

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.093

TỐI ƯU CÁC KỸ THUẬT DỊCH CHUYỂN ĐỂ XÁC ĐỊNH TỐC ĐỘ TRUYỀN SÓNG ĐIỆN TỪ SỬ DỤNG DỮ LIỆU RAĐA XUYÊN ĐẤT Ở MỘT SỐ TUYẾN ĐƯỜNG THUỘC THÀNH PHỐ CẦN THƠ

Dương Quốc Chánh Tín^{1*}, Võ Thu Hương², Dương Hiếu Đầu² và Nguyễn Lê Hoài Phương³

¹Khoa Sư phạm, Trường Đại học Cần Thơ

²Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Cần Thơ

³Trường Đại học Tây Đô

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Dương Quốc Chánh Tín (email: dqctin@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 09/05/2022

Ngày nhận bài sửa: 27/05/2022

Ngày duyệt đăng: 30/05/2022

Title:

Optimization for migration techniques to determine the electromagnetic wave propagation velocity using ground penetrating radar data on some streets in Can Tho city

Từ khóa:

Dịch chuyển Kirchhoff, entropy cực tiểu, năng lượng cực đại, ra đa xuyên đất, tốc độ truyền sóng điện từ

Keywords:

Electromagnetic wave propagation velocity, GPR, Kirchhoff migration, maximum energy, minimum entropy

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar (GPR) is a geophysical method that uses high frequency electromagnetic waves (from 10 MHz to 3000 MHz) to study shallow underground structures such as concrete, asphalt, metal, pipes, cables or building blocks, etc. without destroying or digging. When performing GPR signal processing, the calculation of the electromagnetic wave propagation velocity is a decisive factor in accuracy, helping us to determine the depth, size, and location of the anomalies for increasing the signal-to-noise (S/N) ratio in the cross-section after migration processing. Therefore, in order to maximize the efficiency of determining the speed of electromagnetic wave propagation in the shallow soil layers, Kirchhoff migration technique optimization algorithm is used combining with two standards of the minimum entropy and the maximum energy. The results of velocity determination also indicate the nature of the shallow geological layers, irregularities in underground structure, thereby predicting subsidence as well as improving proposed method and handling timely.

TÓM TẮT

Ra đa xuyên đất (Ground Penetrating Radar: GPR) là phương pháp Địa vật lý sử dụng sóng điện từ tần số cao (từ 10 MHz đến 3000 MHz), nhằm nghiên cứu các cấu trúc tầng nông dưới mặt đất như bê tông, nhựa đường, kim loại, đường ống, dây cáp hoặc khối xây... mà không cần phá hủy hay đào bới. Khi tiến hành xử lý dữ liệu ra đa xuyên đất (Ground Penetrating Radar: GPR), việc tính toán vận tốc truyền sóng điện từ là yếu tố quyết định tính chính xác, giúp xác định độ sâu, kích thước, và vị trí của các dị thường làm tăng tỷ số độ lớn của tín hiệu so với nhiễu trong mặt cắt sau dịch chuyển. Do đó, để gia tăng hiệu quả việc xác định vận tốc truyền sóng điện từ trong các lớp đất đá tầng nông, thuật toán tối ưu hóa kỹ thuật dịch chuyển Kirchhoff được sử dụng kết hợp với hai chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại. Kết quả xác định vận tốc truyền sóng cũng chỉ ra bản chất các lớp địa chất tầng nông, các bất thường trong cấu trúc ngầm dưới lòng đất, từ đó dự báo sụp lún cũng như đề xuất các biện pháp khắc phục và xử lý kịp thời.

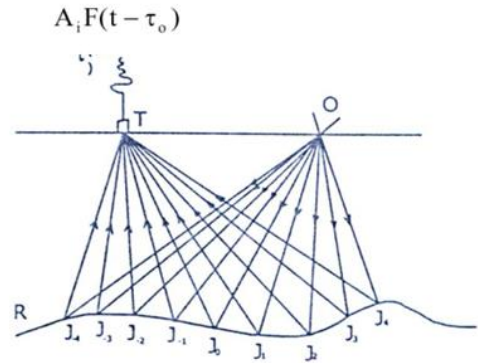
1. GIỚI THIỆU

Để thu được mặt cắt dịch chuyển tốt nhất, cho phép xác định vận tốc dịch chuyển chính xác thì biên độ của tín hiệu sẽ đạt cực đại, khi đó, mặt cắt dịch chuyển sẽ phản ánh đầy đủ nhất các thông tin cần thiết của môi trường bên dưới mặt đất cần khảo sát. Trong thực tế, việc xác định chính xác vận tốc truyền sóng là vấn đề vô cùng phức tạp, khi thay đổi vận tốc ở các giá trị gần nhau, các mặt cắt thu được sau dịch chuyển thường có dạng rất giống nhau. Vì vậy, việc lựa chọn hình ảnh mặt cắt sau dịch chuyển rất phức tạp. Do đó, cần có một chuẩn để so sánh. Tại Việt Nam, thuật toán dịch chuyển đã được sử dụng nhiều trong xử lý tài liệu địa chất. Gần đây, phương pháp phân tích dữ liệu GPR đã nhận được nhiều sự quan tâm do sự phát triển mạnh các hệ đo đi động. Nhờ vậy những nghiên cứu áp dụng dịch chuyển sử dụng dữ liệu GPR cũng phát triển mạnh mẽ. Cường và ctv. (2011) đã thực hiện thành công việc áp dụng dịch chuyển Kirchoff để xác định mô hình vận tốc truyền sóng cho GPR. Trung và ctv. (2013) đã áp dụng dịch chuyển sai phân hữu hạn vào xử lý số liệu GPR. Kết quả nghiên cứu đã giúp xác định được độ sâu và kích thước ống cấp nước, cáp ngầm bên dưới mặt đất, có sai số nhỏ. Văn và ctv. (2014) đã kết hợp thành công kỹ thuật entropy cực tiểu trong xử lý ảnh với dịch chuyển để xác định vận tốc truyền sóng tối ưu. Bước đầu đã giải quyết bài toán xử lý định lượng dữ liệu ra đa xuyên đất. Trong bài báo này, phương pháp dịch chuyển Kirchoff được tối ưu bởi hai chuẩn gồm entropy cực tiểu và năng lượng cực đại trong xử lý ảnh để xác định vận tốc truyền sóng điện từ trên dữ liệu mô hình và dữ liệu đo GPR ở Thành phố Cần Thơ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp dịch chuyển Kirchoff

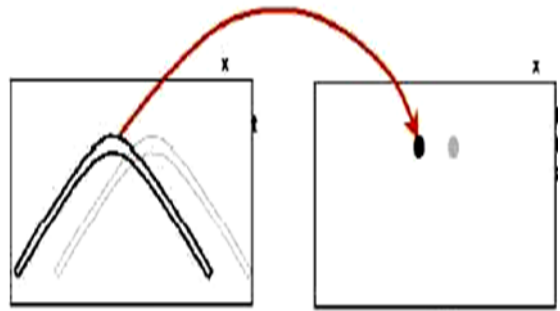
Phương pháp này được thực hiện dựa trên nguyên lý Huygens – Fresnel và bài toán Kirchoff (Yilmaz, 2001; Cường và ctv., 2009; Vardy & Enstock, 2010; Văn và ctv., 2013). Sóng điện từ khi truyền vào môi trường nếu gặp sự khác biệt về thuộc tính điện từ, chúng sẽ phản xạ trở lại. Mỗi điểm trên mặt biên phản xạ được xem là một nguồn phát sóng thứ cấp, tạo ra các xung tín hiệu có dạng nửa đường tròn trong mặt phẳng $x - z$ hoặc dạng hyperbol trong mặt phẳng $x - t$ và truyền về máy thu trên mặt đất (Cường và ctv., 2011). Các dao động sóng này sẽ tạo thành trường sóng tổng ghi được dọc tuyến quan sát như Hình 1.



Hình 1. Sự đóng góp biên độ của các điểm tán xạ

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

Về nguyên tắc dịch chuyển là sự cộng biên độ các tín hiệu tán xạ để làm rõ tín hiệu có ích (tăng tỷ lệ tín hiệu so với nhiễu) và đưa mặt biên phản xạ về đúng hình dạng của nó như Hình 2



Hình 2. Phép biến đổi Kirchoff cộng biên độ tán xạ

Do đó, đối với các tán xạ điểm, sau khi dịch chuyển, tín hiệu phản xạ được đưa về dạng điểm. 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 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 dập nhiễu, đặc biệt là dập các nhiễu ngẫu nhiên do sự 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.

Phương trình Kirchhoff là cơ sở toán học của nguyên lý Huygens và khẳng định rằng dao động ở điểm tán xạ là tổng tích phân của các dao động sóng cầu thành phần từ các điểm khác nhau của mặt S gửi về nơi quan sát. Khi đó, bài toán Kirchhoff đã được Sneider (1978) và Scales (1995) giải cho trường thế vô hướng – sóng dọc có dạng (Schneider, 1978; Scales, 1995):

$$P_{Dj}(x_{Dj}, z_{Dj}, t) = \frac{1}{2\pi} \int \left\{ \frac{\cos\theta}{r^2} P\left(x - x_{Dj}, z = 0, t - \frac{r}{v}\right) + \frac{\cos\theta}{rv} \frac{\partial}{\partial t} P\left(x - x_{Dj}, z = 0, t - \frac{r}{v}\right) \right\} dx \quad (1)$$

Trong đó:

r là khoảng cách từ các điểm quan sát đến điểm tán xạ với

$$r^2 = (x - x_{Dj})^2 + z_{Dj}^2 \quad (2)$$

θ là góc giữa tia ló và phương pháp tuyến đến mặt quan sát.

P(x, z = 0, t) là trường sóng đo được trên mặt đất.

2.2. Tối ưu hóa các thuật toán dịch chuyển bằng entropy cực tiểu và năng lượng cực đại trong xử lý số liệu GPR

Tín hiệu trên mặt cắt GPR có thể chia làm ba loại: nhiễu hỗn loạn, tín hiệu phản xạ từ vật thể và nhiễu đo đạc. Nhiễu giao thoa xuất hiện thường trực trên hình ảnh tương tự tín hiệu phản xạ trong GPR. Nhiễu nền thường 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. Ta có thể biểu diễn mặt cắt thu thập theo hệ thức (Xu & Miller, 2002):

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

Trong đó, X, R, S và B tương ứng với tín hiệu của mặt cắt thu thập, nhiễu hỗn loạn, tín hiệu phản xạ từ vật thể và nhiễu đo đạc. Mặt khác, 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 nhằm quản lý và quan sát để từ đó dễ dàng xử lý số liệu. 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. Do đó, ta mô tả mặt cắt X bằng một ma trận kích thước (MxN):

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{MN} \end{bmatrix} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N] \quad (4)$$

Ở đây, x_{ij} là mẫu thứ i ở đường ghi thứ j. Với cách biểu diễn này, ma trận các điểm là các điểm ảnh tương ứng với biên độ sóng GPR. Từ sự phân bố của chúng, ta có thể áp dụng các phương pháp xử lý ảnh là kỹ thuật entropy và năng lượng trong xử lý số liệu GPR.

2.2.1. Entropy cực tiểu

Trong vật lý thống kê, entropy được định nghĩa là đại lượng đo lường khả năng “hỗn loạn” của một hệ ứng với một trạng thái vĩ mô nào đó. Trong lý thuyết thông tin, entropy được đề để lượng tin không chắc chắn (hay lượng ngẫu nhiên) của một sự kiện hay một phân phối ngẫu nhiên cho trước. Trong công nghệ gen di truyền, entropy là độ tự do di truyền. Trong xử lý ảnh, entropy chỉ độ hỗn loạn của điểm ảnh (Xu et al., 2003; Flores-Tapia & Pistorius, 2010; Zhou et al., 2011). Giá trị entropy lớn tương ứng với độ hỗn loạn cao. Giả sử rằng ảnh X nhận các giá trị rời rạc 1, 2, 3, ... với xác suất tương ứng p_1, p_2, p_3, \dots , khi đó, entropy của ảnh X được cho bởi (Benedetto et al., 2017; Candra et al., 2013):

$$E(X) = -\sum_i p_i \log p_i \quad (5)$$

Phương trình (5) được sử dụng để tính entropy sẽ xuất hiện hai vấn đề. Đầu tiên, đối với ảnh lớn sẽ tốn nhiều thời gian để tính xác suất p_i . Thứ hai, đối với những giá trị rời rạc của X, có khả năng xảy ra trường hợp $p_i = 0$ ứng với một vài giá trị i và $\log 0$ thì không thể tính được. Để giải quyết hai vấn đề trên, entropy của ảnh X được tính gần đúng bởi biểu thức (Xu & Miller, 2002):

$$E(x) = -\sum_{j=1}^N \left\{ \frac{\sum_{i=1}^M x_{ij}^4}{\left[\sum_{i=1}^M x_{ij}^2 \right]^2} \right\} \quad (6)$$

Ta định nghĩa giá trị lớn nhất của entropy bằng 1 đối với đường ghi chỉ có một xung tín hiệu, có giá trị là N đối với tập hợp N đường ghi. Entropy càng lớn thì độ hỗn loạn (nhiều) trong ảnh càng lớn. Ngược lại, cực tiểu hóa entropy của ảnh sau khi xử lý dịch chuyển có thể tăng độ hội tụ đến mức tối ưu của nó, do đó hiệu quả xử lý dịch chuyển sẽ cao hơn khi kết hợp với kỹ thuật entropy cực tiểu. Để có một tập ảnh GPR rõ nhất thì quy trình xử lý sẽ như sau: đầu tiên, từ số liệu đo đạc, tiến hành lọc nhiễu và khuếch đại để làm nổi bật tín hiệu trong mặt cắt. Sau đó, thực hiện dịch chuyển với các vận tốc v khả dĩ. Ứng với mỗi giá trị v, ta sẽ thu được một mặt cắt

GPR thể hiện hình ảnh, vị trí và kích thước của dị vật. Công việc tiếp theo là phải chọn ra được mặt cắt phù hợp nhất để tính vận tốc. Điều này không dễ dàng, vì hình ảnh thu được ứng với các vận tốc gần nhau thì khá giống nhau. Vì vậy, để nhận dạng mặt cắt GPR biểu diễn đúng nhất môi trường bên dưới mặt đất, người phân tích cần có nhiều kinh nghiệm chọn lọc ảnh mặt cắt.

Để giải quyết vấn đề này, cần sử dụng một tiêu chuẩn để so sánh, chọn lọc và đó chính là giá trị entropy cực tiểu. Như vậy, sau khi dịch chuyển, cần lựa chọn bộ số liệu có entropy cực tiểu để đạt độ hội tụ trong ảnh là tốt nhất, ảnh này sẽ có hiệu quả sử dụng cao nhất (Zhou et al., 2011).

Có thể mô tả quá trình trên thông qua các bước sau:

- Bước 1: Thu thập số liệu, tiến hành lọc nhiễu và khuếch đại tín hiệu.
- Bước 2: Ước lượng một khoảng các giá trị vận tốc v , tiến hành xử lý dịch chuyển với từng giá trị v để thu được bộ các số liệu mới.
- Bước 3: Tương ứng với mỗi bộ số liệu mới, ta tính entropy của ảnh để được một tập hợp các entropy.
- Bước 4: Chọn ảnh có entropy nhỏ nhất. Ảnh này sẽ cho độ hội tụ tốt nhất.

2.2.2. Năng lượng cực đại

Theo Yilmaz (2001), bước dịch chuyển sẽ giúp hội tụ tín hiệu và lọc nhiễu. Vì vậy, mặt cắt GPR sau dịch chuyển ứng với năng lượng cực đại sẽ có độ tin cậy cao nhất. Khi đó, vận tốc tính toán sẽ tiệm cận với vận tốc thực nhất. Tuy nhiên, năng lượng tín hiệu trên mặt cắt GPR còn phụ thuộc vào sự tồn tại của các loại nhiễu trong vùng khảo sát. Do đó, để nâng cao chất lượng hình ảnh và tăng độ chính xác khi tính năng lượng, ta cần tiến hành các bước lọc nhiễu trên mặt cắt GPR trước khi dịch chuyển. Sau khi loại nhiễu bằng các phương pháp khác nhau trong chuỗi xử lý, năng lượng tín hiệu được ghi nhận bởi hệ thức (Thuận và ctv., 2017):

$$D(j) = \sum_{i=1}^M X^2(i, j) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

Cách tính năng lượng như trên sẽ mất nhiều thời gian và gây ra những sai lệch trong kết quả, do vậy, cần phải lựa chọn vùng tín hiệu quan tâm Y để hạn chế nhiễu và loại bỏ những khu vực không cần thiết. Từ đây, quá trình tính toán năng lượng tín hiệu thực hiện nhanh chóng, giúp quá trình xử lý chính xác hơn. Quá trình lựa chọn vùng quan tâm được thực hiện như sau (Vấn và Trung, 2015):

- Từ mặt cắt thu thập X , ta có thể chọn vùng quan tâm có chứa tín hiệu hyperbol. Từ đây, ta xác định số lượng bước mẫu vùng quan tâm, sau đó 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 $K \times Q$ ($K < M, Q < N$).

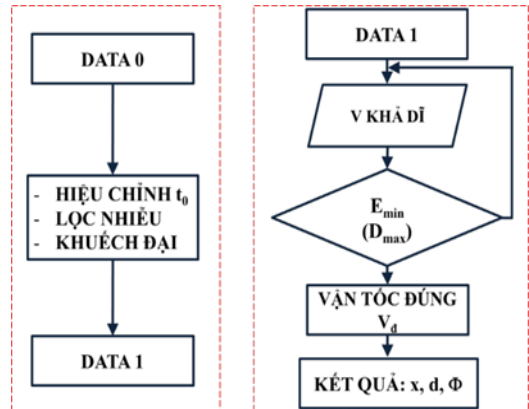
- Năng lượng tín hiệu của vùng Y xác định theo hệ thức:

$$D_Y(j) = \sum_{i=1}^K Y^2(i, j) \quad j = 1, 2, 3, \dots, Q \quad (8)$$

Tương tự entropy, ứng với mỗi thông số vận tốc thì mặt cắt sau dịch chuyển sẽ có một giá trị năng lượng nhất định. Bằng phép so sánh, ta có thể xác định giá trị năng lượng cực đại và vị trí tương ứng của vật thể trên hình ảnh hiển thị. Từ đó, suy ra giá trị vận tốc dịch chuyển tương ứng.

2.2.3. Kết hợp dịch chuyển, entropy và năng lượng trong xử lý số liệu GPR

Bài toán tối ưu hóa phương pháp dịch chuyển Kirchhoff kết hợp với chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại được mô tả theo lưu đồ (Hình 3).



Hình 3. Quy trình xử lý dữ liệu GPR

Trước tiên, ta xác định tín hiệu của dị vật trong mặt cắt GPR (vùng quan tâm). Để đạt được điều này, số liệu GPR phải được xử lý các bước cơ bản như: hiệu chỉnh, lọc nhiễu và khuếch đại. Sau đó, dịch chuyển số liệu GPR với vận tốc v_1 , cho phép tính được giá trị entropy E_1 (năng lượng D_1) tương ứng của mặt cắt. Tiếp tục thay đổi vận tốc, để dàng xác định các giá trị entropy và năng lượng thứ i (E_i, D_i) tương ứng với các vận tốc v_i ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Cuối cùng, xây dựng biểu đồ biểu diễn sự thay đổi của giá trị entropy và năng lượng theo vận tốc dịch chuyển. Nếu dịch chuyển với vận tốc đúng v_d , tín hiệu trên mặt cắt sẽ được hội tụ rõ nhất. Tại đó, giá trị entropy đạt cực tiểu, và năng lượng đạt cực

đại nên các điểm ảnh không còn phân bố hỗn loạn như ban đầu. Như vậy, giá trị vận tốc dịch chuyển được xác định chính xác, thể hiện đúng tốc độ lan truyền sóng điện từ trong môi trường bên trên dị vật (tính từ mặt đất đến mặt ranh giới dị vật).

Thực hiện các bước tương tự đối với những hyperbol khác nhau, ta sẽ xác định được sự biến thiên vận tốc theo phương ngang và phương thẳng đứng tại khu vực khảo sát.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Số liệu mô hình lý thuyết

Sử dụng anten tần số 700 MHz, môi trường không đồng nhất gồm ba phân lớp ngang:

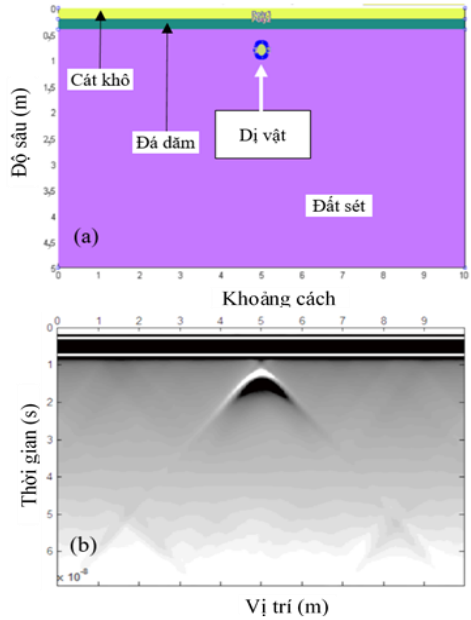
- Lớp 1: cát khô dày 0,2 m, các thông số tương ứng là: $\sigma = 0,001$ mS/m, $\epsilon_r = 4$, $\mu_r = 1$, $v_1 = 0,150$ m/ns.

- Lớp 2: đá dăm dày 0,4 m, $\sigma = 1$ mS/m, $\epsilon_r = 10$, $\mu_r = 1$, $v_2 = 0,095$ m/ns.

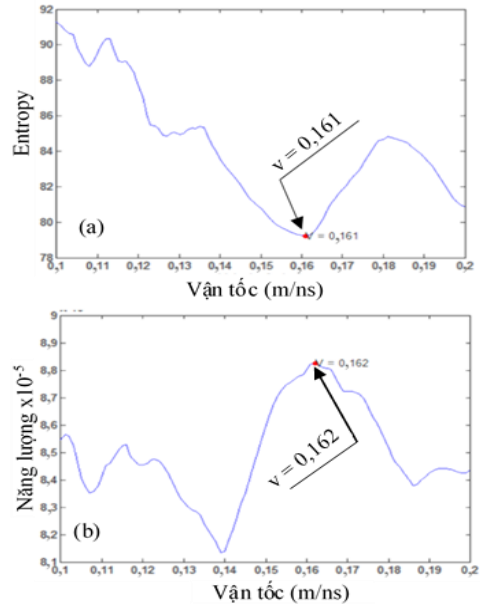
- Lớp 3: đất sét dày 4,4 m, $\sigma = 200$ mS/m, $\epsilon_r = 16$, $\mu_r = 1$, $v_3 = 0,074$ m/ns.

Dị vật bên dưới là ống trụ bằng nhựa nằm ngang có: $\sigma = 1$ mS/m, $\epsilon_r = 3$; $\mu_r = 1$, $v' = 0,17$ m/ns, bên trong là không khí có $\rho = 10^6$, $\epsilon_r = 1$, $\mu_r = 1$ có tâm đặt tại vị trí $x = 5,0$ m, $z = 0,8$ m, đường kính trong $d = 0,3$ m, đường kính ngoài $D = 0,32$ m.

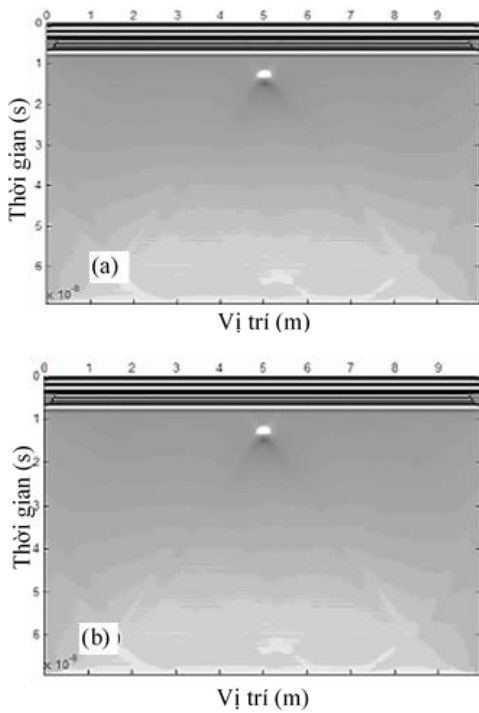
Bộ lọc khử các tín hiệu phản xạ ngang trên mặt cắt GPR được sử dụng trước khi tiến hành dịch chuyển, như Hình 4b. Dịch chuyển với dải vận tốc từ 0,1 m/ns đến 0,2 m/ns bước nhảy 0,001 m/ns.. Kết quả tính entropy và năng lượng được biểu diễn trong Hình 5, cho thấy vận tốc truyền sóng trung bình vào khoảng 0,161 m/ns đến 0,162 m/ns độ sai lệch về vận tốc là rất nhỏ khoảng 0,001 m/ns. Nên chọn $v = 0,161$ m/ns theo entropy làm vận tốc truyền sóng điện từ.



Hình 4. a) Mô hình ống trụ bằng nhựa nằm ngang trong môi trường 3 lớp ngang; b) Mặt cắt GPR sau khi loại nhiễu phản xạ ngang



Hình 5. a) Đồ thị biểu diễn sự thay đổi giá trị entropy theo vận tốc; b) Đồ thị biểu diễn sự thay đổi giá trị năng lượng theo vận tốc



Hình 6. a) Kết quả dịch chuyển với vận tốc 0,161 m/ns; b) Kết quả dịch chuyển với vận tốc 0,162 m/ns

Giá trị vận tốc $v = 0,161$ m/ns, $v = 0,162$ m/ns lần lượt được dịch chuyển, đồng thời đánh giá sự hội tụ của tín hiệu như Hình 6a và Hình 6b. Theo kết quả dịch chuyển như Hình 6a, kích thước của dị vật tính được là 0,302 m. Độ sai lệch kết quả tính toán với số liệu kích thước được thiết lập từ mô hình lý thuyết là 5,6%, khẳng định được độ tin cậy của phương pháp.

Ngoài ra, quan sát kết quả mặt cắt ở Hình 6a và 6b, ta thấy hai mặt cắt có dạng khá tương đồng chứng tỏ kết quả tính toán vận tốc là chính xác. Điều này thể hiện việc tối ưu hóa kỹ thuật dịch chuyển Kirchhoff bằng hai chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại là hiệu quả và đáng tin cậy.

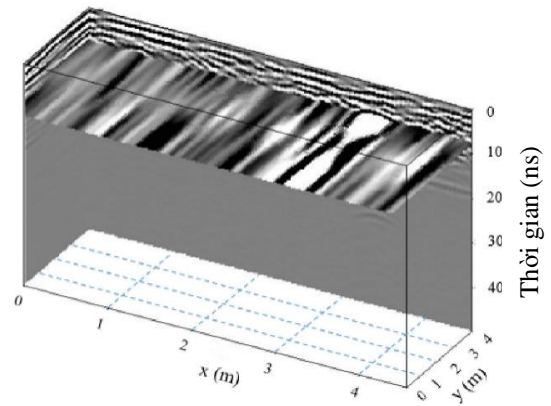
3.2. Kết quả áp dụng cho dữ liệu thực tế

Để đánh giá tính khả dụng của phương pháp này, dữ liệu đo GPR ở một số tuyến đường thuộc thành phố Cần Thơ đã được phân tích cho kết quả khả quan. Trong khuôn khổ bài viết này, một tuyến dữ liệu tiêu biểu được chọn để minh giải.

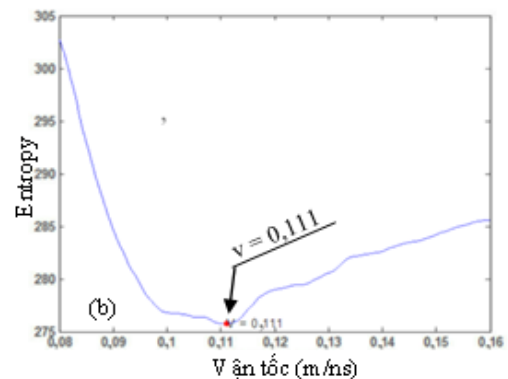
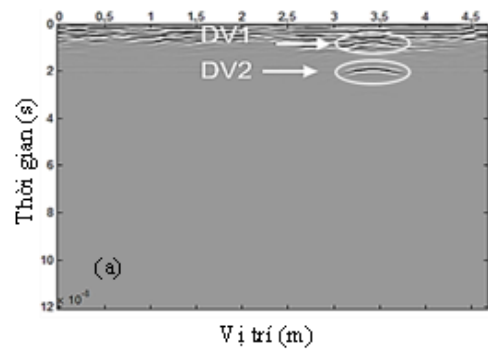
Dữ liệu GPR được thu bởi máy Duo (IDS, Italia), sử dụng anten tần số 700 MHz. Ba tuyến đo LZZ10018, LZZ10019, LZZ10020 song song và cách nhau 1,5 m, mỗi tuyến đo dài 4,7 m, bước đo $dx = 0,02784$ m, được thực hiện trên vỉa hè đường

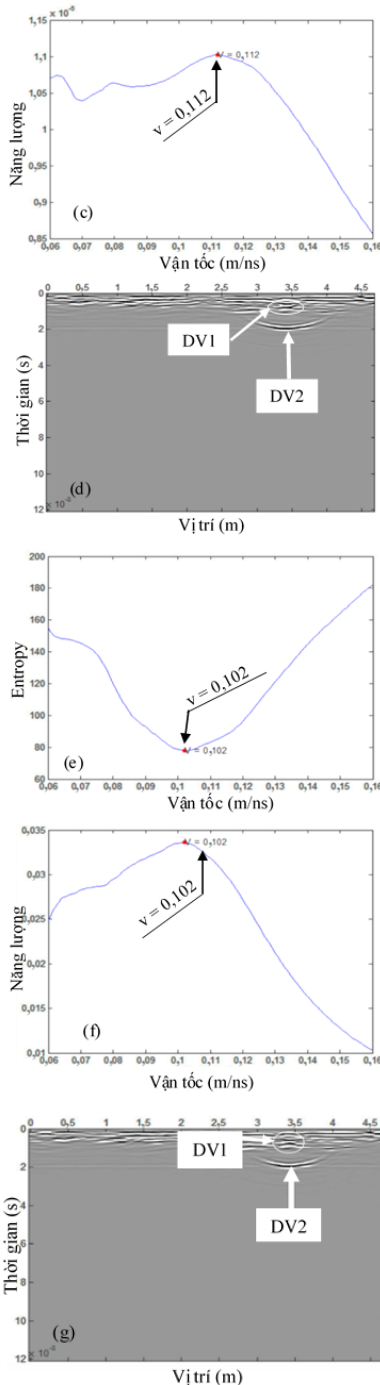
Trần Văn Hoài, quận Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ vào thứ sáu, ngày 22 tháng 09 năm 2018.

Dữ liệu số ở mỗi tuyến đo là tín hiệu sóng phản xạ theo thời gian và khoảng cách nhận được bởi anten thu của máy Duo. Dữ liệu GPR ba chiều trên vỉa hè đường Trần Văn Hoài thể hiện như Hình 7. Bắt đầu phân tích với tuyến đo LZZ10018. Kết quả phân tích tuyến LZZ10018 được trình bày như trên Hình 8a.



Hình 7. Dữ liệu GPR 3D của tuyến đường Trần Văn Hoài





Hình 8. (a) Ống bảo vệ cáp viễn thông và ống bê tông trên vỉa hè đường Trần Văn Hoài; b) Biểu đồ entropy theo vận tốc của DV1; c) Biểu đồ năng lượng theo vận tốc của DV1; d) Mặt cắt dịch chuyển với $v = 0,111$ m/ns; e) Biểu đồ entropy theo vận tốc của DV2; f) Biểu đồ năng lượng theo vận tốc của DV2; g) Mặt cắt dịch chuyển với $v = 0,102$ m/ns

Mặt cắt GPR ở Hình 8a cho thấy 2 hyperbol trên và dưới tại vị trí $x = 3,4$ m, $t = 7$ ns, và $x = 3,4$ m, $t = 20$ ns. Kết hợp dịch chuyển với biểu đồ entropy và năng lượng, vận tốc truyền sóng điện từ tính được là $v = 0,111$ m/ns theo Hình 8b và 8c (kết quả vận tốc tính theo entropy cực tiểu và năng lượng lệch nhau không đáng kể). Tương tự như Hình 8b và 8c với Hình 8e và 8f vận tốc truyền sóng điện từ tính được là $v = 0,102$ m/ns. Dịch chuyển số liệu với vận tốc vừa tìm được, ta được kết quả như hình 8d và 8g. Với vận tốc này, ta có thể thu được phần dịch chuyển tốt nhất, từ đó tính được các thông số của hai dị vật như kích thước, vị trí, độ sâu.

Vị trí, kích thước và độ sâu của cáp viễn thông và ống bê tông trên vỉa hè đường Trần Văn Hoài, quận Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ được xác định với kết quả chi tiết được trình bày ở Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả minh giải số liệu GPR

Kí hiệu	Công trình ngầm	Vị trí x (m)	Kích thước D (m)	Độ sâu z (m)
DV1	Cáp viễn thông	3,43	0,184	0,41
DV2	Ống bê tông	3,44	1,052	0,71

Theo thông tin tiên nghiệm thì kích thước cáp viễn thông và đường bê tông này được thể hiện qua Bảng 2.

Bảng 2. Thông tin về hệ thống công trình ngầm cáp viễn thông và đường ống bê tông được cung cấp bởi nhà thiết kế và lắp đặt

Kí hiệu	Công trình ngầm	Vị trí x (m)	Kích thước D (m)
DV1	Cáp viễn thông	3,4	0,180
DV2	Ống bê tông	3,45	1,000

So sánh kết quả đo đạc ở Bảng 1 và thông tin tiên nghiệm trên Bảng 2 cho thấy sự sai lệch giữa số liệu tính toán và số liệu thực tế dưới 10% là chấp nhận được. Sự sai lệch đó cũng được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Sự sai lệch giữa số liệu tính toán và dữ liệu thực tế

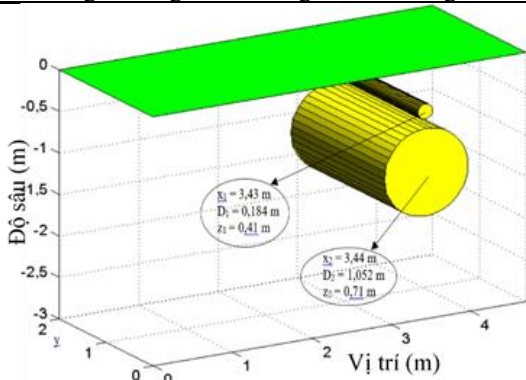
Kí hiệu	Công trình ngầm	Vị trí x (m)	Kích thước D (m)
DV1	Cáp viễn thông	1,0 %	2,2 %
DV2	Ống bê tông	0,2 %	5,2 %

Dữ liệu GPR khi đo ở vỉa hè tuyến đường Trần Văn Hoài, thành phố Cần Thơ (LZZ10018) cũng đã được xử lý bằng phép biến đổi wavelet liên tục. Kết quả minh giải bằng phương pháp wavelet được trình bày ở Bảng 4 (Tín và ctv., 2019). Khi so sánh với

kết quả phân tích bằng phương pháp wavelet, phương pháp tối ưu dịch chuyển Kirchoff bằng hai chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại trên cùng tập dữ liệu của bài báo cho kết quả khá tương đồng. Tuy nhiên, dị vật là ống bê tông khi phân tích bằng phương pháp được đề xuất trong bài báo cho kết quả rõ nét, mà chưa phát hiện ở phương pháp wavelet (do hai dị vật khá gần nhau, và ống bê tông nằm bên dưới, nên tín hiệu bị che khuất bởi dị vật bên trên).

Bảng 4. Kết quả minh giải số liệu GPR bằng phương pháp wavelet (Tín và etv., 2019)

Kí hiệu ngầm	Công trình	Vị trí x (m)	Kích thước D (m)	Độ sâu z (m)
DV1	Cáp viễn thông	3,45	0,170	0,44
DV2	Ống bê tông	Không	Không	Không



Hình 9. Ảnh 3D ống bảo vệ cáp viễn thông và ống bê tông đường Trần Văn Hoài

Các tuyến đo LZZ10019, LZZ10020 tiếp tục được phân tích, các kết quả thu được là hoàn toàn tương tự. Các kết quả phân tích ở ba tuyến

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Benedetto, F., Tosti, F., & Alani, A. M. (2017). An Entropy-Based Analysis of GPR Data for the ssesment of Railway Ballast Conditions, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7), 3900 - 3908.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2683507>
 Candra, P., Huston, D. R., Xia, T., & Wang, G. (2013). 2D Entropy and Short Time Fourier Transform for Ground Penetrating Radar Data Analysis, *Proceedings of Nondestructive Characterization or Composite Materials, Aerospace engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, SPIE*.
<https://doi.org/10.1117/12.2010224>
 Cường, L.V.A., Trung, Đ. H., Vãn, N.T., Giảng, N.V., & Triết N.M. (2009). Dịch chuyển Kirchoff: Tác động của tham số độ rộng, *Tạp*

LZZ10018, LZZ10019, LZZ10020 được liên kết, biểu diễn 3D của ống cáp quang ngầm trên vỉa hè đường Trần Văn Hoài được xây dựng và thể hiện như Hình 9.

Như vậy, sử dụng chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại nhằm tối ưu bài toán dịch chuyển đã thể hiện được sự thay đổi theo phương ngang của vận tốc trong khu vực khảo sát. Chứng tỏ, tính đúng đắn của phương pháp nghiên cứu.

4. KẾT LUẬN

Các tính toán trên mô hình lý thuyết và thực tế đều cho thấy chuẩn entropy cực tiểu và năng lượng cực đại có kết quả tương đồng nhau trong việc xác định vận tốc. Kết quả phân tích dữ GPR ở vỉa hè đường Trần Văn Hoài, quận Ninh Kiều, thành phố Cần Thơ, giá trị kích thước, vị trí và độ sâu của cáp viễn thông, ống bê tông khá phù hợp với thông tin tiên nghiệm cũng như kết quả phân tích bằng phương pháp khác (sai lệch này không quá 5,2%). Nếu ảnh GPR đồng nhất, nghĩa là không còn sự nhiễu loạn thì giá trị entropy của nó đạt cực tiểu, tín hiệu sau dịch chuyển sẽ hội tụ, khi đó năng lượng đạt giá trị cực đại, qua đó có thể xác định chính xác sự biến thiên vận tốc truyền sóng trong môi trường theo phương ngang và phương thẳng đứng với độ ổn định cao.

Vì vậy, phương pháp tối ưu hóa kỹ thuật dịch chuyển Kirchoff kết hợp với chuẩn entropy và năng lượng mang lại hiệu quả cao trong xử lý số liệu GPR, giúp xác định tương đối chính xác vận tốc truyền sóng trong môi trường, tính được kích thước, vị trí và độ sâu dị vật với sai số nằm trong giới hạn cho phép.

chí các khoa học Trái Đất, 31(4), 307-310.
<https://doi.org/10.15625/0866-7187/3/4/9720>
 Cường, L.V.A., Trung, Đ. H., Vãn, N. T., Giảng, N.V., & Triết N.M. (2011). Nghiên cứu dịch chuyển Kirchoff để xác định mô hình vận tốc trong phương pháp điện từ tần số cao, *Tạp chí các Khoa học về Trái Đất*, 33(2), 142-150
<https://doi.org/10.15625/0866-7187/33/2/319>
 Flores-Tapia, D., & Pistorius, S. (2010). An Entropy-Based Propagation Speed Estimation Method for Near-Field Subsurface Radar Imaging, *Advances in Signal Processing*.
 Scales, J.A. (1995). *Theory of Seismic Imaging*, Samizdat Press (web publication) and Springer Publications

- Schneider, W. A. (1978). Integral formulation for migration in two and three dimensions, *Geophysics*, 13(1), 49-76.
<https://doi.org/10.1190/1.1440828>
- Thuan, N. V., Cuong, L. V. A., Van, N. T., Trung, Đ. H., Triet, V. M., & Liễu, V. N. N. (2017). Energy Analysis in Semiautomatic and Automatic Velocity Estimation for Ground Penetrating Radar Data in Urban Areas: Case Study in Ho Chi Minh City, Vietnam, *Advances and Applications in Geospatial Technology and Earth Resources*, Springer International Publishing https://doi.org/10.1007/978-3-319-68240-2_3
- Tín, D. Q. C., Sang, N. C., Thư, N. L. A. (2019). Xác định các vật thể bị chôn vùi ở các lớp đất đá tầng nông bằng ra đa xuyên đất sử dụng phép biến đổi wavelet liên tục. *Báo cáo nghiệm thu đề tài cấp Trường, Đại học Cần Thơ*.
- Trung, Đ.H., Hải, Đ.T.T., Ván, N.T. (2013), Sử dụng phương pháp dịch chuyển sai phân hữu hạn để xử lý số liệu GPR, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*, ISSN 1859-3097, 13(3A), 120-126.
- Vardy, M. E., & Henstock, T. J. (2010). A frequency-approximated approach to Kirchhoff migration, *Geophysics*, 75(6), 211-218.
<https://doi.org/10.1190/1.3491196>
- Ván, N. T., & Giảng, N. V. (2013). *Ra đa xuyên đất: phương pháp và ứng dụng*, NXB ĐHQG TP.HCM.
- Ván, N. T., Thuận, N. V., & Trung, Đ. H. (2015). Kết hợp phương pháp dịch chuyển Kirchhoff và biểu đồ năng lượng trong xử lý tài liệu GPR, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ ĐHQG-HCM*, 18(5), 42-50.
- Xu, X., & Miller, E. L. (2002). Entropy Optimized Contrast Stretch to Enhance Remote Sensing Imagery, *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*, 3, 915-918.
- Xu, X., Miller, E. L., & Rappaport, C. M. (2003). Minimum Entropy Regularization in Frequency-Wavenumber Migration to Localize Subsurface Objects, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(8), 1804-1812.
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic data analysis, USA*, Society of Exploration Geophysicists.
<https://doi/pdf/10.1190/1.9781560801580.fm>
- Zhou, H., Wan, X., Li, W., & Jiang, Y. (2011). Combining F-K filter with minimum entropy Stolt migration algorithm for subsurface object imaging and background permittivity estimation, *Procedia Engineering*, 23(5), 636-641.
<http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2558>