

Kết hợp phương pháp dịch chuyển Kirchhoff và biểu đồ năng lượng trong xử lý tài liệu ra đa xuyên đất

- Nguyễn Thành Ván
- Nguyễn Văn Thuận
- Đặng Hoài Trung

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 12 tháng 05 năm 2015, nhận đăng ngày 20 tháng 10 năm 2015)

TÓM TẮT

Dịch chuyển Kirchhoff trong ra đa xuyên đất (GPR) là kỹ thuật biến đổi các tín hiệu tán xạ trên mặt cắt chưa dịch chuyển thành điểm, do vậy các tín hiệu phản xạ sẽ được đưa về vị trí đúng, tạo ra hình ảnh phản ánh chính xác cấu trúc địa chất bên dưới mặt đất. Ngày nay, phạm vi ứng dụng của dịch chuyển Kirchhoff đã được mở rộng và nó đang trở thành một công cụ để xác định vận tốc truyền sóng điện từ. Để tối ưu hóa thuật toán này, chúng tôi đề nghị sử dụng biểu đồ

Từ khóa: dịch chuyển Kirchhoff, ra đa xuyên đất, xử lý ảnh, biểu đồ năng lượng

năng lượng như một tiêu chuẩn để tính toán vận tốc truyền sóng đúng. Sử dụng các mô hình lý thuyết, chúng tôi chứng tỏ rằng vận tốc tính được theo phương pháp này hoàn toàn tương đồng với vận tốc căn quân phương đến đỉnh của mục tiêu. Các kết quả trên dữ liệu thực tế cho thấy mặt cắt sau dịch chuyển được cải thiện, kích thước cũng như độ sâu của các dị vật được xác định với độ tin cậy cao.

MỞ ĐẦU

Xác định vận tốc sóng điện từ lan truyền trong môi trường là một trong những bước quan trọng nhất của việc xử lý tín hiệu ra đa xuyên đất (GPR), giúp tính chính xác độ sâu và kích thước của các dị thường và tăng tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu trong mặt cắt sau dịch chuyển. Có nhiều phương pháp xác định vận tốc truyền sóng, nhưng độ chính xác còn chưa cao hoặc khó thực hiện ngoài hiện trường [1]. Bài báo sẽ trình bày việc kết hợp dịch chuyển Kirchhoff [2] với biểu đồ năng lượng để phát huy tối đa hiệu quả xác định vận tốc truyền sóng điện từ. Khi dịch chuyển theo vận tốc đúng, mặt cắt GPR sẽ hội tụ và có năng lượng đạt cực đại.

PHƯƠNG PHÁP

Phương pháp dịch chuyển Kirchhoff

Cơ sở lý thuyết của phương pháp này dựa vào nguyên lý Huyghen-Fresnel và bài toán Kirchhoff: các ranh giới phản xạ được xem như tập hợp các điểm tán xạ, khi sóng tới kích động vào, chúng trở thành các trung tâm phát sóng cầu thứ cấp, phát ra các dao động tán xạ gửi về các điểm khác nhau dọc theo tuyến quan sát x [2]. Dao động sóng từ các điểm tán xạ khác nhau (nằm trong mặt cắt địa chất) khi phát triển đến mặt đất, sẽ giao thoa với nhau và tạo thành trường sóng tổng ghi được dọc tuyến quan sát dưới dạng các sóng phản xạ.

Như vậy, có thể xem các xung sóng phản xạ ghi được tại điểm x_i bất kì trên tuyến quan sát là tổng của các phần đóng góp do các điểm tán xạ khác nhau nằm trên ranh giới phản xạ gửi về điểm quan sát.

Bài toán Kirchhoff đã được Sneider (1978) và Scales (1995) giải cho trường thế vô hướng – sóng dọc có dạng [3]:

$$P_D(x_D, z_D, t) = \frac{1}{2\pi} \int \left[\frac{\cos\theta}{r^2} P\left(x - x_D, z = 0, t - \frac{r}{v}\right) + \frac{\cos\theta}{rv} \frac{\partial}{\partial t} P\left(x - x_D, z = 0, t - \frac{r}{v}\right) \right] dk \quad (1)$$

Trong đó: (x_D, z_D) là tọa độ của điểm tán xạ sóng; $(x, 0)$: tọa độ của điểm quan sát, r : khoảng cách từ điểm quan sát đến điểm tán xạ với $r^2 = (x - x_D)^2 + z_D^2$; θ : góc giữa tia ló và phương pháp tuyến của mặt quan sát; $P(x, z = 0, t)$: trường sóng thu được trên mặt đất.

Về mặt lý thuyết, phép biến đổi tán xạ cho phép cải thiện chất lượng các lát cắt địa chấn nhờ ba hiệu ứng sau:

- Hiệu ứng dịch chuyển không gian đảm bảo đưa trường sóng phân tán không phân giải ở mặt đất về trường sóng hội tụ tại các điểm phản xạ.
- Hiệu ứng phân giải đảm bảo phân chia trường sóng tổng thành các trường sóng riêng biệt liên quan đến từng điểm phản xạ sóng trong môi trường.
- Hiệu ứng khử nhiễu đặc biệt là khử các nhiễu ngẫu nhiên do cộng tích lũy.

Để đạt được các hiệu ứng mong muốn trên thì ba yếu tố cần được lựa chọn một cách hợp lý là độ rộng đáy cộng, trọng số cộng và vận tốc cộng.

Biểu đồ năng lượng

Mặt cắt GPR hiển thị trên máy tính là kết quả thu nhận tín hiệu theo các phương pháp số hóa trong thiết bị đo đạc GPR. Quá trình lưu trữ, hiển thị giúp quản lý và quan sát số liệu dễ dàng. Cách biểu diễn hình ảnh thông dụng nhất hiện nay là

mô hình raster. Với cách biểu diễn này, ảnh được biểu diễn dưới dạng ma trận các điểm (điểm ảnh tương ứng biên độ sóng GPR). Do đó, mặt cắt X được mô tả bằng một ma trận kích thước $(M \times N)$ [4]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ở đây x_{ij} là mẫu thứ i ở đường ghi thứ j .

Tín hiệu mặt cắt GPR có thể chia làm ba loại: nhiễu giao thoa, nhiễu nền và tín hiệu có ích phản xạ từ vật thể [5]. Nhiễu giao thoa xuất hiện thường trực trên hình ảnh như tín hiệu phản xạ mặt cắt GPR. Nhiễu nền bao gồm các nhiễu đo đạc, nhiễu hỗn loạn trong mặt cắt GPR. Các tín hiệu có ích là tín hiệu phản xạ từ vật thể trong mặt cắt GPR. Có thể biểu diễn mặt cắt thu thập dưới dạng toán học [5]:

$$X = R + S + B \quad (3)$$

Trong đó, X , R , S và B có kích thước giống nhau $M \times N$ tương ứng với tín hiệu của mặt cắt thu thập, nhiễu hỗn loạn, tín hiệu phản xạ từ vật thể và nhiễu đo đạc. Đặc biệt $x(i, j)$ biểu diễn mẫu thời gian thứ i tại vị trí thứ j của anten hoặc anten thứ j của dãy sensor.

Lựa chọn vùng quan tâm

Từ mặt cắt thu thập X , có thể chọn vùng quan tâm có chứa tín hiệu hyperbol phản xạ từ vật thể. Từ đây, xác định số lượng bước mẫu trong vùng quan tâm và biểu diễn chúng thành mặt cắt Y . Tương tự mặt cắt X , vùng quan tâm Y ($Y \subseteq X$) được biểu diễn thành mảng hai chiều có kích thước $K \times Q$ ($K < M$, $Q < N$).

Quá trình lựa chọn vùng Y sẽ hạn chế nhiễu và loại bỏ các tín hiệu không quan tâm. Dựa vào đó, quá trình tính toán năng lượng tín hiệu phản xạ được thực hiện nhanh chóng, giúp quá trình xử lý chính xác hơn.

Dò tìm năng lượng

Tại mỗi vị trí của anten, máy dò năng lượng tính toán năng lượng của tín hiệu ghi nhận bởi hệ thức [5]:

$$D(j) = \sum_{i=1}^M x^2(i, j) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Theo nguyên tắc vật lý, một vật thể bị chôn vùi sẽ tạo ra nhiều phản xạ hơn môi trường xung quanh, do đó làm tăng năng lượng của tín hiệu thu. Khi bắt gặp nơi có năng lượng tăng lên đáng kể, đó có thể là một dị vật. Nhưng việc ghi nhận năng lượng lại dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu đo đạc và nhiễu tạp trong mặt cắt. Bởi vậy, đầu tiên là cần nâng cao chất lượng hình ảnh bằng cách tiến hành loại bỏ nhiễu R trong dữ liệu trước khi tính năng lượng. Sau khi loại nhiễu tạp bằng các phương pháp trung bình trượt hoặc trung bình cộng đối với số liệu thô, năng lượng tín hiệu được ghi nhận bởi hệ thức (4).

Cách tính năng lượng như trên sẽ mất nhiều thời gian, do vậy, lựa chọn vùng quan tâm Y giúp việc tính năng lượng nhanh chóng hơn. Có thể tính năng lượng của tín hiệu của vùng này theo hệ thức:

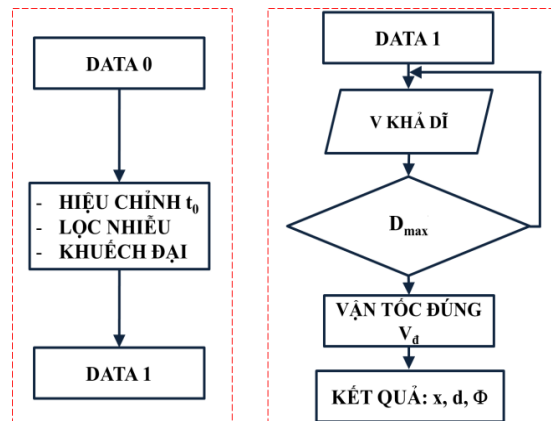
$$D_Y(j) = \sum_{i=1}^K y^2(i, j) \quad j = 1, 2, \dots, Q \quad (5)$$

Trong quá trình xử lý dịch chuyển, ứng với mỗi giá trị vận tốc thì mặt cắt xử lý sẽ thay đổi. Do đó, giá trị năng lượng của mặt cắt cũng thay đổi. Như đã trình bày, năng lượng sẽ đạt giá trị lớn nhất (năng lượng đáng kể) khi anten thu được nhiều tín hiệu phản xạ từ vật thể. Bằng phép so sánh, có thể nhanh chóng xác định giá trị năng lượng cực đại và vị trí tương ứng của vật thể trên mặt cắt dịch chuyển, từ đó, suy ra giá trị vận tốc dịch chuyển tương ứng. Việc sử dụng biểu đồ năng lượng giúp xác định mặt cắt dịch chuyển tối

ưu có vận tốc đúng nhất, từ đó tính toán kích thước, độ sâu của dị vật.

Quy trình xác định vận tốc truyền sóng điện từ

Việc tối ưu hóa thuật toán dịch chuyển sử dụng biểu đồ năng lượng cực đại được mô tả theo lưu đồ trong Hình 1. Trước tiên, số liệu GPR phải được xử lý qua các bước cơ bản như: hiệu chỉnh thời gian, khử nhiễu và khuếch đại để làm nổi bật tín hiệu quan tâm [6]. Sau đó, tiến hành bước dịch chuyển số liệu GPR với vận tốc v_1 , sẽ tính được giá trị năng lượng D_1 tương ứng của mặt cắt. Tiếp tục như vậy với các vận tốc khác nhau, sẽ xây dựng được biểu đồ thể hiện sự thay đổi giá trị năng lượng của mặt cắt GPR sau dịch chuyển. Nếu giá trị năng lượng cực đại thì hình ảnh ít nhiễu loạn nhất, khi đó, vận tốc sử dụng trong bước dịch chuyển là vận tốc truyền sóng điện từ trong môi trường đến đỉnh dị vật. Từ kết quả này, sẽ xác định được độ sâu và kích thước của dị vật với sai số nhỏ nhất.



Hình 1. Quy trình xử lý tài liệu GPR

KẾT QUẢ**Số liệu mô hình lý thuyết**

Sử dụng anten tần số 700 MHz, mô hình gồm ba lớp có tính chất điện khác nhau. Dị vật là ống kim loại, bên trong là không khí (Hình 2A):

Lớp 1: lớp nhựa đường dày 0,2 m, điện trở suất $\rho = 100000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$, $\mu_r = 1,0069$ ($v_1 = 0,15 \text{ m/ns}$).

Lớp 2: lớp đá dăm dày 0,4 m có điện trở suất $\rho = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$, $\mu_r = 1,0$ ($v_2 = 0,095 \text{ m/ns}$).

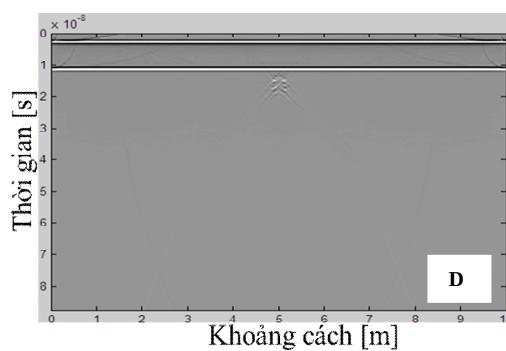
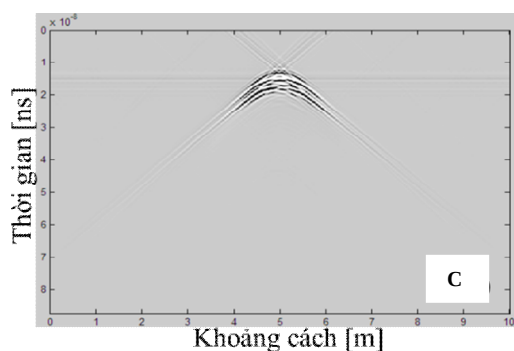
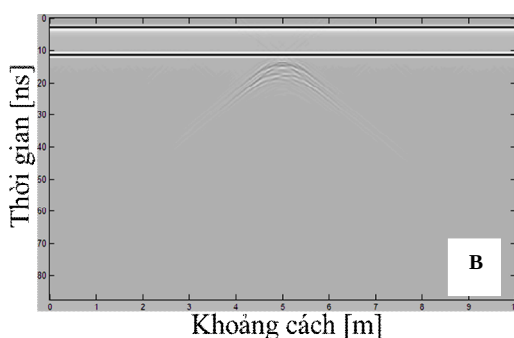
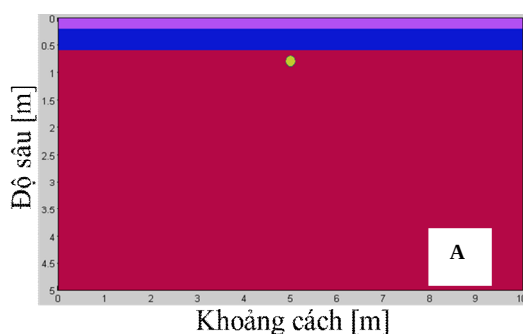
Lớp 3: lớp đất sét dày 4,4 m, điện trở suất $\rho = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 16$, $\mu_r = 1,0$ ($v_3 = 0,075 \text{ m/ns}$).

Dị vật: ống kim loại có điện trở suất $\rho = 0,01$

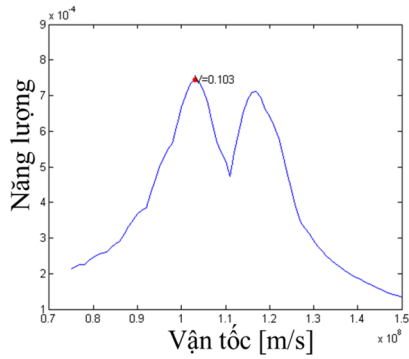
Ωm , $\epsilon_r = 81$, $\mu_r = 39,69$, đường kính ống 0,22 m, tâm đường ống tại vị trí (5 m, 0,8 m).

Quan sát mặt cắt GPR Hình 2B, hai đường thẳng kéo dài tại thời điểm $t_1 = 2,6 \text{ ns}$ và $t_2 = 10,9 \text{ ns}$ lần lượt là tín hiệu phản xạ từ mặt ranh giới thứ nhất và ranh giới thứ hai; tại $t = 13,6 \text{ ns}$ là tín hiệu của dị vật kim loại (hyperbol). Để xác định vận tốc truyền sóng trung bình đến đỉnh của dị vật, có thể sử dụng vận tốc căn quân phương (Yilmaz, 1988) nhờ biết chính xác vận tốc từng phân lớp và thời gian truyền sóng theo hệ thức [7]:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$



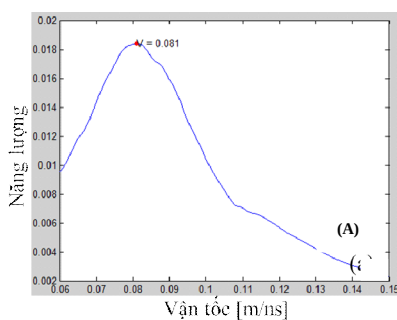
Hình 2. (A) Mô hình 1; (B) Mặt cắt GPR mô hình 1
(C) Mặt cắt GPR sau khi sử dụng bộ lọc background để khử nhiễu nền ngang.
(D) Mặt cắt GPR sau dịch chuyển với vận tốc $v = 0,104 \text{ m/ns}$.



Hình 3. Biểu đồ năng lượng

Trong mô hình, vận tốc căn quân phương của môi trường bên trên dị vật là $v_{rms} = 0,104$ m/ns.

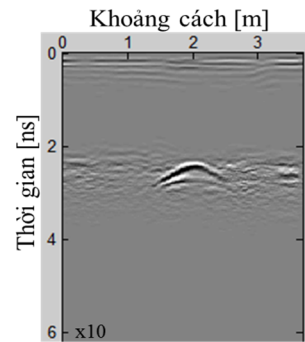
Tiếp theo, thực hiện dịch chuyển Kirchhoff trên số liệu mô hình kết hợp với biểu đồ năng lượng để tính vận tốc truyền sóng. Tuy nhiên, cần lưu ý tín hiệu phản xạ từ các mặt ranh giới khá mạnh, có thể gây nhiễu loạn trong hình ảnh sau dịch chuyển. Do vậy, bộ lọc loại nhiễu (background removal) được sử dụng để khử các nhiễu nằm ngang trong mặt cắt mô hình (Hình 2C). Nhằm giảm thời gian tính toán, nên giới hạn khoảng vận tốc từ 0,075 (vận tốc lớp 3) đến 0,15 m/ns (vận tốc lớp 1) với bước nhảy 0,001 m/ns. Kết quả được biểu diễn theo Hình 3 cho thấy giá trị năng lượng đạt cực đại tại vị trí $v_d = 0,103$ m/ns, sai lệch không đáng kể so với vận tốc v_{rms} tính được ở trên (khoảng 1 %). Điều này thể hiện phương pháp tối ưu hóa được sử dụng rất hiệu quả và đáng tin cậy.



Số liệu thực tế

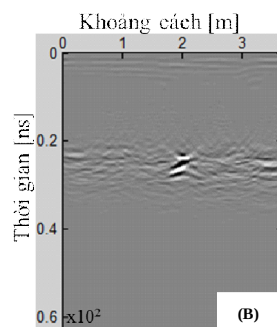
Xác định ống cấp nước kim loại

Tuyến đo được thực hiện bằng thiết bị Detector Duo với tần số 700 MHz có màn chắn, cắt ngang đường Ngô Nhân Tịnh, Quận 5, Tp. HCM. Quan sát mặt cắt GPR sau khử nhiễu (Hình 4), tín hiệu hyperbol xác định tại vị trí 2 m và 23 ns. Tín hiệu có dạng phân cực nghịch, do đó chúng có khả năng là ống cấp nước kim loại đi dọc theo đường Ngô Nhân Tịnh.



Hình 4. Mặt cắt GPR tuyến 30 Ngô Nhân Tịnh (sau lọc nhiễu)

Tiến hành dịch chuyển mặt cắt tuyến 30 (Hình 4) với vận tốc trong khoảng 0,06 đến 0,15 m/ns (bước nhảy 0,001 m/ns). Kết quả cho thấy vùng tín hiệu xung quanh hyperbol có giá trị năng lượng cực đại tại vận tốc là 0,081 m/ns (Hình 5A). Quan sát mặt cắt sau dịch chuyển với vận tốc 0,081 m/ns, nhận thấy tín hiệu dị vật khá rõ nét và hội tụ (Hình 5B).



Hình 5. (A) Biểu đồ năng lượng; (B) Mặt cắt sau dịch chuyển.

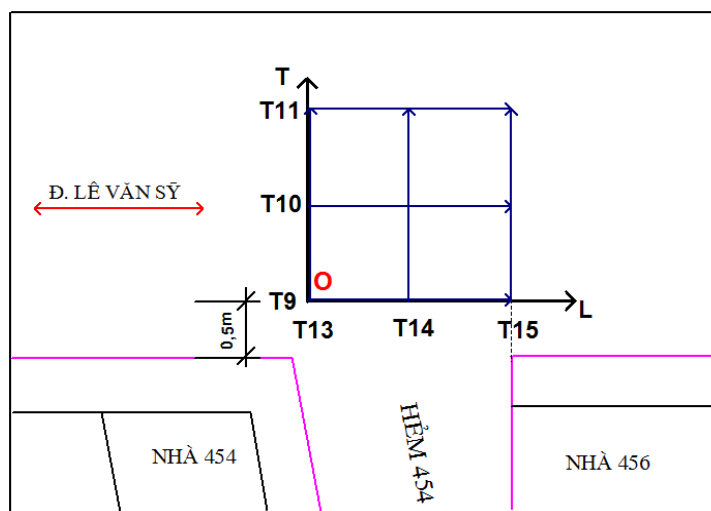
Như vậy, sử dụng năng lượng cực đại nhằm tối ưu hóa bài toán dịch chuyển đã xác định vận tốc truyền sóng trong môi trường. Độ sâu và kích thước đường ống dựa trên giá trị vận tốc vừa tính được lần lượt là $d = 1,1$ m; $\Phi_1 = 305$ mm. Theo thông tin tiên nghiệm từ Công ty Cấp nước MAT, đây là đường cấp nước bằng gang có kích thước là $\Phi = 280$ mm. Như vậy, sai lệch giữa kết quả tính toán kích thước và thực tế hoàn toàn chấp nhận được (9 %).

Xây dựng bản vẽ công trình ngầm tại Tp. Hồ Chí Minh

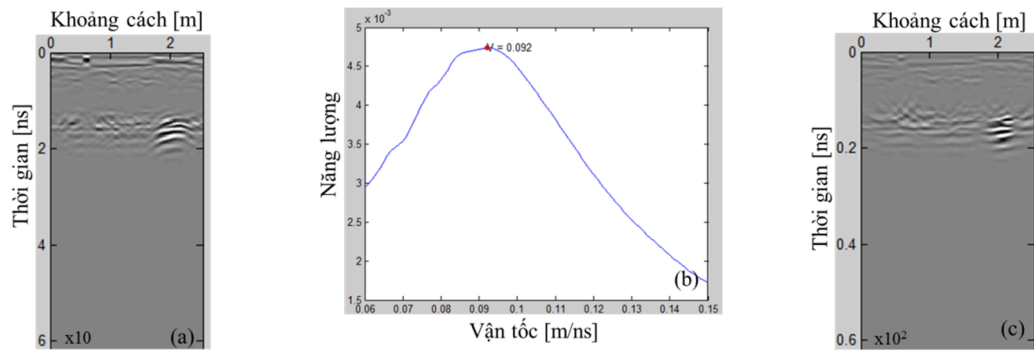
Số liệu đo đạc tại điểm khảo sát số 2, công trình "Lắp đặt tuyến ống cấp II, đường Lê Văn Sỹ - Trần Quang Diệu, Quận 3, Tp Hồ Chí Minh" do

công ty cấp nước Wadeco thực hiện tháng 1 năm 2015. Công trình gồm 10 điểm khảo sát thu thập số liệu bằng thiết bị Detector Duo (hãng IDS, Ý), kéo dài từ số nhà 490 đường Lê Văn Sỹ đến Cầu Lê Văn Sỹ. Dưới đây, chúng tôi xử lý, minh giải số liệu đo đạc và xây dựng bản vẽ công trình ngầm tại điểm khảo sát số 2 (Hình 6).

Điểm khảo sát số 2 thực hiện trước hẻm 454 đường Lê Văn Sỹ (Hình 6). Khu vực khảo sát có kích thước 2×2 m² gồm sáu tuyến khảo sát: ba tuyến dọc theo đường Lê Văn Sỹ T9, T10, T11 và ba tuyến ngang T13, T14, T15. Các tuyến khảo sát cùng cho thấy tín hiệu hyperbol phản xạ từ dị vật, cụ thể như sau



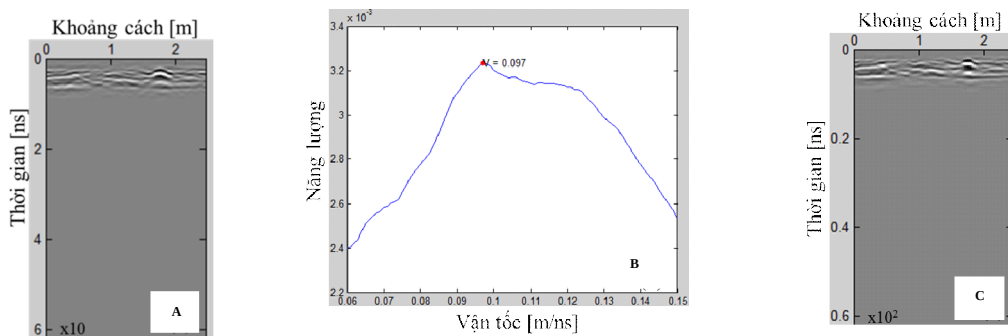
Hình 6. Sơ đồ tuyến đo tại điểm khảo sát số 2



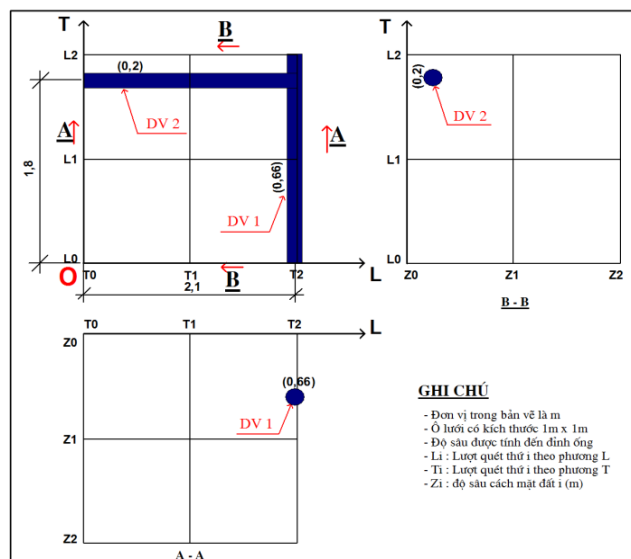
Hình 7. (A) Mặt cắt T9 sau lọc nhiễu; (B) Biểu đồ năng lượng; (C) Mặt cắt sau dịch chuyển

Các tuyến cắt ngang T9, T10, T11 xuất hiện tín hiệu hyperbol giống nhau lần lượt tại vị trí 2,1 m; 2,0 m và 2,1 m. Vì các tuyến bố trí song song và cách đều, nên có thể xác định thông tin địa vật theo một tuyến bất kỳ. Phần này, chúng tôi thực hiện xử lý tuyến T9 và quan sát tín hiệu hyperbol tại vị trí 2,1 m; 14 ns (Hình 7A). Kết hợp dịch

chuyển Kirchhoff và biểu đồ năng lượng với vận tốc trong khoảng 0,06 đến 0,15 m/ns, tính được vận tốc truyền sóng $v = 0,09$ m/ns (Hình 7B). Dựa vào mặt cắt dịch chuyển (Hình 7C), kích thước và độ sâu địa vật tính được lần lượt là 149 mm và 0,66 m (DV 1).



Hình 8. (A) Mặt cắt T14 sau lọc nhiễu; (B) Biểu đồ năng lượng; (C) Mặt cắt sau dịch chuyển



Hình 9. Bản vẽ công trình ngầm vị trí số 2

Xử lý tuyến dọc T14, đã xác định tín hiệu hyperbol tại vị trí 1,8 m; 2,5 ns (Hình 8A). Sử dụng biểu đồ năng lượng và dịch chuyển Kirchhoff, tính được vận tốc truyền sóng $v = 0,097$ m/ns (Hình 8B). Dịch chuyển tuyến T14 với vận tốc vừa tìm được (Hình 8C), kích thước và độ sâu dị vật tính được là 111 mm và 0,2 m (DV 2).

Tổng hợp kết quả xử lý các tuyến đo đặc, đã xây dựng bản vẽ công trình ngầm như Hình 9. Bản vẽ công trình ngầm giúp chỉ rõ vị trí và phương kéo dài của các dị vật. Dựa vào đó, các đơn vị chuyên môn thiết kế công trình ngầm mới được hợp lý, quá trình thi công tránh được các rủi ro và tai nạn không mong muốn.

KẾT LUẬN

Các mẫu tín hiệu rời rạc trên mặt cắt ra đa xuyên đất có sự tương đồng với những điểm ảnh, do vậy, nhiều kỹ thuật xử lý ảnh hoàn toàn đủ cơ sở áp dụng vào dữ liệu GPR. Bài báo này đã trình bày việc sử dụng dịch chuyển Kirchhoff kết hợp biểu đồ năng lượng để xác định chính xác vận tốc

sóng điện từ lan truyền trong môi trường. Về nguyên tắc, năng lượng sẽ đạt giá trị lớn nhất khi anten thu được nhiều tín hiệu phản xạ từ vật thể. Với nguyên lý như vậy, chúng tôi đã tiến hành tính toán trên cả mô hình lý thuyết và số liệu thực tế. Trong mô hình ba phân lớp, kết quả xác định vận tốc có sự khác biệt khá nhỏ với vận tốc căn quân phương của môi trường. Sau đó, chúng tôi áp dụng trực tiếp phương pháp tối ưu này trên tuyến thăm dò ống cấp nước trên đường Ngô Nhân Tịnh và xây dựng bản vẽ công trình ngầm trên đường Lê Văn Sỹ. Kích thước dị vật tính với các vận tốc vừa tìm cho thấy dị vật có đường kính rất phù hợp với thông tin tiên nghiệm.

Dựa vào kết quả đã đạt được, chúng tôi khẳng định các thuật toán trên có thể cho phép tăng độ chính xác trong xử lý định lượng đối với phương pháp GPR. Hướng tiếp cận này sẽ giúp phương pháp GPR ngày càng trở thành một công cụ hữu ích hơn trong các khảo sát địa vật lý tầng nông.

Combination of Kirchhoff migration method and the energy diagram in the process of ground penetrating radar data

- Nguyen Thanh Van
- Nguyen Van Thuan
- Dang Hoai Trung

University of Science, VNU-HCM

ABSTRACT

Kirchhoff migration in ground penetrating radar (GPR) has been the technique of collapsing diffraction events on unmigrated records to points, thus moving reflection events to their proper locations and creating a true image of subsurface structures. Today, the scope of Kirchhoff migration has been broadened and is a tool for electromagnetic wave velocity estimation. To optimize this algorithm, we propose using

the energy diagram as a criterion of looking for the correct propagation velocity. Using theoretical models, we demonstrated that the calculated velocities were the same as the root mean square ones up to the top of objects. The results verified on field data showed that improved sections could be obtained and the size as well as depth of anomalies were determined with high reliability.

Keywords: Kirchhoff migration, ground penetrating radar, image processing, energy diagram.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N.T. Vần, N.V. Giảng, Ground penetrating radar - fundamentals and applications, VNU Press, 222 (2013).
- [2]. N.T. Vần, L.V.A. Cường, N.V. Giảng, Đ.H. Trung, Kirchhoff migration for specifying velocity model in ground penetrating radar method, *Proceeding IEEE 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 419-424 (2012).
- [3]. W.A. Schneider, Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 43, 1 (1978).
- [4]. X. Xiaoyin, L.M. Eric, C.M. Rappaport. Minimum entropy regularization in frequency – wavenumber migration to localize subsurface objects, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 8, 1804-1812 (2003).
- [5]. X. Xiaoyin, L.M. Eric, Entropy optimized contrast stretch to enhance remote sensing imagery, *Dept. of ECE, Northeastern University Boston*, MA02115-5000, USA (2002).
- [6]. L.V. Kempen, H. Sahli, Ground penetrating radar processing: a selective survey of the state of the art literature, *IRIS-TR-0060* (1999).
- [7]. O. Ylmatz, Seismic data processing, *Society of Exploration Geophysics*, USA (1987).