

# DỊCH CHUYỂN F-K VÀ ENTROPY CỰC TIỂU TRONG XỬ LÝ TÀI LIỆU RA ĐA XUYỀN ĐẤT

NGUYỄN THÀNH VÂN, NGUYỄN VĂN THUẬN, ĐẶNG HOÀI TRUNG

Khoa Vật lý - Vật lý Kỹ thuật, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên,

ĐH QG TP HCM, Nguyễn Văn Cừ, P.5, Tp. HCM

**Tóm tắt:** Việc sử dụng các phương pháp dịch chuyển trong địa chấn để xử lý số liệu ra đa xuyên đất đã được nhiều tác giả thực hiện: Szaraniec (1976, 1979); Ursin (1983), Lee và các cộng sự (1987); Zhdanov (1988). Cơ sở của phương pháp này là đưa trường sóng quan sát về đúng vị trí dị vật, khi đó năng lượng các điểm tán xạ hội tụ và dị vật được thể hiện rõ nét nếu áp dụng vận tốc của sóng điện từ chính xác. Tuy nhiên, việc xác định vận tốc chính xác để dịch chuyển rất khó khăn và tốn nhiều thời gian. Vì vậy, tác giả kết hợp phương pháp dịch chuyển F-K (frequency-wavenumber) và entropy cực tiểu để giải quyết vấn đề trên. Như vậy, quá trình xử lý số liệu GPR được thực hiện theo các bước sau. Thứ nhất, áp dụng dịch chuyển F-K vào xử lý số liệu GPR. Thứ hai, xác định vận tốc dịch chuyển chính xác theo entropy cực tiểu. Cuối cùng, độ sâu và kích thước của dị vật được xác định phục vụ cho công tác xây dựng bản đồ công trình ngầm Tp. Hồ Chí Minh.

## I. MỞ ĐẦU

Hiện nay, phương pháp ra đa xuyên đất được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu cấu trúc địa chất tầng nông, khảo sát công trình xây dựng, vẽ bản đồ công trình ngầm đô thị, khảo cổ, khoa học hình sự ... Vì vậy, việc xử lý số liệu GPR để tính kích thước và độ sâu dị vật vô cùng cấp thiết [1, 3, 5].

Thực tế thì vận tốc truyền sóng điện từ trong môi trường thay đổi phức tạp, theo phương thẳng đứng và phương ngang, nên việc xác định vận tốc này rất khó khăn. Trong bài báo, tác giả kết hợp phương pháp dịch chuyển F-K và entropy cực tiểu để xác định vận tốc truyền sóng, từ đó giải quyết hiệu quả bài toán xác định kích thước và độ sâu dị vật [2, 6, 7].

## II. DỊCH CHUYỂN F-K VÀ ENTROPY CỰC TIỂU

### 1. Dịch chuyển F-K

Phép dịch chuyển góc nghiêng trong miền F-K được thực hiện bởi Stolt năm 1978 [4, 6].

Giả thuyết dữ liệu trường sóng  $P(x, z, t)$  đã đưa về dạng zero – offset và thỏa mãn phương trình sóng vô hướng:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) P(x, z, t) = 0 \quad (1)$$

Trong đó:  $x$  là vị trí trên trục nằm ngang;  $z$  là chiều sâu;  $t$  là thời gian hai lần sóng truyền;  $v$  là vận tốc truyền sóng trong môi trường.

Bằng phép biến đổi Fourier, ta biến đổi trường sóng theo thời gian và không gian sang miền tần số và số sóng:

$$P(k_x, z, \omega) = \iint P(x, z, t) e^{-i(\omega t - k_x x)} dx dt \quad (2)$$

Hoặc xác định trường sóng bằng phép biến đổi Fourier ngược:

$$P(x, z, t) = \iint P(k_x, z, \omega) e^{i(\omega t - k_x x)} dk_x d\omega \quad (3)$$

Trong đó:  $k_x$  là số sóng ứng với  $x$ ;  $\omega$  là tần số góc.

Thay hệ thức (3) vào (1), ta được:

$$\iint \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} P(k_x, z, \omega) - \left( \frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \right) P(k_x, z, \omega) \right] e^{i(\omega t - k_x x)} dk_x d\omega = 0 \quad (4)$$

Thu gọn hệ thức (4):

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} P(k_x, z, \omega) = k_x^2 P(k_x, z, \omega) \quad (5)$$

$$\text{với: } k_x^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2 \quad (6)$$

Trường sóng quan sát và trường sóng dịch chuyển được xác định bởi hệ thức:

$$P(x, z=0, t) = \iint P(k_x, z=0, \omega) e^{i(\omega t - k_x x)} dk_x d\omega \quad (7)$$

$$P(x, z, t=0) = \iint \theta(k_x, k_x, t=0) e^{i(k_x z - k_x x)} dk_x dk_x \quad (8)$$

$$\theta(k_x, k_x, t=0) = \left[ \frac{v}{2} \frac{k_x}{\sqrt{k_x^2 + k_x^2}} \right] P(k_x, z=0, \omega = \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_x^2}) \quad (9)$$

Như vậy, quá trình dịch chuyển F-K trong miền không - thời gian là phép ánh xạ  $P(k_x, z=0, \omega)$  thành  $\theta(k_x, k_x, t=0)$  trong miền tần số - số sóng. Đây chính là nguyên lý dịch chuyển F-K.

Công thức (9) là cơ sở để tính dịch chuyển trường sóng bằng phương pháp F-K. Sau đó, dùng phép biến đổi Fourier ngược trong công thức (8) để xác định trường sóng dịch chuyển trong miền không thời gian.

## 2. Entropy cực tiểu [2, 6]

Về mặt toán học, có thể biểu diễn tín hiệu mặt cắt GPR theo hệ thức:

$$X = R + S + B \quad (10)$$

Trong đó, X, R, S, B: biểu diễn tín hiệu dưới dạng mảng có kích thước M x N. X là tín hiệu ghi nhận trong mặt cắt GPR; R là nhiễu nền; S là tín hiệu có ích phản xạ từ vật thể; B là các nhiễu giao thoa.

Tại mỗi vị trí của anten thu, năng lượng của các tín hiệu được ghi nhận bởi hệ thức:

$$D(n) = \sum_{m=1}^M X^2(m, n); \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

Theo nguyên lý hoạt động phương pháp GPR, vật thể chôn vùi cho nhiều tín hiệu phản xạ hơn, do đó làm tăng năng lượng tín hiệu ghi nhận tại anten thu. Chính vì vậy, nó cho biết vị trí vật thể bị chôn vùi. Tuy nhiên, năng lượng thường bị ảnh hưởng bởi nhiễu đo đạc và nhiễu hỗn loạn trong mặt cắt GPR. Để tăng tín hiệu có ích, ta phải loại bỏ các nhiễu hỗn loạn R. Các phương pháp thường sử dụng trong loại nhiễu hỗn loạn là phương pháp trung bình hóa, hoặc trung bình cộng sóng số liệu thu thập.

Trong xử lý ảnh, entropy chỉ độ hỗn loạn của điểm ảnh và xác định khối lượng thông tin ngẫu nhiên cung cấp trong mặt cắt GPR. Entropy lớn ứng với độ hỗn loạn lớn và ngược lại. Giả sử, mặt cắt X (công thức 10) có các giá trị rời rạc 1, 2, 3... với xác suất tương ứng là  $p_1, p_2, p_3 \dots$  thì entropy được xác định theo biểu thức (Shannon, 1948):

$$E(X) = - \sum_i p_i \log p_i \quad (12)$$

Entropy tính theo công thức (12) có hai vấn đề: thứ nhất, nó mất nhiều thời gian để tính toán xác suất  $p_i$  nếu hình ảnh lớn; thứ hai, khi giá trị rời rạc  $X$  được xác định thì xác suất  $p_i = 0$ , do vậy không thể tính toán entropy. Để loại bỏ hai vấn đề trên, chúng ta sử dụng công thức xấp xỉ entropy gọi là chỉ số biến thiên cực trị:

$$E(X) = \frac{\left[ \sum_m^M \sum_n^N X^2(m,n) \right]^2}{\sum_m^M \sum_n^N X^4(m,n)} \quad (13)$$

Nếu entropy đạt cực tiểu, các nhiễu loạn là thấp nhất. Quá trình trên được tóm tắt theo các bước như sau:

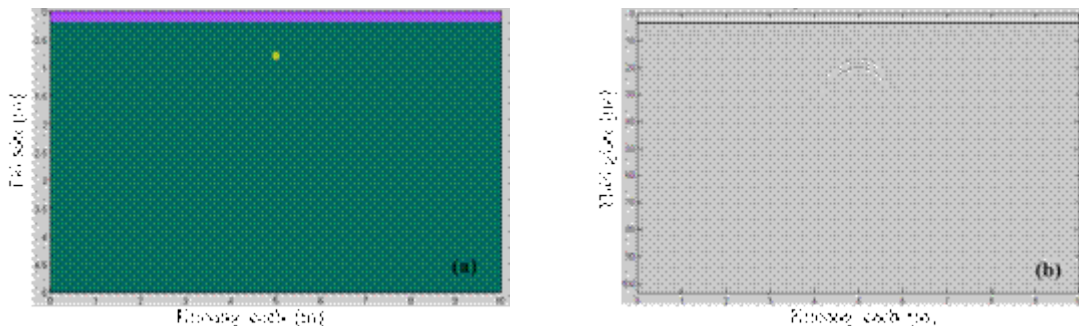
- Bước 1: Hiệu chỉnh, lọc nhiễu và khuếch đại.
- Bước 2: Dịch chuyển số liệu với vận tốc  $v_1$ .
- Bước 3: Tính entropy  $E_1$ .
- Bước 4: Lặp lại các bước 2 và 3 với các vận tốc  $v_i$ ,  $i = 2, 3, 4, \dots$
- Bước 5: Xây dựng biểu đồ biểu diễn sự thay đổi  $E$  theo  $v$ ; xác định entropy cực tiểu  $E_m$  và vận tốc đúng  $v_m$  tương ứng.
- Bước 6: Dịch chuyển số liệu với giá trị vận tốc  $v_m$ .
- Bước 7: Xác định độ sâu, kích thước dị vật.

### III. NGHIÊN CỨU TRÊN MÔ HÌNH LÝ THUYẾT VÀ THỰC TẾ ĐỂ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

#### 1. Mô hình lý thuyết

Hình 1a biểu diễn mô hình hai lớp có dị vật là trụ bê tông. Mô hình hai lớp gồm:

- Lớp 1: độ sâu từ  $z = 0$  m đến  $z = 0,2$  m, vận tốc truyền sóng  $v_1 = 0,122$  m/ns.

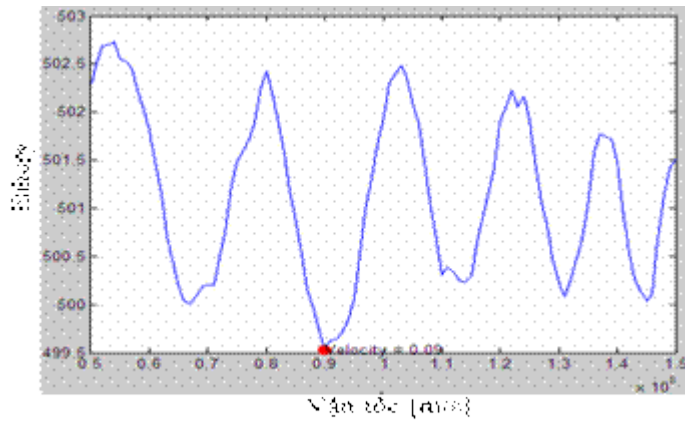


Hình 1. (a) Mô hình hai lớp; (b) Mặt cắt GPR mô hình hai lớp.

- Lớp 2: độ sâu từ  $z = 0,2$  m đến  $z = 5$  m, vận tốc truyền sóng  $v_2 = 0,075$  m/ns. Lớp thứ hai có dị vật là trụ bê tông có đường kính  $\Phi = 160$  mm, tọa độ tâm tại  $(x = 3$  m;  $z = 0,8$  m).

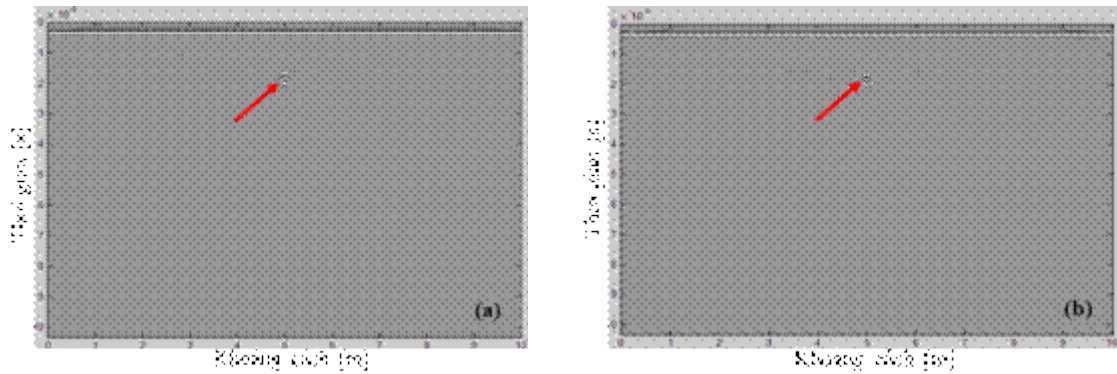
Quan sát mặt cắt GPR (Hình 1b), ta xác định rõ tín hiệu hyperbol tại vị trí  $x = 5$  m,  $t = 17,9$  ns. Dựa vào thông tin trên, ta tính được vận tốc căn quân phương của môi trường bên trên dị vật là  $v = 0,0859$  m/ns. Dịch chuyển mặt cắt với vận tốc căn quân phương, ta được kết quả Hình 3a.

Sử dụng nguyên lý entropy cực tiểu để xác định vận tốc truyền sóng, ta chọn giới hạn vận tốc truyền sóng thay đổi trong khoảng 0,05 m/ns đến 0,15 m/ns với bước nhảy 0,001 m/ns. Bằng các bước tính toán trong mục 2.2, ta biểu diễn entropy theo vận tốc bằng đồ thị Hình 2.



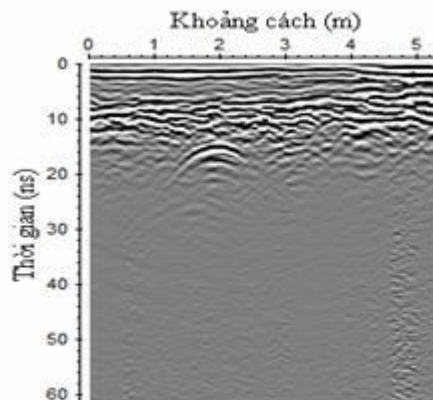
Hình 2. Đồ thị biểu diễn sự thay đổi entropy theo vận tốc truyền sóng.

Hình 2 cho thấy entropy liên tục thay đổi theo vận tốc truyền sóng. Entropy đạt cực tiểu khi vận tốc truyền sóng  $v = 0,09$  m/ns. Vận tốc này không lệch nhiều so với vận tốc căn quân phương tính được. Thực hiện dịch chuyển mặt cắt với vận tốc vừa tìm được, ta được kết quả như Hình 3b.



Hình 3. Mặt cắt dịch chuyển: (a)  $v = 0,0859$  m/ns; (b)  $v = 0,09$  m/ns.

Hình 3 cho thấy hai mặt cắt dịch chuyển khá tương đồng vì vận tốc dịch chuyển trong hai mặt cắt lệch nhau nhỏ. Sai số tính được trong trường hợp này là 4,77%. Để đánh giá độ chính xác các kết quả trên, ta tính năng lượng hai trường hợp theo công thức (11). Năng lượng tương ứng với vận tốc căn quân phương và vận tốc tính theo entropy cực tiểu lần lượt là 0,0282 và 0,0277. Năng lượng tính theo vận tốc căn quân phương lớn hơn vận tốc tính toán không đáng kể. Do đó, vận tốc tính theo entropy cực tiểu hoàn toàn được chấp nhận và nằm trong giới hạn sai số cho phép (dưới 10%).



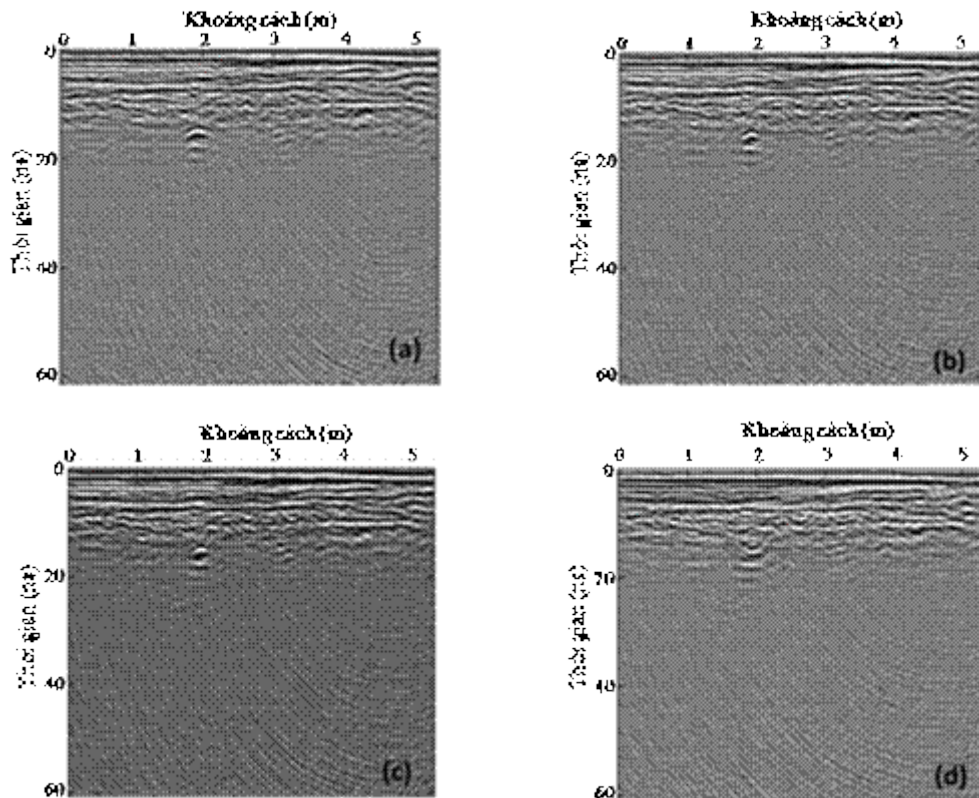
Hình 4. Mặt cắt GPR tuyến T84 trước số nhà A11 đường Nguyễn Thành Hiền.

## 2. Số liệu thực tế

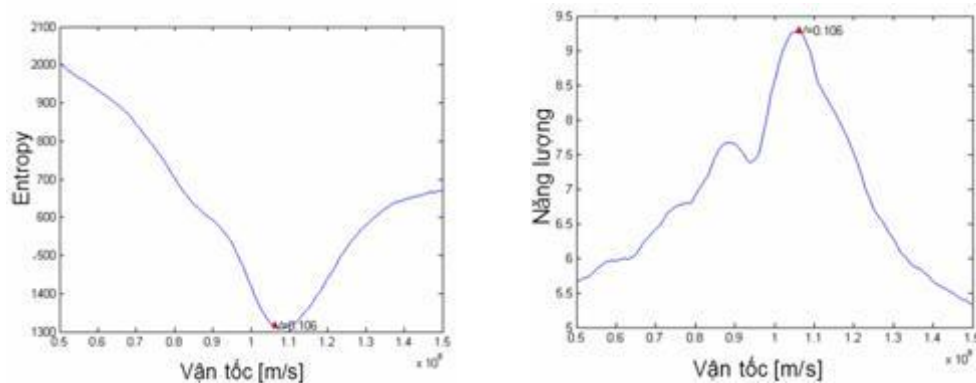
**a) Tính kích thước độ sâu ống cấp nước tại Tp. Hồ Chí Minh:**

Số liệu được đo đạc bằng thiết bị Detector Duo (IDS, Ý), tần số Anten 700 MHz. Tuyến T84 thực hiện trước nhà số A11 đường Nguyễn Thần Hiến, Quận 4, Tp Hồ Chí Minh (Hình 4). Quan sát mặt cắt GPR tuyến T84, ta xác định tín hiệu hyperbol tại vị trí  $x = 2$  m,  $t = 14$  ns.

Áp dụng dịch chuyển F-K với các vận tốc  $v = 0,09$  m/ns;  $0,1$  m/ns;  $0,105$  m/ns;  $0,12$  m/ns, ta được kết quả như Hình 5. Hình 5a, b có hyperbol cong xuống, cho thấy vận tốc dịch chuyển bé hơn vận tốc môi trường; Hình 5d xuất hiện hyperbol cong lên: vận tốc dịch chuyển lớn hơn vận tốc truyền sóng trong môi trường; Hình 5c cho thấy hyperbol hội tụ: vận tốc dịch chuyển đúng với vận tốc truyền sóng trong môi trường.



Hình 5. Mặt cắt dịch chuyển với các vận tốc: (a)  $v = 0,09$  m/ns; (b)  $0,1$  m/ns; (c)  $0,105$  m/ns; (d)  $0,12$  m/ns.



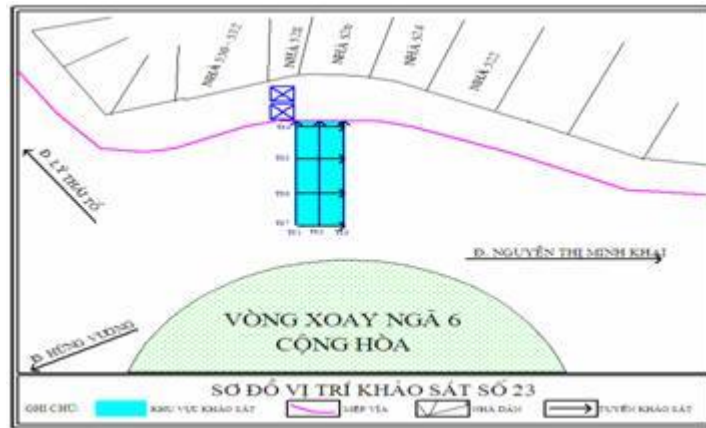
Hình 6. (a) Biểu đồ entropy; (b) Biểu đồ năng lượng.

Ngoài việc so sánh các mặt cắt dịch chuyển, ta có thể sử dụng chuẩn entropy cực tiểu và giản đồ năng lượng (Hình 6) để xác định vận tốc truyền sóng. Vận tốc môi trường xác định được ứng với entropy cực tiểu và năng lượng cực đại là  $0,106$  m/ns. Kích thước và độ sâu đường ống tính

được là  $\Phi = 185 \text{ mm}$  và  $0,74 \text{ m}$ . Kết quả này được Công ty TNHH Công trình thoát nước và Hạ tầng Đô thị M.A.T đánh giá cao và hoàn toàn chấp nhận được vì sai số chỉ 7,5%.

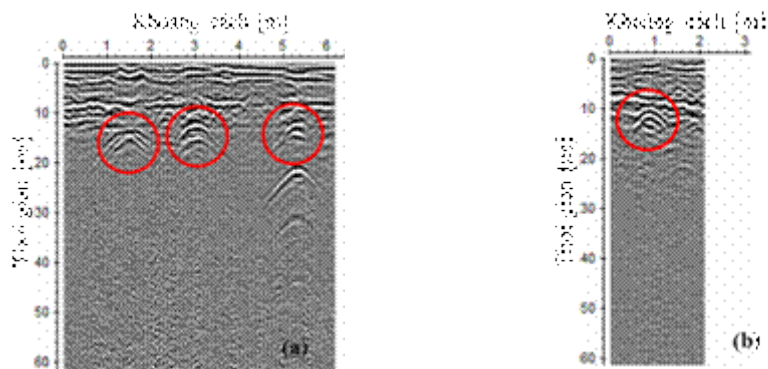
**b) Xây dựng bản đồ công trình ngầm tại Tp. Hồ Chí Minh:**

Số liệu đo đạc tại điểm khảo sát thứ 23, thuộc công trình "Sửa chữa tuyến ống cấp II, đường Võ Văn Tần – Nguyễn Thị Minh Khai, Quận 3, Tp Hồ Chí Minh" do Công ty cấp nước Wadeco thực hiện tháng 2 năm 2014. Công trình gồm 24 điểm khảo sát thu thập số liệu bằng thiết bị Detector Duo (hãng IDS, Ý), kéo dài từ Công trường Quốc tế đến Ngã sáu Cộng hòa. Dưới đây, tác giả xử lý và minh giải điểm khảo sát số 23 (Hình 7): xác định vị trí, độ sâu và kích thước dị vật, nhằm phục vụ công tác thi công sửa chữa công trình ngầm cũ, lắp đặt công trình ngầm mới và sau đó xây dựng bản đồ công trình ngầm tại Tp. HCM.

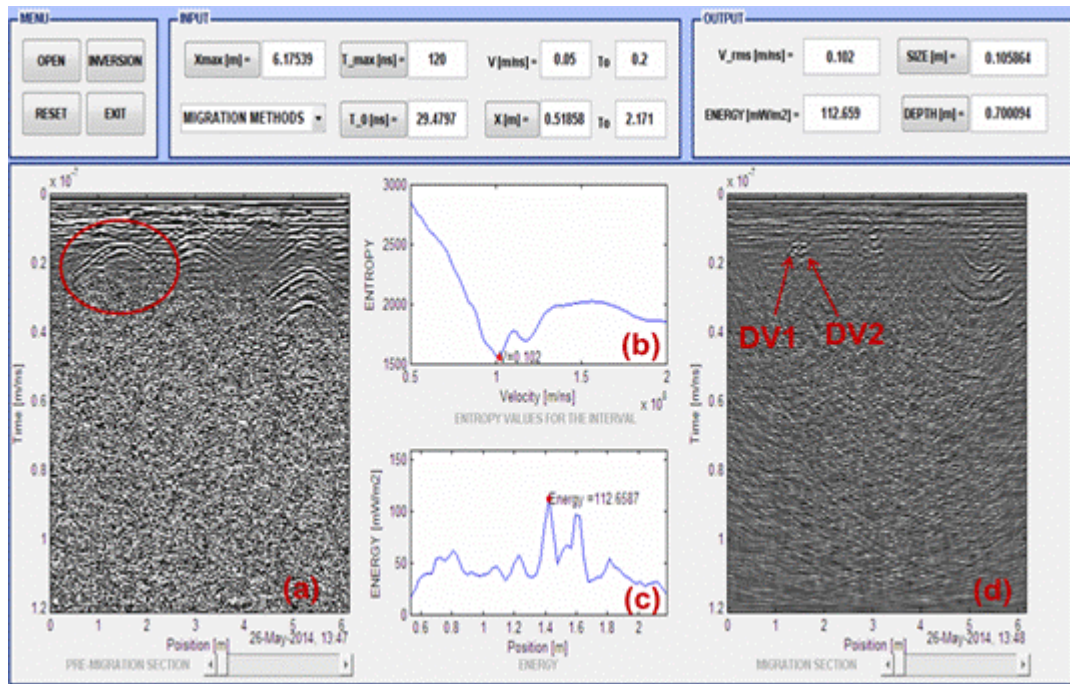


Hình 7. Sơ đồ vị trí và tuyến khảo sát vị trí dò tìm 23.

Các tuyến cắt ngang xuất hiện tín hiệu hyperbol tại vị trí  $x = 1,4 \text{ m}$ ,  $t = 13 \text{ ns}$ ,  $x = 3 \text{ m}$ ,  $t = 11 \text{ ns}$  và  $x = 5,4 \text{ m}$ ,  $t = 12 \text{ ns}$  (T82) (Hình 8a). Tuyến dọc T84 xuất hiện tín hiệu hyperbol tại vị trí  $x = 0,9 \text{ m}$ ,  $t = 10 \text{ ns}$  (Hình 8b), các tuyến dọc khác không có tín hiệu hyperbol. Thực hiện xử lý số liệu bằng dịch chuyển F-K và entropy cực tiểu, tác giả được các kết quả như Hình 9, 10, 11.

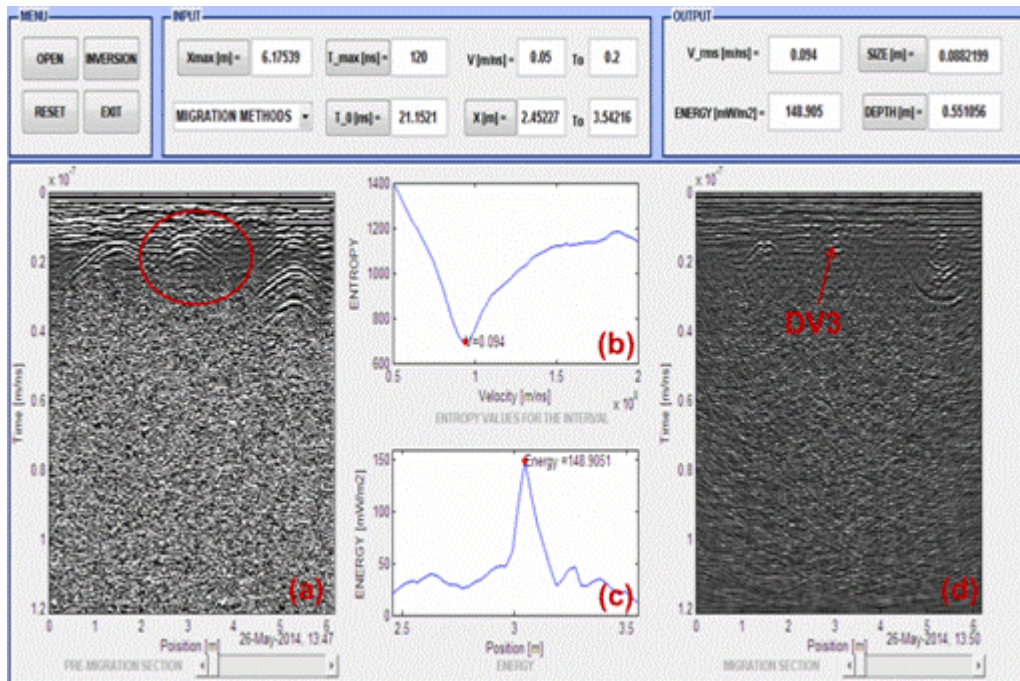


Hình 8: Mặt cắt GPR tại vị trí dò tìm 23: (a): tuyến ngang T82; (b): tuyến dọc T84.



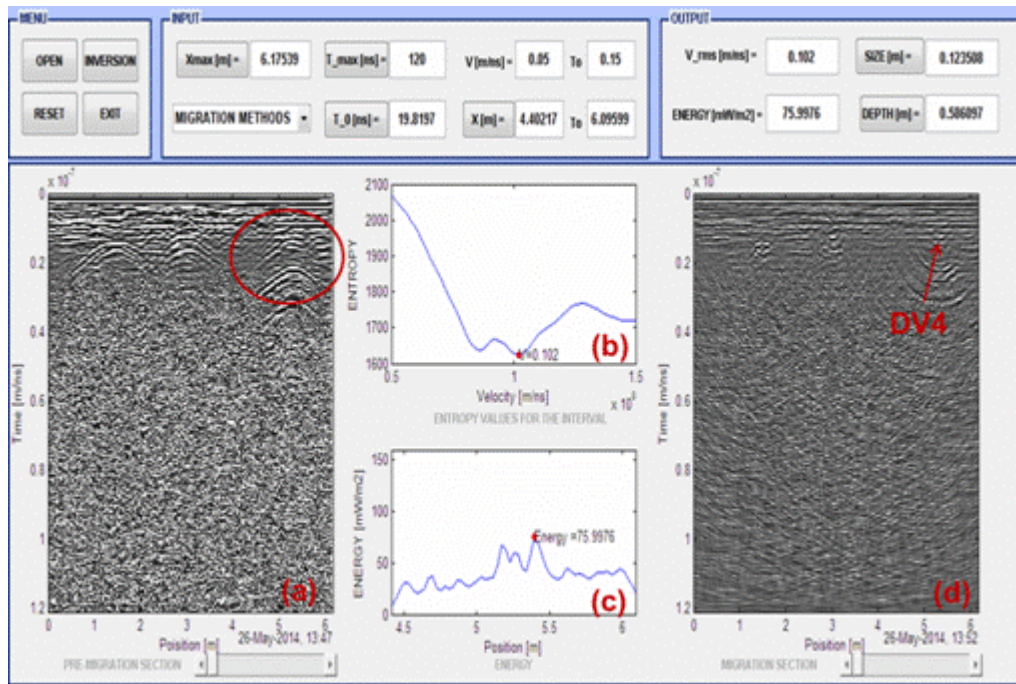
Hình 9. Kết quả xử lý tín hiệu hyperbol thứ nhất.

Hyperbol thứ nhất (Hình 9a) là tín hiệu hyperbol chùng chập nên không xác định được số lượng dị vật. Kết quả xử lý (Hình 9d) cho thấy tín hiệu hyperbol hội tụ thành hai điểm ứng với hai dị vật gần nhau. Giá trị vận tốc tính được là 0,102 m/ns (Hình 9b). Kích thước và độ sâu tương ứng của hai dị vật là  $\Phi = 106 \text{ mm}$  và 0,7 m.



Hình 10. Kết quả xử lý tín hiệu hyperbol thứ hai.

Tại hyperbol thứ hai, ta tính được vận tốc truyền sóng là 0,094 m/ns, cho thấy vận tốc môi trường thay đổi theo phương ngang. Kích thước và độ sâu dị vật tính được là  $\Phi = 88 \text{ mm}$  và 0,55 m (Hình 10).



Hình 11. Kết quả xử lý tín hiệu hyperbol thứ ba.

Tại hyperbol thứ ba, ta tính được vận tốc truyền sóng là 0,102 m/ns. Kích thước và độ sâu dị vật tính được là  $\Phi = 124$  mm và 0,59 m (Hình 11).

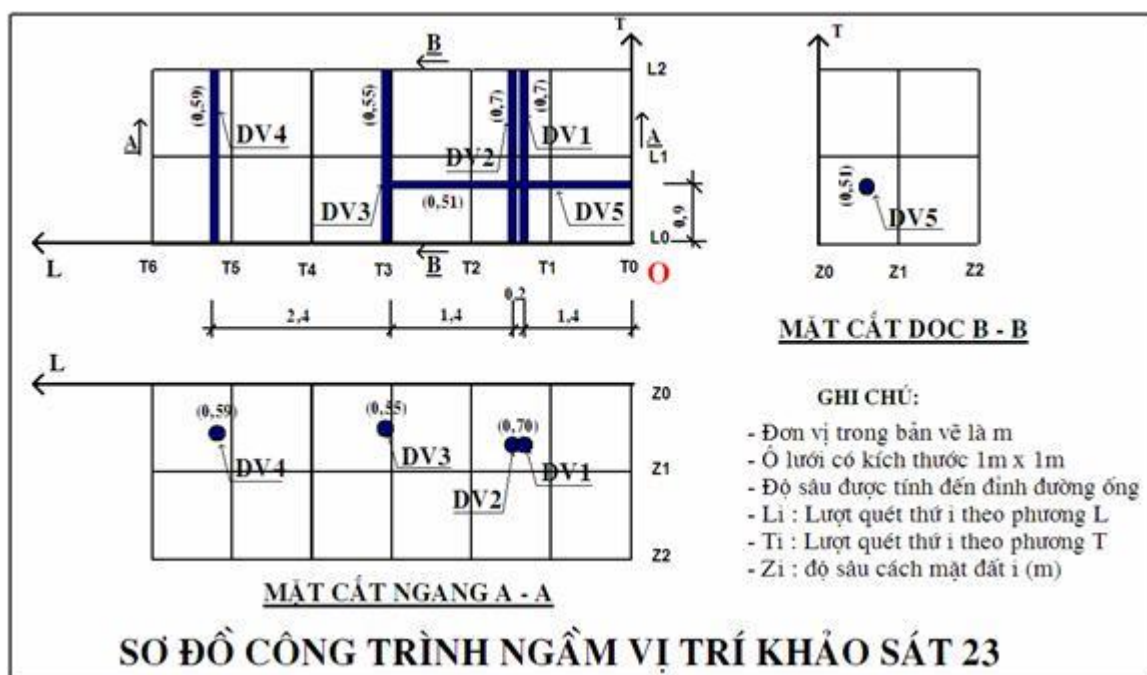
Tương tự, ta xử lý số liệu các tuyến ngang và các tuyến dọc còn lại. Kết quả xử lý được trình bày theo Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả xử lý điểm khảo sát số 23

Tên DV	Vị trí (m)	Vận tốc (m/ns)	Năng lượng	Đường kính (mm)	Độ sâu (m)
DV1	1,4	0,102	112,6	106	0,70
DV2	1,6	0,102	112,6	106	0,70
DV3	3,0	0,094	148,9	88	0,55
DV4	5,4	0,102	76	123	0,59
DV5	0,9	0,094	136,6	90	0,51

Tổng hợp kết quả trên, ta xây dựng bản vẽ công trình ngầm như Hình 12. Bản đồ công trình ngầm giúp xác định vị trí và phương kéo dài của các dị vật. Dựa vào đó, các đơn vị thi công xác định được đối tượng dị vật cần sửa chữa, cải tạo hoặc lắp đặt công trình ngầm mới. Nhờ đó, quá trình thi công sẽ tránh được các rủi ro và tai nạn đáng tiếc.





Hình 12. Sơ đồ công trình ngầm vị trí khảo sát 23.

#### IV. KẾT QUẢ - THẢO LUẬN

Với những kết quả tính toán tại Tp. Hồ Chí Minh, việc kết hợp phương pháp dịch chuyển F-K, entropy cực tiểu và năng lượng là thiết thực và hữu ích. Trước tiên, áp dụng phương pháp dịch chuyển F-K trong quá trình xử lý dữ liệu GPR nhằm nâng cao chất lượng các mặt cắt GPR. Sau đó, tính toán entropy và năng lượng tương ứng với từng giá trị vận tốc dịch chuyển. Giá trị entropy cực tiểu và năng lượng cực đại sẽ đánh giá mức độ hội tụ của tín hiệu trong mặt cắt GPR, từ đó xác định vận tốc truyền sóng điện từ. Cuối cùng, bài toán xác định độ sâu và kích thước dị vật được giải quyết phục vụ các công tác ứng dụng của phương pháp GPR.

#### VĂN LIỆU

1. **Giang N.V., Van N.T., Trung D.H., Jarzyna J., Zietek J., Sylwia-Suchon T., 2012.** Investigation of sinkholes on the roads by GPR: Application to HCM city, Vietnam. *Proceeding of International conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, pp. 443-447, Shanghai, China.
2. **Huilin Xhou, Xing Wan, Wei Li, Yuling Jiang, 2011.** Combining F-K filter with minimum entropy Stolt migration algorithm for subsurface object imaging and background permittivity stimulation. *Procedia Engineer* 23:636- 641.
3. **Jol H.M, 2009.** Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Oxford, UK, p.365J. *Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.*
4. **Stolt R.H, 1978.** Migration by Fourier Transform. *Geophysics*: 43, 23-48.
5. **Van N.T., Giang N.V., 2013.** Ground Penetrating Radar - Fundamentals and Applications. *VNU Press, 222 pages.*
6. **Xiaoyin Xu, Eric L. Miller, 2002.** Entropy optimized contrast stretch to enhance remote sensing imagery. *Boston, MA, USA.*
7. **Zhou H., Sato M., Senior Member, IEEE, and Liu H., 2005.** Migration Velocity Analysis and Prestack Migration of Common-Transmitter GPR Data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 43, no. 1, pp.86-91.*

