = f(t) \quad (1)$$

Trong đó:

M: Ma trận khối lượng;

K: Độ cứng;

p: Tham số địa vật lý;

U: Trường sóng;

f: Hàm nguồn.

Shin và Chung [7] đã chứng minh điều kiện ảnh hưởng cho bài toán dịch chuyển sâu trước cộng tương đương với tích vô hướng của đạo hàm riêng bậc nhất của trường sóng

theo một tham số địa vật lý với số liệu địa chấn ghi được trên bề mặt. Điều kiện ảnh này chính là cơ sở của thuật toán dịch chuyển thời gian ngược cho môi trường đẳng hướng và bất đồng nhất [7].

Trong không gian Fourier, phương trình (1) được viết lại như sau:

$$KU(\omega, p) - M\omega^2 U(\omega, p) = F \quad (2)$$

Đạo hàm 2 vế của phương trình (2) theo một tham số địa vật lý nào đó,  $p_1$ , (vận tốc, tỷ trọng...) thu được:

$$K \frac{\partial U(\omega, p)}{\partial p_1} - \omega^2 M \frac{\partial U(\omega, p)}{\partial p_1} = - \left( \frac{\partial K}{\partial p_1} - \omega^2 \frac{\partial M}{\partial p_1} \right) U(\omega, p) \quad (3)$$

Phương trình (2) và (3) có dạng giống nhau, sự khác nhau là hàm nguồn (force function). Ở phương trình (2), hàm nguồn  $F$  được cho trước trong mỗi phương trình sóng (thường là xung spike, xung với pha ban đầu là 0, hoặc là xung Ricker), trong khi đó ở phương trình (3),  $-\left(\frac{\partial K}{\partial p_1} - \omega^2 \frac{\partial M}{\partial p_1}\right)U(\omega, p) = f^*$ , được gọi là hàm nguồn ảo (virtual source). Hàm nguồn ảo được tính trực tiếp từ trường sóng  $U$  và đại lượng phụ thuộc và các điều kiện tham số địa vật lý đầu vào  $-\left(\frac{\partial K}{\partial p_1} - \omega^2 \frac{\partial M}{\partial p_1}\right)$ . Như vậy, đạo hàm riêng (partial derivative) của trường sóng có thể tính toán được bằng cách giải phương trình sóng 2 lần. Sau khi đạo hàm riêng của trường sóng được tính toán có thể thực hiện được thuật toán dịch chuyển để xuất bởi Shin và Chung [7].

Theo Shin và Chung [7], điều kiện ảnh được tổng quát hóa qua phương trình sau:

$$Map(x, z = 0, t) = \sum_{i=1}^{Nshot} \left\langle \frac{\partial U(x, z=0, t)}{\partial p}, d_i(x, z = 0, t) \right\rangle \quad (4)$$

Trong đó  $d_i(x, z = 0, t)$  là số liệu địa chấn thu được trên bề mặt hay còn gọi là điểm nổ chung.

Thế đạo hàm riêng của trường sóng  $\frac{\partial U(x, z=0, t)}{\partial p}$  xác định từ phương trình (3) vào phương trình (4) thu được:

$$Map(x, z = 0, t) = \sum_{i=1}^{Nshot} \langle S(p, t)^{-1} f^*, d_i(x, z = 0, t) \rangle \quad (5)$$

Trong đó  $S = K - \omega^2 M$ .

Do  $S$  đối xứng cho nên phương trình điều kiện ảnh (5) có thể viết lại như sau:

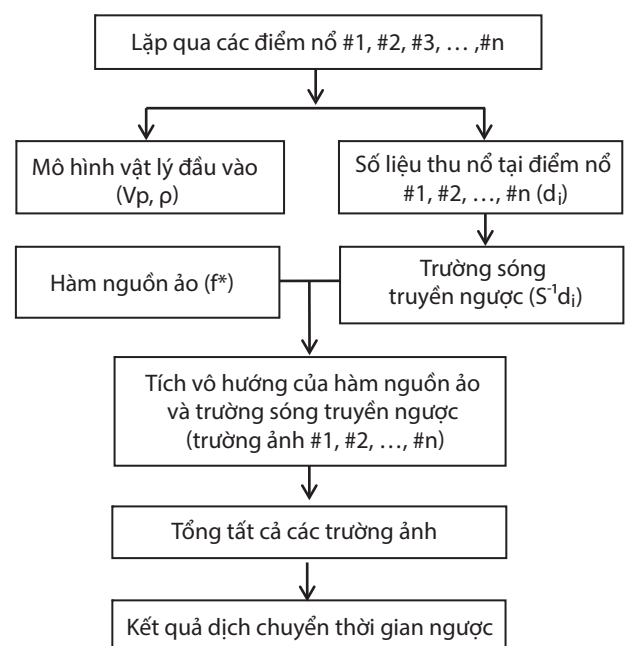
$$Map(x, z = 0, t) = (x + a)^n = \sum_{i=1}^{Nshot} \langle S(p, t)^{-1} d_i(x, z = 0, t), f^* \rangle \quad (6)$$

Phương trình (6) là phương trình cơ bản của thuật toán dịch chuyển sâu thời gian ngược, trong đó  $S(p, t)^{-1} d_i(x, z = 0, t)$  được gọi là trường sóng truyền ngược (back propagating

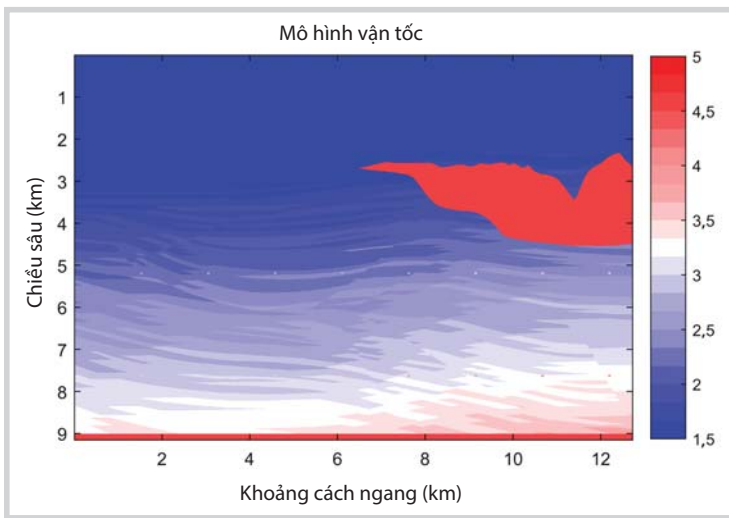
wavefield). Từ đó, thuật toán dịch chuyển thời gian ngược có thể biểu diễn trên sơ đồ khối (Hình 1).

Sử dụng số liệu mô phỏng từ mô hình SEG - Sigsbee để kiểm tra tính đúng đắn của thuật toán RTM. Mô hình SEG-Sigsbee được xây dựng bởi nhóm nghiên cứu Delphi, Đại học Tổng hợp Delft Hà Lan (<http://www.delphi.tudelft.nl/SMAART/sigsbee2b.htm>) nhằm mục đích nghiên cứu dựng lại ảnh của đụn muối với sự tương phản rất lớn của vận tốc truyền sóng của đụn muối (5km/giây) và trầm tích bao quanh (2 - 2,5km/giây). Độ tương phản của các lớp trầm tích trong mô hình này không lớn. Mô hình Sigsbee bao gồm các hệ thống đứt gãy thuận nghịch chia các trầm tích xung quanh thành các khối (Hình 2). Hình 3 trình bày kết quả của mô phỏng phương trình sóng (1) bằng phương pháp sai phân hữu hạn (FDM). Ở đây, tuyến địa chấn gồm 69 điểm nổ, mỗi điểm nổ có 301 mạch với khoảng cách giữa 2 mạch là 7,62m (25ft) và khoảng cách giữa 2 điểm nổ là 76,2m (250ft). Hình 4 thể hiện kết quả dịch chuyển thời gian ngược từ mô hình vận tốc Sigsbee. So sánh mặt cắt này với mô hình vận tốc ban đầu cho thấy hình dạng của thân muối (salt body) được thể hiện rất rõ nét mặc dù khoảng cách điểm nổ tương đối thưa.

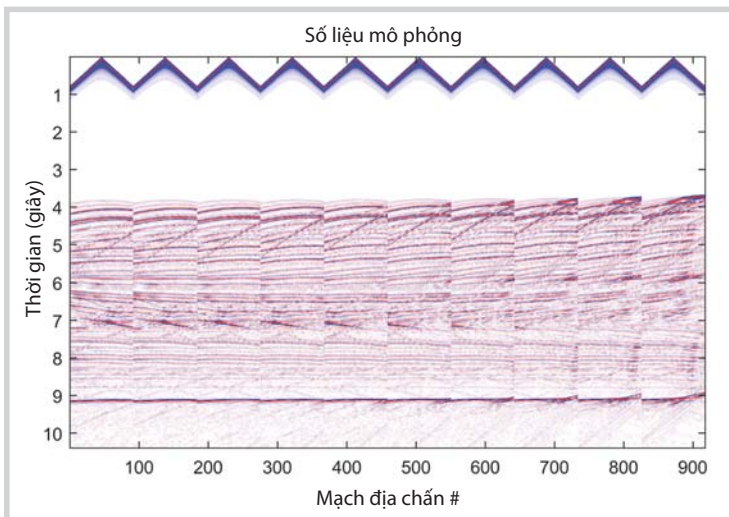
Ngoài ra, các mặt phản xạ và hệ thống đứt gãy của các lớp trầm tích bên cạnh và phía dưới đụn muối mô hình cũng dễ quan sát thấy trên mặt RTM. Tuy nhiên, do đặc điểm hấp thụ sóng lớn của thân muối, các mặt phản xạ phản dưới thân muối không được khôi phục toàn diện. Để tăng độ phân giải ngang của mặt cắt, số



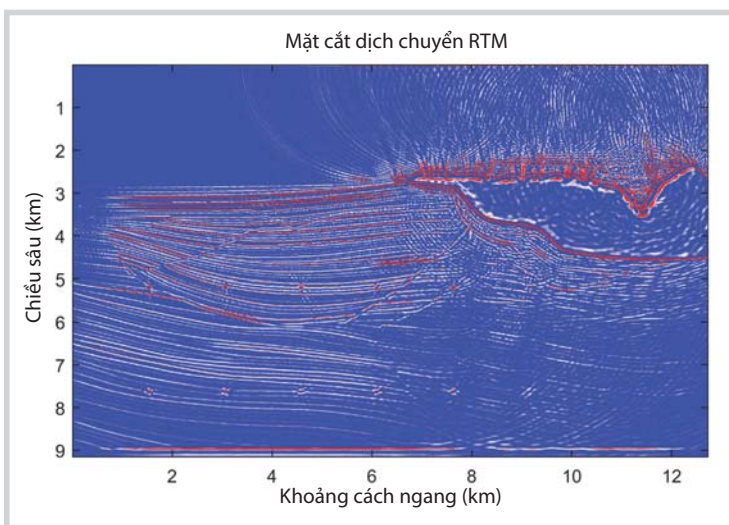
Hình 1. Sơ đồ khối của thuật toán dịch chuyển thời gian ngược



Hình 2. Mô hình vận tốc đụn muối Sigsbee sử dụng làm đầu vào cho bài toán mô phỏng và dịch chuyển thời gian ngược



Hình 3. Điểm nổ chung là kết quả giải phương trình sóng, là số liệu đầu vào cho dịch chuyển sâu trước cộng

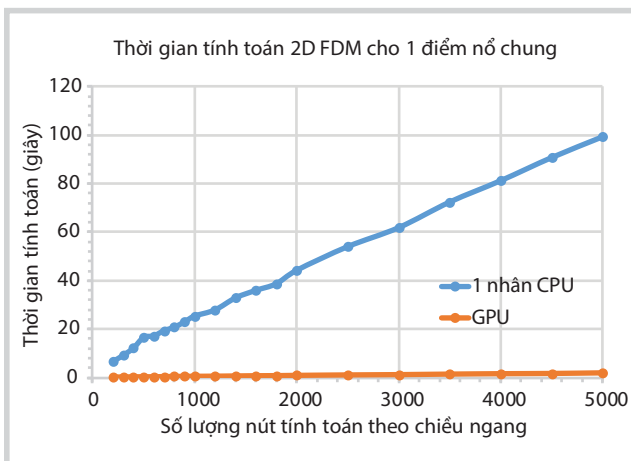


Hình 4. Mặt cắt dịch chuyển thời gian ngược từ số liệu mô phỏng ở Hình 3 và mô hình vận tốc Sigsbee Hình 2

điểm nổ địa chấn có thể tăng gấp nhiều lần bằng cách giảm khoảng cách giữa 2 điểm nổ liên tiếp giống với các tuyến thu nổ địa chấn ngoài thực tế. Tuy vậy, số liệu đầu vào quá lớn làm bộ nhớ trong của máy tính không đủ để thực hiện tính toán. Để thực hiện thuật toán dịch chuyển thời gian ngược này với số liệu mô phỏng như trên, nếu sử dụng một bộ vi xử lý (single Intel® Xeon® CPU) tốc độ 3.0GHz của máy tính trạm gồm 16 CPU, chiếm hết bộ nhớ trong là 2Gb và thời gian tính toán gần 3 ngày.

### 3. Bộ xử lý đồ họa (GPU) cho dịch chuyển thời gian ngược (GPU-RTM)

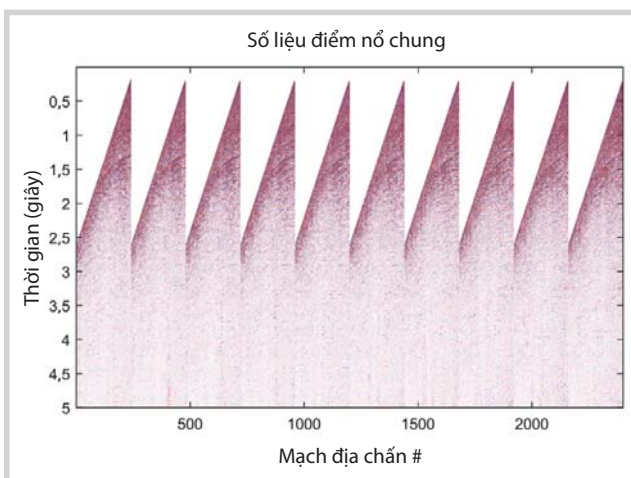
Ngôn ngữ lập trình CUDA (Computing Unified Device Architecture) là ngôn ngữ lập trình hỗ trợ các chức năng tính toán thông qua ngôn ngữ lập trình C do NVIDIA phát triển. CUDA cho phép truy nhập vào tập các chỉ lệnh ảo và bộ nhớ của các phần tử tính toán song song trong đơn vị xử lý đồ họa của CUDA (CUDA GPU). Sử dụng CUDA, các GPU mới nhất do NVIDIA sản xuất có thể dễ dàng thực hiện các tính toán như các CPU. Tuy nhiên, không giống như các CPU, các GPU có thể thực thi chậm nhiều luồng dữ liệu một lúc hơn là thực thi nhanh một luồng dữ liệu. Như vậy, khả năng tính toán với số liệu có cấu trúc song song thì tốc độ tính toán của CUDA - GPU rất cao. Điều đó được áp dụng rộng rãi trong các bài toán dựng ảnh và bài toán ngược trong địa chấn thăm dò. Một trong những giới hạn của CUDA chính là sự trao đổi số liệu giữa bộ nhớ của GPU và bộ nhớ chính thường lâu hơn nhiều tốc độ tính toán. Ở đây, thuật toán GPU-RTM dựa trên thuật toán RTM (Hình 1), sử dụng điều kiện biên hiệu quả và được lưu vào từng ô lưới so le thay vì sử dụng trực tiếp tính toán trên GPU [9] được xây dựng và thực hiện tại EPC/VPI. Thuật toán GPU-RTM đã được thử nghiệm thành công với số liệu mô phỏng của mô hình SEG-Sigsbee. Kết quả tính toán giống như kết quả thử nghiệm với bộ vi xử lý CPU. Sử dụng card đồ họa NVIDIA Quadro K5000 với bộ nhớ 4.5Gb, thời gian tính toán đã giảm rất nhiều. Hình 5 thể hiện thời gian thực tính toán của mô phỏng trường sóng bằng bộ xử lý đồ họa (GPU) và bộ xử lý trung tâm (CPU) trong đó trục hoành thể hiện số lượng điểm tính toán theo chiều ngang. Số lượng điểm tính toán theo chiều dọc được giữ là hằng số (200 điểm). Quá trình thử



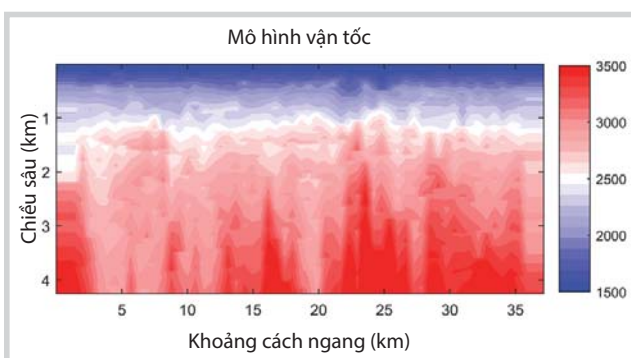
Hình 5. So sánh thời gian tính toán của card đồ họa và 1 nhân bộ vi xử lý trung tâm

Bảng 1. Tham số thu nổ thực địa

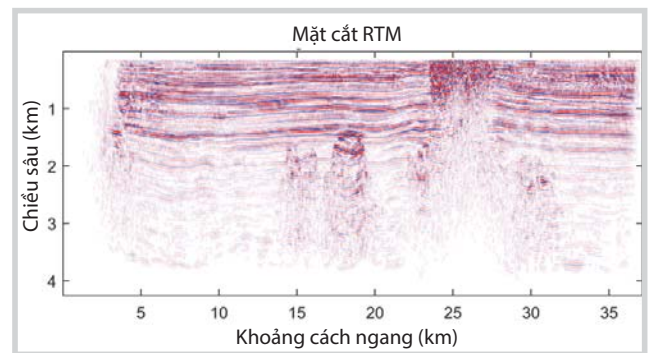
Số lượng điểm nổ	1070
Số lượng mạch trên 1 điểm nổ	240
Khoảng cách giữa 2 điểm nổ	30,08m
Khoảng cách giữa 2 mạch	15,04m
Khoảng cách điểm nổ với mạch đầu	125m
Tổng số mẫu thời gian	1500
Khoảng lấy mẫu thời gian	2ms



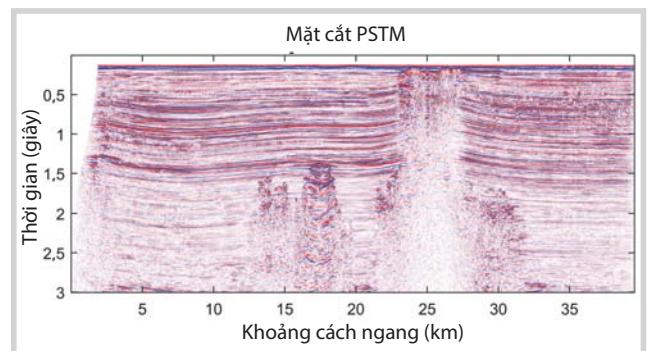
Hình 6. Điểm nổ chung



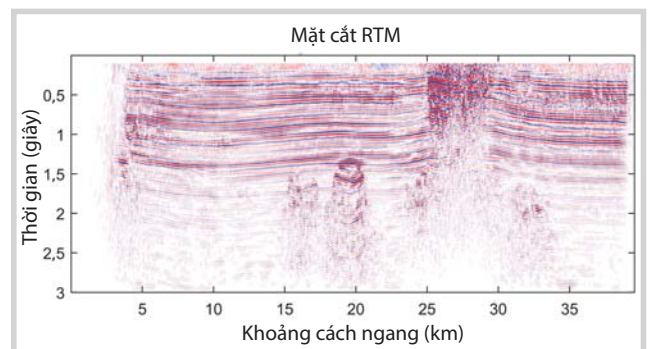
Hình 7. Mô hình vận tốc đầu vào để thực hiện dịch chuyển



Hình 8. Mặt cắt dịch chuyển thời gian ngược từ số liệu mô phỏng thể hiện ở Hình 6 và mô hình vận tốc Hình 7



Hình 9. Mặt cắt dịch chuyển thời gian trước cộng (PSTM)



Hình 10. Mặt cắt dịch chuyển thời gian ngược (trong miền thời gian) sau khi chuyển đổi độ sâu thời gian bằng mô hình vận tốc đầu vào (Hình 7)

nghiệm số liệu mô phỏng, kết quả và thời gian tính toán cho phép nhóm tác giả thử nghiệm với số liệu thu nổ thực tế trên thềm lục địa Việt Nam (Bảng 1 thể hiện các thông số hình học của số liệu). Số liệu thu nổ này được tiền xử lý để loại bỏ các nhiễu ngẫu nhiên, nhiễu hệ thống và nhiễu lặp. Tiếp theo, các bước phân tích vận tốc nhiều lần giúp tinh chỉnh và xây dựng được mô hình vận tốc đầu vào cho GPU-RTM.

Hình 6 trình bày số liệu thu nổ thực sau khi đã xử lý. Hình 7 thể hiện mô hình vận tốc đầu vào cho GPU-RTM. Hình 8 trình bày kết quả của RTM-GPU. Các mặt phản xạ mạnh của số liệu được dịch chuyển tương đối rõ nét, đặc biệt là mặt móng. Các cấu trúc địa chất đặc biệt là cấu trúc diapir (vị trí từ km 22 đến km 28) thể hiện rõ trên mặt

cắt. Tuy nhiên, còn rất nhiều nhiễu dịch chuyển xuất hiện trên mặt cắt, các nhiễu ảnh gương vì quá trình lấy mẫu tương đối thưa tại các vị trí điểm thu do điều kiện ổn định của phương trình sóng. Sử dụng công cụ chuyển đổi giữa miền chiều sâu và thời gian của tuyến địa chấn này, nhóm tác giả so sánh với mặt cắt PSTM thực hiện bởi thuật toán Kirchoff trên Promax của số liệu này cùng với mô hình vận tốc đầu vào (Hình 7). Hình 9 và 10 so sánh giữa 2 mặt cắt này. Ở đây mặt cắt RTM dựng lại các đối tượng địa chất rõ nét và chi tiết hơn.

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Thuật toán RTM được kiểm nghiệm qua số liệu địa chấn mô phỏng (SEG-Sigsbee) và thử nghiệm với số liệu thu nổ địa chấn ở thềm lục địa Việt Nam. Để nâng cao tốc độ tính toán và tính ứng dụng của thuật toán trong công nghiệp, RTM đã được phát triển sử dụng bộ vi xử lý đồ họa để tính toán. Kết quả của GPU-RTM với số liệu mô phỏng cho thấy thời gian tính toán nhanh hơn nhiều so với bộ vi xử lý thông thường. GPU-RTM cũng được sử dụng với số liệu địa chấn thềm lục địa Việt Nam. Kết quả dịch chuyển cho thấy các mặt phản xạ mạnh được khôi phục lại tương đối tốt. Tuy nhiên, vẫn còn xuất hiện nhiễu và artifact trong mặt cắt. Điều này sẽ được nhóm tác giả nghiên cứu và nâng cấp trong các phiên bản tiếp theo của chương trình.

#### Tài liệu tham khảo

1. Edip Baysal. *Modelling and migration by the fourier transform method*. University of Houston. 1982.

2. G.A.McMechan. *Migration by extrapolation of time-dependent boundary values*. Geophysical Prospecting. 1983; 31(3): p. 413 - 420.

3. Wen-Fong Chang, George A.McMechan. *Reverse time migration in of offset vertical seismic data profiling data using the excitation time imaging condition*. Geophysics. 1986; 51(1): p. 67 - 84.

4. S.Jang. *Imaging of the earth interior using cross correlation*. Hanyang University. 1996.

5. John Etgen, Samuel H.Grey, Yu Zhang. *An overview of depth imaging in exporation geophysics*. Geophysics. 2009.

6. Kurt J.Marfurt. *Accuracy of finite difference and finite element modeling of scalar and elastic wave equation*. Geophysics. 1984; 49: p. 533 - 549.

7. Changsoo Shin, Seunghwan Chung. *Understanding CMP stacking hyperbola in terms of partial derivative wavefield*. Geophysics. 1999; 64: p. 1774 - 1782.

8. Changsoo Shin, Seonghyung Jang, Dong-Joo Min. *Improved amplitude preservation for prestack depth migration by inverse scattering theory*. Geophysical Prospecting. 2001; 49: p. 592 - 606.

9. Pengliang Yang, Jinghuai Gao, Baoli Wang. *RTM using effective boundary: A staggered grid GPU implementation*. Computer and Geosciences. 2014; 68: p. 64 - 72.

## Reverse time migration for offshore Vietnam dataset

Doan Huy Hien, Ta Quang Minh, Mai Thi Lua  
Mai Thi Huyen Trang, Tran Ngoc Minh  
Vietnam Petroleum Institute  
Email: hiendh.epc@vpi.pvn.vn

#### Summary

**Reverse time migration (RTM) has been considered as the most accurate seismic pre-stack depth migration technique for complex geological conditions because it handles full wave field upward and downward propagation. It has widely been applied in the field data set as the computing hardware has been fast developed to meet the need of mega data handling. Especially, the graphic processing unit (GPU) applied to seismic data processing has improved the speed and the efficiency of the computation. This paper presents the theoretical equations of RTM and verifies the accuracy of the algorithm by applying both synthetic and real seismic data set offshore Vietnam. The authors also develops the accelerated GPU implementation of RTM (GPU-RTM) for usage at the Exploration and Production Centre (EPC) of the Vietnam Petroleum Institute (VPI). The implementation results have shown that the time computing of GPU-RTM using NVIDIA Quadro K5000 is tens of times faster than the single CPU-RTM.**

**Key words:** Migration, reverse time migration, wave propagation, partial derivative wavefield, GPU-RTM.