

# ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP DỊCH CHUYỂN DỜI PHA NỘI SUY TUYẾN TÍNH VÀO XỬ LÝ TÀI LIỆU RADAR XUYỀN ĐẤT ĐỂ XÁC ĐỊNH KÍCH THƯỚC VÀ VỊ TRÍ DỊ VẬT

LÊ HOÀNG KIM, NGUYỄN THÀNH VÂN, ĐẶNG HOÀI TRUNG

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Tp.HCM, Nguyễn Văn Cừ, Q.5, Tp. HCM

**Tóm tắt:** Dịch chuyển dời pha nội suy tuyến tính (Phase Shift Plus Interpolation migration - PSPI migration) là một trong những phương pháp được sử dụng rất phổ biến, không chỉ trong xử lý dữ liệu địa chấn, mà còn trong xử lý tài liệu Radar xuyên đất (GPR). Nhờ vào sự tương ứng trong lý thuyết lan truyền sóng cơ học và sóng điện từ mà các phương pháp dịch chuyển địa chấn có thể được biến đổi phù hợp để áp dụng vào xử lý tài liệu GPR như một công cụ tính vận tốc truyền sóng của môi trường, ước lượng độ sâu, hình dạng và kích thước dị vật. Có hai loại vận tốc thường được dùng trong dịch chuyển: vận tốc căn quân phương (RMS) – dùng trong các loại dịch chuyển F-K, dịch chuyển sai phân hữu hạn, dịch chuyển Kirchhoff, và vận tốc khoảng (interval) được dùng trong dịch chuyển PSPI. Vận tốc RMS là vận tốc trung bình được tính từ vận tốc thực của các phân lớp nằm bên trên điểm khảo sát, trong khi vận tốc khoảng chỉ phản ánh vận tốc của riêng phân lớp chứa điểm khảo sát. Bài viết này sẽ trình bày cách thức áp dụng dịch chuyển PSPI vào xử lý dữ liệu GPR, có kèm theo kết quả xử lý dữ liệu mô hình và dữ liệu thực tế. Bên cạnh đó, việc kết hợp sử dụng hai loại vận tốc RMS và vận tốc khoảng vào các bước xử lý cũng sẽ được đưa ra phân tích để thu được kết quả tốt nhất.

## I. TỔNG QUAN PHƯƠNG PHÁP

Phương pháp Radar xuyên đất (GPR) là phương pháp thăm dò địa vật lý sử dụng sóng điện từ (thông thường trong dải tần số từ 10 đến 2000 MHz) [4, 5] để tìm hiểu cấu trúc tầng nông bên dưới mặt đất. Trong khi đó, thăm dò địa chấn là phương pháp địa vật lý nhằm tìm hiểu cấu trúc, tính chất đất đá vỏ Trái Đất dựa trên cơ sở lý thuyết lan truyền sóng cơ học trong môi trường đàn hồi.

Một cách tổng quát, phương pháp thăm dò địa chấn phản xạ gồm có ba bước chính: Thu nỏ, xử lý dữ liệu và minh giải. Mặc dù quy trình xử lý tốn khá nhiều thời gian cho nhiều công đoạn phức tạp, nhưng dịch chuyển địa chấn vẫn được xem là công đoạn khó khăn và quan trọng nhất. Mục đích của dịch chuyển địa chấn là biến đổi trường sóng quan sát được trên mặt đất về vị trí thực của các mặt phản xạ trong lát cắt địa chất, nhằm biểu diễn hình thái cấu tạo các ranh giới địa chất bên dưới mặt đất cách tốt nhất theo quan điểm địa vật lý.

Trong những năm gần đây, nhờ vào một vài tương quan giữa lý thuyết lan truyền sóng điện từ và sóng cơ học (như nguyên lý hoạt động dựa trên sự phản xạ của sóng, các toán tử và các biến số trên hai phương trình sóng đóng vai trò giống nhau), dịch chuyển địa chấn được nghiên cứu để áp dụng vào xử lý tài liệu GPR. Trong số các phương pháp dịch chuyển, phương pháp Dời pha Nội suy tuyến tính PSPI thuộc trường phái hạ trường, được công bố lần đầu năm 1984 bởi Jenő Gazdag and Piero Squazzero [3], là một trong những phương pháp được quan tâm trên thế giới nhưng vẫn chưa phổ biến tại Việt Nam.

Về mặt lý thuyết, dịch chuyển PSPI thuộc loại dịch chuyển độ sâu nên loại vận tốc dùng trong quá trình dịch chuyển là vận tốc khoảng ( $V_{int}$ ). Tuy nhiên trong thực tế áp dụng vào GPR, ta hoàn toàn không biết chính xác cấu trúc phân lớp của môi trường bên dưới mặt đất nên rất khó để tính toán mô hình vận tốc khoảng. Chính vì thế, chúng tôi đề xuất trước hết dùng mô hình vận tốc RMS để chạy thuật toán dịch chuyển PSPI, sau đó dựa vào kết quả xử lý bước đầu kết hợp với các thông tin tiên nghiệm để xây dựng mô hình vận tốc khoảng thông qua các hệ thức liên hệ giữa hai loại vận tốc, từ đó so sánh kết hợp các kết quả xử lý dùng vận tốc khoảng và vận tốc RMS để tìm ra

lát cắt sau xử lý tốt nhất. Tiêu chí để đánh giá mức độ chính xác của các lát cắt kết quả được sử dụng trong bài viết này là phương pháp phân tích Entropy.

## II. KẾT HỢP ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP DỊCH CHUYỂN DỜI PHA NỘI SUY TUYẾN TÍNH PSPI, CÁC LOẠI VẬN TỐC VÀ PHƯƠNG PHÁP ENTROPY VÀO XỬ LÝ DỮ LIỆU GPR

### 1. Lý thuyết dịch chuyển PSPI [2, 3]

Trong thực tế, phân bố vận tốc truyền sóng của môi trường đất đá là rất phức tạp, chúng không đồng nhất mà biến thiên theo mọi hướng. Tuy nhiên, ta có thể xem xét tính biến thiên này theo hai hướng chính: theo độ sâu và theo phương ngang. Biến thiên vận tốc có ảnh hưởng lớn đến dạng trường sóng phản xạ. Trường vận tốc thay đổi càng phức tạp thì quá trình dịch chuyển địa chấn càng gặp nhiều khó khăn.

Phương pháp dời pha nội suy tuyến tính PSPI là một trong những phương pháp hướng đến giải quyết vấn đề bằng xem xét biến thiên vận tốc, có ý tưởng tách bài toán dịch chuyển thành hai thuật toán tương ứng với hai bước chính như sau:

Bước 1: Ngoại suy trường sóng theo độ sâu, dùng hệ thức (1)

$$P(k_x, z + \Delta z, \omega) = P(k_x, z, \omega) \exp \left\{ \frac{i\omega}{v} \left[ 1 - \left( \frac{k_x v}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Delta z \right\} \quad (1)$$

Bước 2: Thực hiện nội suy theo phương ngang, dùng các hệ thức (2), (3), (4), (5)

$$P_j(x, z + \Delta z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(k_x, z, \omega) \alpha_j(k_x, \omega) \exp(ik_x x) dk_x \quad (2)$$

$$P_{j+1}(x, z + \Delta z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(k_x, z, \omega) \alpha_{j+1}(k_x, \omega) \exp(ik_x x) dk_x \quad (3)$$

$$\alpha_j(k_x, \omega) = \begin{cases} \exp(i\Delta z k_{zj}), & |k_x| \leq \frac{\omega}{v_j} \\ \exp(-|\Delta z k_{zj}|), & |k_x| > \frac{\omega}{v_j} \end{cases} \quad (4)$$

Với:

$$k_{zj} = \sqrt{\frac{\omega^2}{v_j^2} - k_x^2} \quad (5)$$

Phép nội suy:

$$P(x, z + \Delta z, \omega) \approx LI(P_j(x, z + \Delta z, \omega), P_{j+1}(x, z + \Delta z, \omega)) \quad (6)$$

### 2. Vận tốc căn quân phương RMS và vận tốc khoảng

Có hai loại vận tốc thường được dùng trong dịch chuyển: vận tốc căn quân phương RMS ( $v_{rms}$ ) và vận tốc khoảng ( $v_{int}$ ).

Vận tốc RMS, được dùng trong dịch chuyển thời gian F-K và dịch chuyển thời gian Kirchhoff, là vận tốc trung bình tại điểm khảo sát, được tính từ vận tốc thực của các phân lớp phía trên đến điểm khảo sát.

Hệ thức tính vận tốc RMS như sau:

$$v_{rms}(z) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v_{ins}^2(\tau) d\tau \quad (7)$$

Với  $v_{ins}$  là vận tốc thực;  $\tau$  là thời gian;  $z$  là độ sâu.

Vận tốc khoảng  $v_{int}$  được tính cho từng khoảng  $\Delta t$  và  $\Delta z$  trong quá trình xử lý dữ liệu; nó thường được xem gần đúng với vận tốc thực của một phân lớp, không bao gồm ảnh hưởng của các phân lớp phía trên. Vận tốc khoảng được dùng trong phép dịch chuyển PSPI.

Hệ thức tính vận tốc khoảng:

$$v_{int} = \frac{z_2 - z_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (8)$$

Hệ thức liên hệ giữa vận tốc khoảng và vận tốc RMS:

$$\tilde{v}_{int} = \sqrt{\frac{v_{rms2}^2 \tau_2 - v_{rms1}^2 \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}} \quad (9)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{v_{int1}^2 t_1 + v_{int2}^2 t_2}{t_1 + t_2}} \quad (10)$$

### 3. Phương pháp cực tiểu Entropy

Trong phương pháp GPR, rất khó để xác định chính xác vận tốc môi trường bằng việc phân biệt các lát cắt xử lý dịch chuyển với các giá trị vận tốc gần bằng nhau. Chính vì thế, phương pháp xác định cực tiểu Entropy [1] được dùng để xác định vận tốc với sai số nhỏ nhất.

Entropy được xem như là thước đo độ nhiễu loạn của tín hiệu trong một lát cắt cụ thể. Lát cắt có tín hiệu nhiễu loạn càng ít thì phản ánh càng chính xác vị trí dị vật. Nói cách khác, lát cắt dịch chuyển với vận tốc chính xác tính đến đỉnh dị vật sẽ có giá trị Entropy nhỏ nhất.

Hệ thức tính Entropy [6]:

$$En(P) = \frac{\left[ \sum_m^M \sum_n^N P^2(m, n) \right]^2}{\sum_m^M \sum_n^N P^4(m, n)} \quad (11)$$

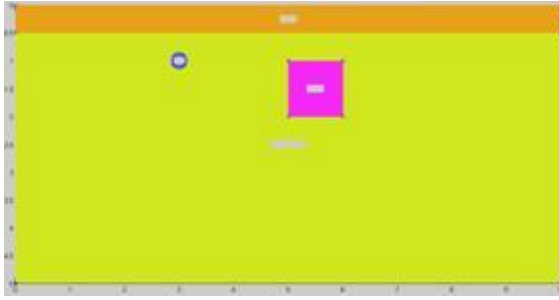
Với  $En(P)$  là giá trị Entropy của ma trận trường sóng  $P$  có kích thước  $(M \times N)$ .

## III. XỬ LÝ SỐ LIỆU MÔ HÌNH VÀ SỐ LIỆU THỰC TẾ

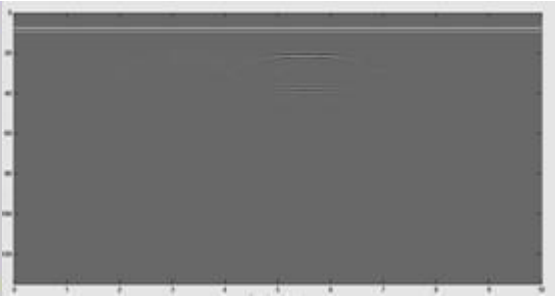
### 1. Số liệu mô hình

Hình 1 biểu diễn mô hình mô phỏng môi trường hai phân lớp có chứa hai dị vật gồm một ống tròn và một cống bê tông vuông. Tần số khảo sát 700 MHz. Cụ thể, mô hình có hai phân lớp như sau:

- Phân lớp một: Tại mức độ sâu từ  $z=0$  m đến  $z=0,5$  m, vận tốc truyền sóng  $v_1=0,12239$  m/ns.
- Phân lớp hai: tại mức độ sâu từ  $z=0,5$  m đến hết,  $v_2=0,074949$  m/ns, phân lớp này có chôn một ống tròn đường kính  $\Phi=0,25$  m, tọa độ tâm ống tại  $(x=3$  m;  $z=1$  m),  $v=0,0027123$  m/ns, và một cống vuông bê tông, cạnh  $d=1$  m, tọa độ tâm tại  $(x=5,5$  m;  $z=1,5$  m),  $v=0,12197$  m/ns.



Hình 1. Mô hình hai phân lớp (x-z).



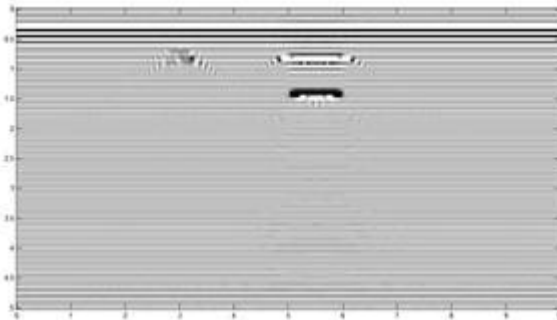
Hình 2. Lát cắt GPR (x-t).

Lát cắt GPR của mô hình như trên Hình 2, tín hiệu tại vị trí tương ứng với công bê tông là một đoạn nằm ngang tại tọa độ x từ  $x = 5 \text{ m} \rightarrow x = 6 \text{ m}$ ,  $t = 23 \text{ ns}$ , tại hai biên tín hiệu cong xuống thành dạng hai nửa hyperbol. Tín hiệu của ống tròn là một chùm hyperbol rất mờ, đỉnh tại  $x = 3 \text{ m}$ ,  $t = 23 \text{ ns}$ .

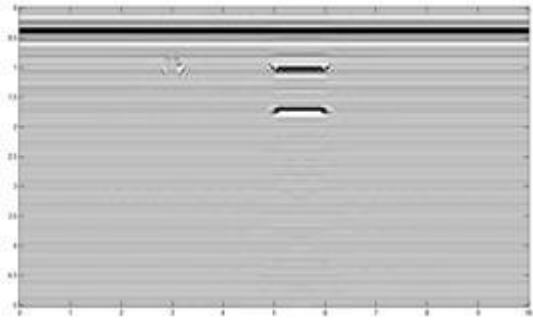
Áp dụng xử lý bằng dịch chuyển PSPI với các vận tốc:  $0,075 \text{ m/ns}$ ;  $0,095 \text{ m/ns}$ ;  $0,122 \text{ m/ns}$  và mô hình vận tốc khoảng hai phân lớp, lát cắt kết quả thu được lần lượt như các Hình 3, 4, 5, 6. Trong số các vận tốc được dùng để xử lý, như tính toán theo hệ thức (10),  $v=0,095 \text{ m/ns}$  là vận tốc RMS đến đỉnh dị vật.

Xem xét các lát cắt dịch chuyển, chúng tôi rút ra được các nhận xét sau:

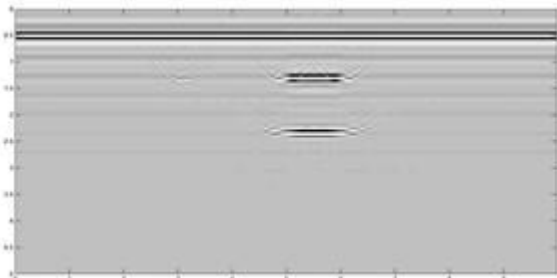
- Tín hiệu ống tròn: Khi vận tốc áp dụng bé hơn vận tốc RMS (tính đến đỉnh dị vật), tín hiệu hyperbol ban đầu bị bẻ cong xuống (Hình 3), khi vận tốc áp dụng lớn hơn vận tốc RMS, tín hiệu lại có dạng cong lên (Hình 5). Tuy nhiên, khi sử dụng vận tốc RMS hoặc mô hình vận tốc khoảng 2 phân lớp vào thuật toán dịch chuyển, tín hiệu được đưa về đúng hình dạng và độ sâu của dị vật công tròn (Hình 4, 6).



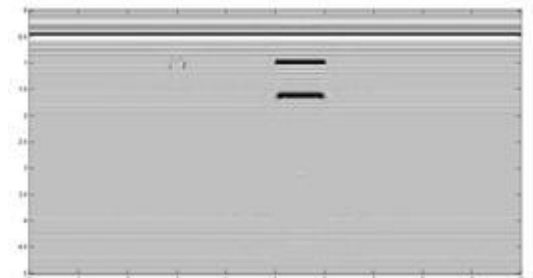
Hình 3. Lát cắt dịch chuyển  $v=0,075 \text{ m/ns}$ .



Hình 4. Dịch chuyển với  $v=0,095 \text{ m/ns}$ .



Hình 5. Dịch chuyển với  $v=0,122 \text{ m/ns}$ .



Hình 6. Dịch chuyển với vận tốc khoảng.

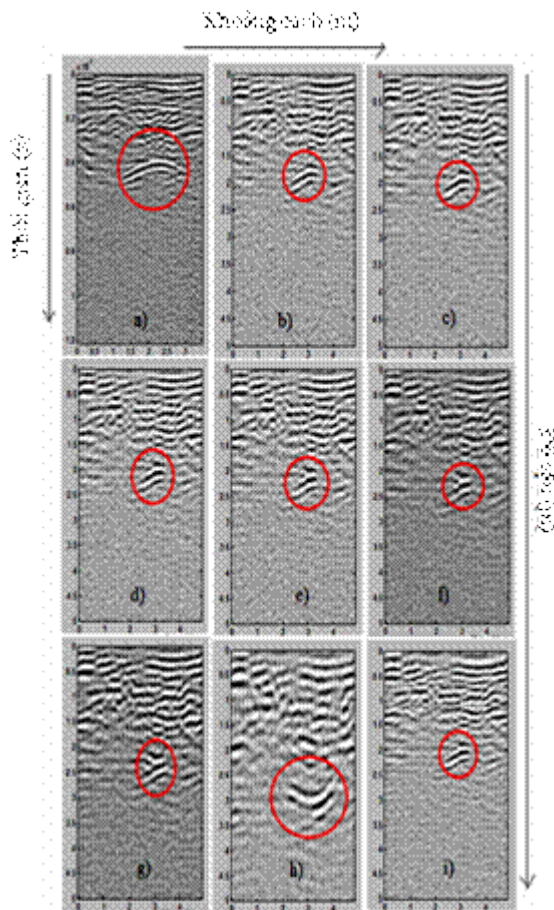
- Tín hiệu công vuông: Tương tự như tín hiệu ống tròn, khi vận tốc áp dụng khác với vận tốc RMS đến đỉnh dị vật, tín hiệu sau dịch chuyển không phản ánh đúng kích thước và độ sâu dị vật. Chỉ khi sử dụng đúng vận tốc RMS và mô hình vận tốc khoảng, tín hiệu mới đưa về đúng hình dạng và độ sâu của mặt trên dị vật.

- Mặc dù cả hai vận tốc RMS và vận tốc khoảng đều cho ra kết quả tốt như nhau, nhưng lát cắt dịch chuyển áp dụng mô hình vận tốc khoảng luôn cho tín hiệu rõ, ít nhiễu hơn so với lát cắt sử dụng vận tốc RMS.

dụng vận tốc RMS. Quan trọng hơn, dịch chuyển với mô hình vận tốc khoảng cho kết quả phản ánh đúng độ sâu của mặt ranh giới phân lớp nằm trên dị vật, trong khi dịch chuyển sử dụng vận tốc RMS chỉ phản ánh đúng độ sâu của dị vật được khảo sát.

## 2. Số liệu thực tế

Số liệu thực tế được đo tại đường Bình Tiên, Q. 6, Tp. HCM, tần số GPR khảo sát 250 MHz. Đây là tuyến đường trong nội ô thành phố, cấu tạo địa chất đến độ sâu 5,6m bao gồm ba lớp: lớp thứ nhất dày 0,5 m, gồm nhựa đường (dày 12 đến 15cm), cát, sỏi; lớp thứ hai dày 2,0 m là lớp cát-sét mềm, màu xám hoặc vàng; lớp cuối cùng dày 3,1 m với thành phần chính là đá ong đỏ - xám - từ mềm đến rắn [4].



Hình 7. a) Lát cắt GPR trước dịch chuyển ( $x-t$ ); Lát cắt dịch chuyển ( $x-z$ ) tương ứng theo vận tốc: b)  $v=0,090$  m/ns; c)  $0,095$  m/ns; d)  $0,100$  m/ns; e)  $0,105$  m/ns; f)  $0,110$  m/ns; g)  $0,115$  m/ns; h)  $0,150$  m/ns; i) Vận tốc khoảng.

Lát cắt GPR Bình Tiên (Hình 7a) có một tín hiệu hyperbol phân cực nghịch, đỉnh tại  $x = 2,25$  m,  $t = 40$  ns. Thực hiện dịch chuyển PSPI lần lượt với các vận tốc 0,090 m/ns; 0,095 m/ns; 0,100 m/ns; 0,105 m/ns; 0,110 m/ns; 0,115 m/ns; 0,150 m/ns. Kết quả thu được như các Hình 7b, 7c, 7d, 7e, 7f, 7g, 7h. Chúng tôi rút ra các nhận xét như sau:

- Khi thực hiện dịch chuyển với vận tốc  $v=0,09$  m/ns, tín hiệu hyperbol ban đầu bị nấn cong xuống (Hình 7a), trong khi dịch chuyển với  $v=0,150$  m/ns, tín hiệu lại có dạng cong lên (Hình 7h). Từ đó kết luận rằng, hai vận tốc này đều không phải vận tốc RMS đến đỉnh dị vật.

- Khi tiến hành dịch chuyển với các vận tốc trong dải từ 0,095 m/ns đến 0,115 m/ns, tín hiệu sau dịch chuyển có dạng tương tự nhau (Hình 7b, 7c, 7d, 7e, 7f, 7g), do đó rất khó phân biệt bằng mắt thường đâu là lát cắt có tín hiệu phản ánh chính xác nhất hình dạng và vị trí dị vật, từ đó cũng không thể kết luận được đâu là vận tốc RMS đến đỉnh dị vật. Chính vì thế, để tìm ra vận tốc RMS, chúng tôi áp dụng phương pháp phân tích Entropy trên các lát cắt sau dịch chuyển để chọn ra lát cắt có giá trị Entropy nhỏ nhất.

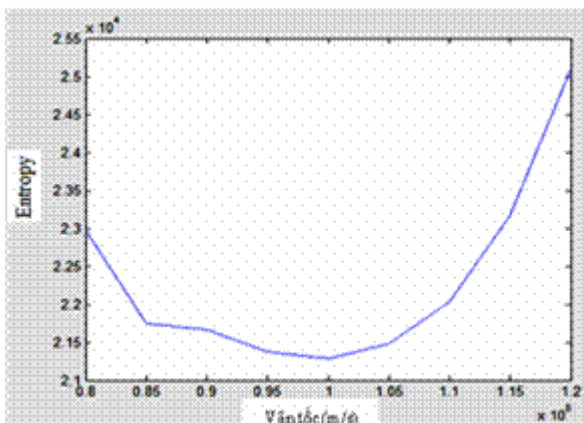
- Tính các giá trị Entropy của các lát cắt dịch chuyển với dải vận tốc từ 0,08 m/ns đến 0,120 m/ns, kết quả thu được đồ thị hình 8. Dựa vào đồ thị, có thể nhận thấy lát cắt dịch chuyển với  $v=0,100$  m/ns (Hình 7d) có giá trị Entropy cực tiểu, điều đó có nghĩa là  $v=0,100$  m/ns là vận tốc RMS đến đỉnh dị vật, sai số tùy thuộc vào bước lấy mẫu vận tốc (trong trường hợp này  $\Delta v=0,05$  m/ns).

- Kết hợp với các thông tin tiên nghiệm từ khu vực lấy số liệu: lớp nhựa đường sát mặt đất có bề dày 0,3 m với vận tốc truyền sóng là  $v=0,14$  m/ns, cũng có thể xem gần đúng là vận tốc khoảng của lớp nhựa đường. Thay vận tốc RMS đến đỉnh dị vật ( $v=0,100$  m/ns) và vận tốc khoảng của

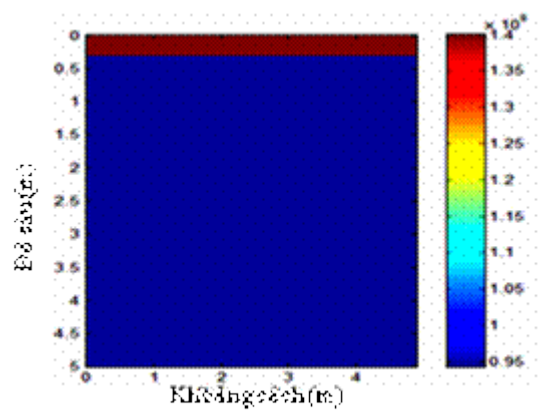
lớp nhựa đường vào hệ thức (9), tính được vận tốc khoảng của phân lớp chứa dị vật là 0,0943 m/ns.

- Dựa vào hai giá trị vận tốc khoảng của hai phân lớp nhựa đường và phân lớp chứa dị vật, chúng tôi xây dựng mô hình vận tốc khoảng của khu vực khảo sát (Hình 9). Áp dụng mô hình này vào dịch chuyển PSPI, kết quả thu được lát cắt như Hình 7i. Cả hai lát cắt áp dụng vận tốc RMS (Hình 7d) và vận tốc khoảng (Hình 7i) đều có tín hiệu tương đồng về vị trí và độ rộng tín hiệu. Giá trị Entropy của lát cắt sử dụng vận tốc khoảng nhỏ hơn giá trị Entropy của lát cắt sử dụng vận tốc RMS ( $2,0582 \times 10^4 < 2,1283 \times 10^4$ ), chứng tỏ độ nhiễu loạn tín hiệu ở lát cắt sử dụng vận tốc khoảng là nhỏ hơn.

Từ những nhận xét trên, chúng tôi rút ra kết luận sau: dị vật có kích thước  $\bar{U}$ -0,2m, nằm tại vị trí ( $z=1,9\text{m}$ ;  $x=3,1\text{m}$ ); vận tốc khoảng của phân lớp chứa dị vật là 0,0943m/ns, vận tốc RMS đến đỉnh dị vật là 0,100 m/ns.



Hình 8. Đồ thị Entropy.



Hình 9. Mô hình vận tốc khoảng.

#### IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Việc áp dụng dịch chuyển dời pha nội suy tuyến tính PSPI vào xử lý tài liệu GPR có những ưu điểm và nhược điểm như sau:

**1. Ưu điểm:** Lát cắt sau dịch chuyển có hệ trục tọa độ dạng (x-z), trực tiếp phản ánh độ sâu dị vật mà không cần phải thông qua bước chuyển đổi từ trục thời gian qua trục độ sâu như các loại dịch chuyển thời gian Sai phân Hữu hạn và dịch chuyển thời gian Kirchhoff. Bên cạnh đó, dịch chuyển PSPI có thể áp dụng cả hai loại vận tốc RMS và vận tốc khoảng, nhờ đó có thể tiến hành phân tích so sánh các kết quả để tìm ra cấu trúc phân lớp của môi trường khảo sát.

**2. Nhược điểm:** Dịch chuyển PSPI không thể xác định vận tốc khoảng của từng lớp nếu không có các thông tin tiên nghiệm hỗ trợ. Hơn nữa, phương pháp PSPI chưa thể tính được vị trí và hình dạng của phân dưới dị vật (trong trường hợp dị vật có kích thước lớn) vì khi áp dụng dịch chuyển, chúng tôi vẫn chưa tính đến biên thiên của trường vận tốc.

**Kiến nghị:** Công trình này cần được mở rộng nghiên cứu theo các hướng kết hợp với các phương pháp dịch chuyển khác, thu thập thêm thông tin tiên nghiệm, cũng như tính toán giá trị Entropy để xác định vận tốc RMS và các vận tốc khoảng của các phân lớp, từ đó hướng đến tính toán được vị trí và hình dạng của cả khối dị vật cũng như cấu trúc phân lớp của môi trường chứa dị vật.

#### VĂN LIỆU

**1. Daniel Flores-Tapia, Stephen Pistorius, 2010.** An Entropy-Based Propagation Speed Estimation Method for Near-Field Subsurface Radar Imaging. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Volume 2010, Article ID 636458, 13 pages.

**2. Jenő Gazdag, Piero Sguazzero, 1984.** Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. *Geophysics*, Vol. 49, No. 2. pp. 124-131.

3. **Lê Hoàng Kim, Lê Văn Anh Cường, Nguyễn Thành Ván, 2013.** Phương pháp dịch chuyển dãi pha nội suy tuyến tính sau cộng: Lý thuyết và ứng dụng. *TC Khoa học và Công nghệ Biển, số 3A, T.13.*
4. **Nguyen Thanh Van, Le Van Anh Cuong, Dang Hoai Trung, 2012.** Investigating sinkholes by ground penetrating radar in Ho Chi Minh city. *International conference on Applied Geophysics, Kanchanaburi, Thailand.*
5. **Nguyen Thanh Van, Nguyen Van Giang, Le Van Anh Cuong, Dang Hoai Trung, Vo Minh Triet, 2012.** Kirchhoff migration for specifying velocity model in ground penetrating radar method. *International conference on Ground Penetrating Radar (GPR), pp. 419-424, Shanghai, China.*
6. **Xiaoyin Xu and Eric Miller L., 2002.** Entropy Optimized Contrast Stretch to Enhance Remote Sensing Imagery. *Pattern Recognition, Proceedings, 16th International Conference, Volume 3, pp. 915-918.*