



DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.2376.1880>

## XỬ LÝ SỐ LIỆU RA-ĐA XUYÊN ĐẤT (GPR) TRONG XÂY DỰNG HÌNH ẢNH CÁC CÔNG TRÌNH DÂN DỤNG NGẦM Ở TẦNG NÔNG

Phạm Ngọc Thảo\* và Huỳnh Anh Tấn

Ban Khoa học Cơ bản, Trường Đại học Công nghệ Sài Gòn, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ, Email: [thao.phamngoc@stu.edu.vn](mailto:thao.phamngoc@stu.edu.vn)

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 19/5/2025; Ngày nhận chỉnh sửa: 14/10/2025; Ngày duyệt đăng: 19/10/2025

### Tóm tắt

Phương pháp Ra-đa Xuyên đất (GPR) có nhiều ưu điểm vượt trội và đã chứng minh hiệu quả cao trong khảo sát các công trình, đối tượng ngầm. Tuy nhiên, khó khăn lớn nhất vẫn nằm ở công tác xử lý và minh giải số liệu, vốn phức tạp và đòi hỏi nhiều kinh nghiệm chuyên môn. Nghiên cứu này hướng tới xây dựng một quy trình xử lý GPR hoàn chỉnh nhằm nâng cao độ tin cậy trong việc xác định dị vật, đặc biệt là hai thông số quan trọng: độ sâu và kích thước. Chúng tôi kế thừa các bộ lọc cơ bản trong phần mềm Reflexw (dịch chuyển thời gian, lọc nhiễu, lọc tần số...), sau đó áp dụng phân tích biên độ sóng để xác định độ sâu và dịch chuyển F-K để tái tạo kích thước dị vật. Kết quả thử nghiệm cho thấy quy trình này mang lại kết quả rất khả quan, với sai số kích thước chỉ khoảng 14%, qua đó khẳng định tính hiệu quả và tiềm năng ứng dụng của phương pháp trong khảo sát công trình ngầm và nghiên cứu địa vật lý.

**Từ khóa:** GPR, Phương pháp dịch chuyển F-K, Phân tích biên độ sóng, Quy trình xử lý số liệu GPR.

Trích dẫn: Phạm, N. T., & Huỳnh, A. T. (2026). Xử lý số liệu Ra-đa Xuyên đất (GPR) trong xây dựng hình ảnh các công trình dân dụng ngầm ở tầng nông. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, Online First, 1-13. <https://doi.org/10.52714/dthu.ns.2376.1880>

Copyright © 2026 The author(s). This work is licensed under a CC BY-NC 4.0 License.

## GROUND PENETRATING RADAR (GPR) DATA PROCESSING FOR IMAGING SHALLOW UNDERGROUND CIVIL STRUCTURES

Pham Ngoc Thao\* and Huynh Anh Tan

*Department of Basic Sciences, Saigon Technology University, Vietnam*

*\*Corresponding author, Email: thao.phamngoc@stu.edu.vn*

*Article history*

*Received: 19/5/2025; Received in revised form: 14/10/2025; Accepted: 19/10/2025*

### **Abstract**

*Ground Penetrating Radar (GPR) offers several outstanding advantages and has proven highly effective in surveying underground structures and buried objects. However, the major challenge lies in data processing and interpretation, which are inherently complex and require substantial expertise. This study aims to develop a comprehensive GPR data processing workflow to improve the reliability of anomaly identification, with particular emphasis on two critical parameters: depth and size. We adopted the basic filters available in the Reflexw software (time-zero correction, background removal, frequency filtering, etc.), followed by the application of wave amplitude analysis to determine depth and F–K migration to reconstruct the size of subsurface anomalies. Experimental results indicate that the proposed workflow provides promising outcomes, with the estimated object size showing an error of only about 14%, thereby demonstrating the effectiveness and application potential of this approach in subsurface structure surveys and geophysical studies.*

**Keywords:** *Amplitude Analysis, GPR, GPR Data Processing Workflow, F–K Migration Method.*

## 1. Giới thiệu

Phương pháp ra-đa xuyên đất (GPR) đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trên thế giới từ đầu thế kỉ 19. Trong quá trình xử lý dữ liệu, các nhà khoa học gặp nhiều khó khăn do nhiễu, vì vậy nhiều thuật toán đã được đề xuất nhằm nâng cao chất lượng dữ liệu và khả năng minh giải. Một số nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến: năm 2008, Rudzki sử dụng biến đổi Karhunen–Loeve để tách tín hiệu khỏi nhiễu (Rudzki, 2008), năm 2014 Bao và cộng sự áp dụng biến đổi Curvelet để cải thiện xử lý tín hiệu không gian–tần số (Bao & cs, 2014), hay năm 2021 Yulianita dùng các bộ lọc GPR để xác định đới thấm nước tại Jakarta (Yulianita, 2021).

Ở Việt Nam, GPR cũng được ứng dụng mạnh mẽ trong khảo sát công trình ngầm và nghiên cứu địa chất. Các nhóm nghiên cứu trong nước đã áp dụng nhiều thuật toán xử lý cơ bản như: dịch chuyển Kirchoff (Lê & cs, 2011), dịch chuyển sai phân hữu hạn (F–D) (Đặng & cs, 2013), nghiên cứu và áp dụng xử lý các dữ liệu hai chiều và đặt vào không gian ba chiều để phân tích và minh giải dữ liệu GPR được hiệu quả hơn (Đặng & cs, 2019).

Tuy các phương pháp dịch chuyển truyền thống như Kirchoff và F–D đều cho kết quả khá tốt. Thế nhưng chúng thường mất nhiều thời gian để tính toán, yêu cầu bộ nhớ lớn và độ chính xác giảm trong môi trường có độ dẫn điện cao hoặc có nhiễu ngẫu nhiên. Cụ thể là dịch chuyển Kirchoff cho độ chính xác cao nhưng tốc độ chậm, trong khi F–D cải thiện được độ phân giải song vẫn dễ nhiễu số nếu bước lưới nhỏ. Nhằm khắc phục các hạn chế đó, phương pháp dịch chuyển F–K (Frequency–Wavenumber Migration) được lựa chọn để ứng dụng trong nghiên cứu này.

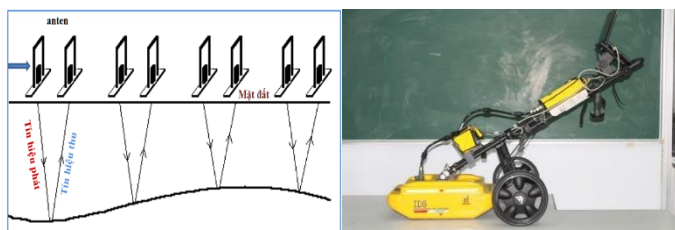
Phương pháp dịch chuyển F–K với các ưu điểm như: Xử lý nhanh trong miền tần số – số sóng, giảm dung lượng dữ liệu và tái tạo hình ảnh cấu trúc ngầm có độ phân giải cao, biên dị vật rõ nét hơn. Vì vậy, F–K được xem là lựa chọn tối ưu cho xử lý dữ liệu GPR thực địa, đồng thời hỗ trợ tốt trong việc xây dựng mô hình vận tốc và minh giải không gian ba chiều.

## 2. Phương pháp thu thập dữ liệu và quy trình xử lý – minh giải dữ liệu GPR

### Phương pháp thu thập số liệu

Kiểu thu thập dữ liệu thực hiện là kiểu khoảng cách chung. Trong kiểu thu thập này thì anten thu di chuyển đồng thời với anten phát trên mặt đất, sao cho khoảng cách giữa chúng là không đổi (*hình 1a*) (Bộ môn, 2020). Với kiểu thu thập dữ liệu theo kiểu CO thì thiết bị được sử dụng là máy Detector Duo của hãng IDS, Italia sản xuất (Hexagon, 2019).

Thiết bị Detector Duo được lựa chọn vì có độ ổn định cao, khả năng phát hiện đa tần và cho phép đo đồng thời ở hai tần số (700 MHz và 250 MHz), phù hợp với yêu cầu khảo sát tầng nông có độ sâu dưới 2 m.



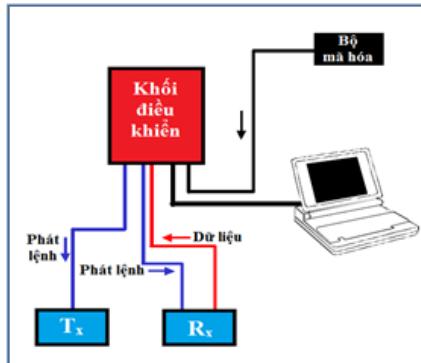
Hình 1. a) Kiểu đo đạc CO. b) Máy GPR Detector Duo(IDS).

Nguồn: (Hexagon, 2019) (Bộ môn, 2020)

Máy Detector Duo (*hình 1b*) là một hệ thống có chức năng phát hiện các đường ống và

các đường cáp kim loại hoặc phi kim loại bên dưới mặt đất. Theo nguyên lý sóng điện từ, Detector Duo sử dụng thiết bị cảm biến sử dụng các máy phát và thu sóng điện từ tần số cao. Đặc trưng thiết bị là sử dụng một anten tần số kép với tần số 700 MHz và 250 MHz, cho phép xác định đồng thời dị vật ở nông và sâu tại cùng thời điểm. Ở đây, tôi sử dụng dữ liệu ở tần số 700 MHz cho việc phát hiện các dị vật ở tầng nông trong khoảng 2m độ sâu.

Hệ thống radar xuyên đất gồm có: máy phát điện, máy thu phát tín hiệu, anten phát, anten thu, các thiết bị hiển thị và các thiết bị ghi, công ghép nối với bộ điều khiển (**hình 2**)(Hexagon, 2019). Thời gian lan truyền của sóng vô tuyến từ lúc phát đến lúc thu từ vài chục đến vài ngàn nano giây nên thiết bị phải đảm bảo độ chính xác cao.



**Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống GPR.**

Nguồn: (Hexagon, 2019)

Dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu của chúng tôi được đo đạc tại trục đường Bùi Thị Xuân, Thành phố Phan Rang – Tháp Chàm, Tỉnh Ninh Thuận. Khi thu thập số liệu GPR trên chiều dài tuyến đo khoảng 800m, được bố trí 8 điểm đo, mỗi một điểm đo cách nhau 100m, mỗi một điểm đo có hai tuyến đo và cách nhau khoảng 2m.

**Quy trình phân tích – minh giải số liệu**

Giai đoạn 1:	Thu thập số liệu thực địa
Giai đoạn 2:	Xử lý số liệu bằng phần mềm reflexw: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dịch chuyển thời gian</li> <li>- Lọc nhiễu nền</li> <li>- Lọc tần số</li> <li>- Lọc nhiễu nằm ngang</li> <li>- Khuếch đại tín hiệu</li> <li>- Dịch chuyển F – K</li> <li>- Xác định vận tốc</li> </ul>
Giai đoạn 3:	Xác định thông tin dị vật: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Phân tích biên độ sóng → Vị trí của dị vật</li> <li>- Phân tích lát cắt sau khi dịch chuyển F-K → Kích thước và độ sâu của dị vật</li> </ul>
Giai đoạn 4:	Minh giải tài liệu: Biểu diễn sự phân bố

**Hình 3. Quy trình phân tích số liệu**

Quy trình phân tích số liệu GPR gồm có 3 giai đoạn chính:

- + Giai đoạn 1: Thu thập số liệu thực địa.
- + Giai đoạn 2: Xử lý số liệu bằng phần mềm Reflexw.

- + Giai đoạn 3: Xác định thông tin dị vật.
- + Giai đoạn 4: Minh giải tài liệu: biểu diễn sự phân bố dị vật ngầm.

Quy trình này được minh họa sơ lược trên **hình 3** và các nội dung cụ thể của từng giai đoạn sẽ được trình bày lần lượt tại các mục như sau: Giai đoạn 1 đã được trình bày ở mục 2.1, giai đoạn 2 sẽ được trình bày trong mục 2.3, giai đoạn 3 sẽ được trình bày trong mục 2.4 và giai đoạn 4 sẽ được trình bày ở mục 2.5.

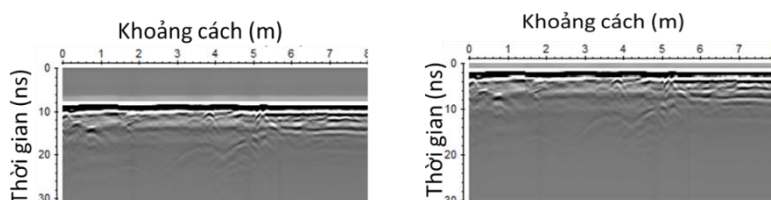
### Giai đoạn 2: Xử lý phần mềm Reflexw

Sau khi thu thập dữ liệu ra-đa xuyên đất, chúng tôi dùng phần mềm Reflexw để xử lý. Mỗi bước xử lý đều được kiểm chứng bằng cách so sánh trực quan mặt cắt GPR trước và sau xử lý, nhằm đảm bảo không làm biến dạng hình thái tín hiệu phản xạ. Tiến hành truy cập vào dữ liệu cần xử lý, từ mặt cắt GPR ban đầu (**hình 4, bên trái**) tiến hành xử lý theo các bước sau:

**Bước 1:** Hiệu chỉnh giá trị thời gian tín hiệu đầu tiên xuất hiện, ta loại bỏ được thời gian sóng ruyền từ anten đến mặt đất bằng công cụ move starttime (hình 4)

Miêu tả: Trong quá trình thu thập số liệu, anten GPR do thiết bị điện tử luôn di chuyển cách mặt đất một khoảng nhất định. Như vậy, sóng điện từ sẽ truyền qua lớp không khí và tín hiệu phản xạ từ mặt đất thể hiện rõ trên mặt cắt GPR.

Mục đích: Nhằm tăng độ chính xác độ sâu và vị trí các dị thường, ta cần hiệu chỉnh sao cho mốc thời gian trên mặt cắt nằm ngay vị trí mặt đất.

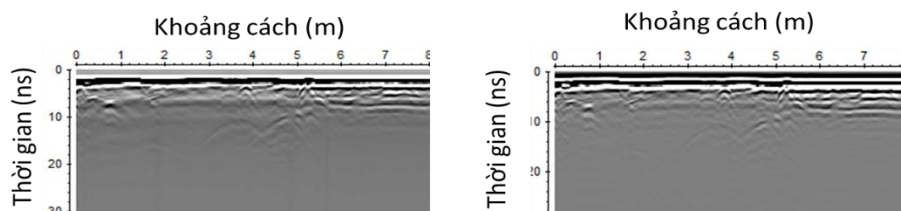


**Hình 4. Giai đoạn 2, Dữ liệu đầu vào T15 (trái) và đã được xử lý move starttime (phải)**

**Bước 2:** Thực hiện loại các nhiễu không đổi luôn xuất hiện trong mặt cắt GPR bằng công cụ Subtract mean (dewow)( hình 5)

Miêu tả: Trong mặt cắt GPR luôn xuất hiện tín hiệu nhiễu không đổi gọi là hiện tượng “wow”. Hiện tượng “wow” là những thành phần tần số thấp do nhiễu hệ thống sự thay đổi thành phần điện DC từ anten hoặc hệ thống thu phát làm che khuất thông tin hữu ích từ tín hiệu GPR (Battista, 2009).

Mục đích: Loại bỏ các nhiễu không đổi luôn xuất hiện trong mặt cắt GPR.

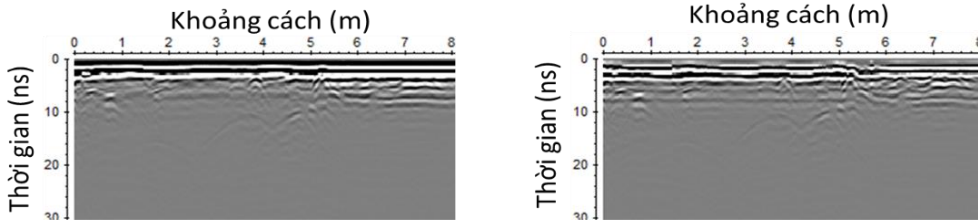


**Hình 5. Giai đoạn 2, Dữ liệu GPR đầu vào tuyến T15 (trái) và đã được xử lý dewow (phải)**

**Bước 3:** Thực hiện loại bỏ các nhiễu nền và nhiễu nằm ngang xuất hiện trong mặt cắt GPR bằng công cụ Background removal (hình 6)

Miêu tả: Xung quanh chúng ta luôn có sự hiện diện của sóng điện từ phát ra từ các thiết bị như: điện thoại, vô tuyến, máy móc,....

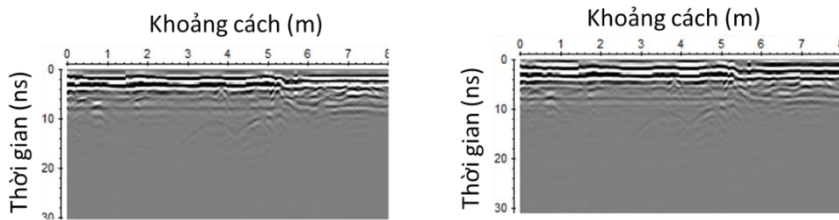
Mục đích bộ lọc: Loại bỏ các nhiễu thường trực, không đổi trong mặt cắt GPR



**Hình 6. Giai đoạn 2, Dữ liệu GPR đầu vào tuyến T15 (trái) và đã được xử lý Background removal (phải)**

**Bước 4:** Thực hiện dùng để lọc thông dải trong khoảng tần số thấp đến tần số cao bằng việc sử dụng hàm sin để lọc tần số bằng công cụ Bandpassbutterworth (hình 7)

Để sử dụng bộ lọc này, thực hiện như sau:

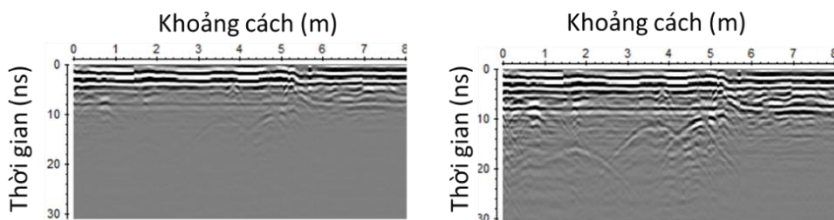


**Hình 7. Giai đoạn 2., Dữ liệu GPR đầu vào tuyến T15 (trái) và đã được xử lý Bandpassbutterworth (phải)**

**Bước 5:** Khuếch đại tín hiệu (Gain function) (hình 8)

Miêu tả: Môi trường đã hấp thụ phần nào sóng điện từ khi chúng truyền qua, hay các bộ lọc mà chúng ta sử dụng ngoài loại nhiễu thì chúng cũng phần nào làm ảnh hưởng đến tín hiệu chúng ta quan tâm. Do đó, mặt cắt GPR sẽ bị mờ.

Mục đích xử lý: Bù lại sự mất mát, làm rõ (đậm) mặt cắt GPR.

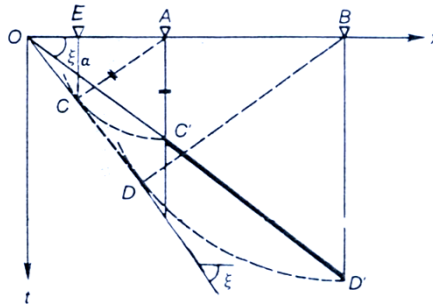


**Hình 8. Giai đoạn 2, Dữ liệu GPR sau khử nhiễu tuyến T15 (trái) và đã được khuếch đại Gain function (phải)**

**Bước 6:** Dịch chuyển F-K

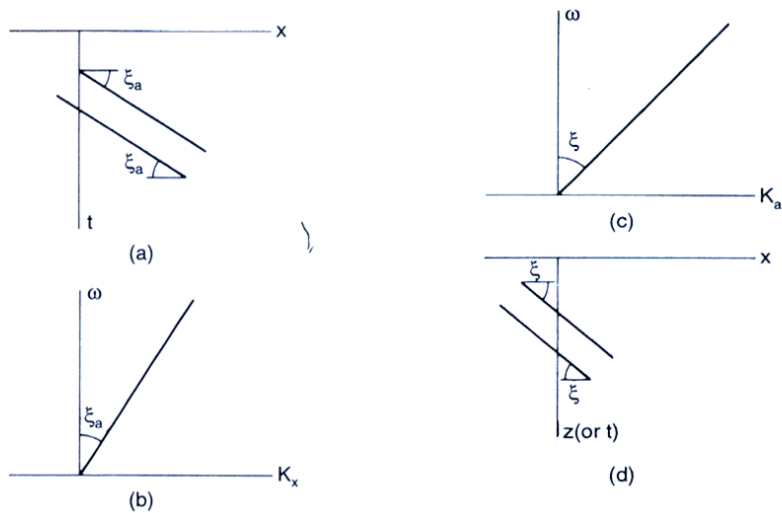
Phương pháp dịch chuyển F-K được áp dụng để hiệu chỉnh trường sóng và tái tạo hình ảnh. Cơ sở của phương pháp dịch chuyển F-K là dịch chuyển trục đồng pha sóng C'D' về mặt cắt thực CD (hình 9), chúng ta phải quay đoạn C'D' từ góc  $\xi_a$  về góc  $\xi$  thực. Mỗi quan

hệ giữa chúng được xác định bởi công thức:  $tg\xi = \sin\xi_a$  (3.1)



**Hình 9. Sự dịch chuyển từ C'D' về mặt CD thực.**

Nguồn: (Lê, 2020; Yilmaz, 2001)



**Hình 10. Phương pháp dịch chuyển F-K.**

Nguồn: (Lê, 2020) (Yilmaz, 2001)

Nếu tốc độ trong môi trường không đổi thì trong không gian (t,x) mặt sóng sẽ nằm nghiêng một góc nhất định, nghĩa là sóng có tốc độ biểu kiến nhất định hay số sóng K nhất định (hình 10). Tương ứng trong không gian F-K sóng cũng được đặc trưng bằng độ dốc nhất định (Nguyễn & cs, 2017).

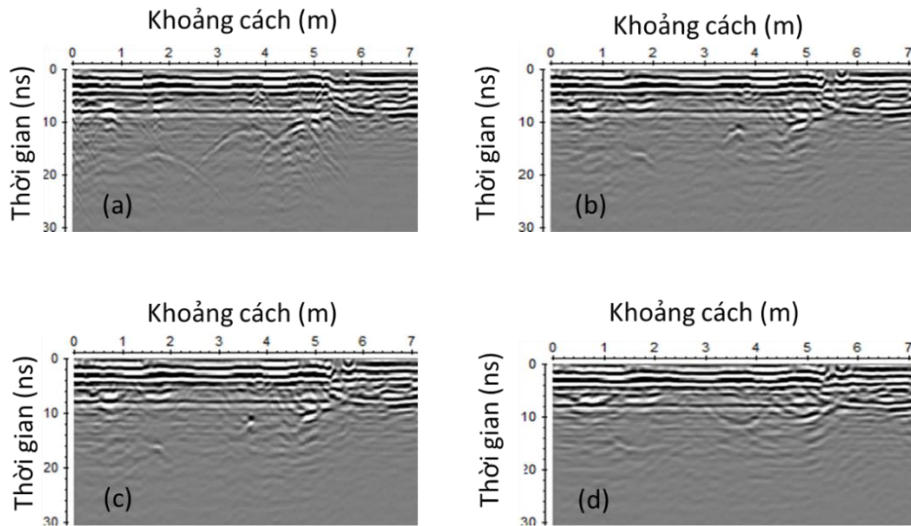
Theo hệ thức (3.1) thì nhiệm vụ dịch chuyển trong miền F-K chỉ đơn thuần là thực hiện việc tính toán để quay dịch góc nghiêng của mặt sóng từ  $\xi_a$  về góc  $\xi$ . Sau đó dùng tích phân Fourier ngược chuyển trường sóng từ miền F-K sang miền (t,x) (Stolt, 1978).

**Bước 7: Xác định vận tốc**

Sau khi dịch chuyển F-K đối với 1 dị vật cụ thể ta có một vận tốc tới hạn mà tại đó ta nhìn vào hyperbol hội tụ tại một điểm xem hình 11.

Dựa trên các lát cắt F-K với nhiều giá trị vận tốc khác nhau (0.14; 0.15; 0.16 m/ns), ta chọn giá trị vận tốc mà tại đó đường hyperbol hội tụ hoàn toàn. Các giá trị vận tốc này được lựa chọn dựa trên kinh nghiệm khảo sát địa vật lý trước đây và tham chiếu tài liệu (Nguyễn & cs, 2017) phù hợp với môi trường đất khô – ẩm nhẹ tại khu vực nghiên cứu. Bước nhảy 0.01

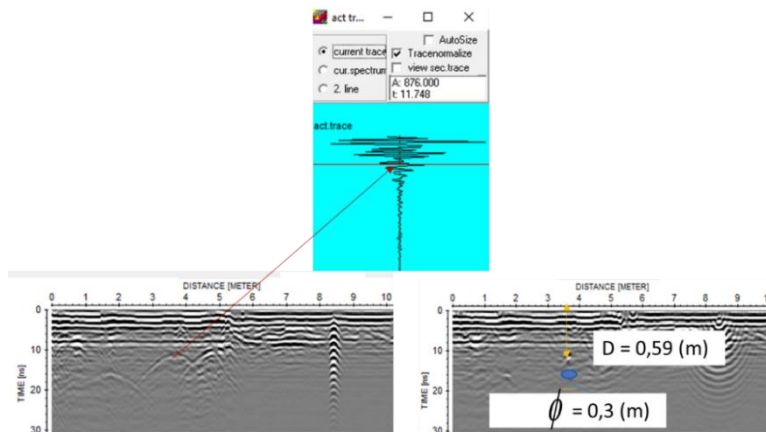
m/ns giúp xác định chính xác hơn vận tốc hội tụ. Sai số vận tốc ước lượng trong nghiên cứu khoảng  $\pm 0.02$  m/ns, tương ứng với sai số độ sâu khoảng 13 – 20% do ảnh hưởng của nhiễu, sự không đồng nhất của môi trường và sai số thời gian trong xác định đỉnh hyperbol.



**Hình 11. Giai đoạn 2, bước cuối cùng xác định vận tốc. (a) Dữ liệu đầu vào GPR ,(b) lát cắt ứng với vận tốc trước hạn  $v_1 = 0.14$  (m/ns), (c) lát cắt ứng với vận tốc khi hyperbol hội tụ  $v_2 = 0.15$  (m/ns), (d) lát cắt ứng với vận tốc lớn hơn vận tốc khi hyperbol hội tụ  $v_3 = 0.16$  (m/ns). Chú ý là vị trí phân tích vận tốc dựa vào quan sát hiệu ứng dịch chuyển (hyperbol hướng lên, hướng xuống và hội tụ) là điểm  $x=3.7m$  và  $t=12ns$**

### Giai đoạn 3: Xác định thông tin dị vật

Để đảm bảo độ tin cậy, kích thước dị vật được xác định không chỉ dựa vào biên độ cực đại mà còn được đối chiếu với các lát cắt lân cận. Ngoài ra, phép đo lặp lại nhiều lần tại cùng vị trí giúp kiểm tra tính ổn định của kích thước ước lượng. Phương pháp này cho phép so sánh sự thay đổi kích thước giữa các tuyến đo, giúp kiểm tra độ ổn định của kết quả và loại bỏ sai số cục bộ.



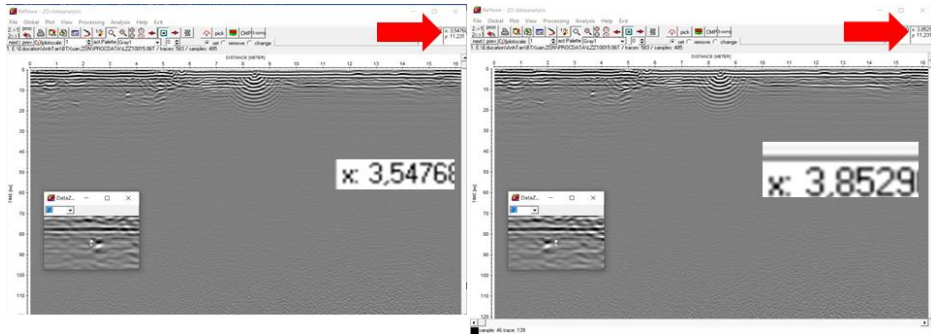
**Hình 12. Dữ liệu GPR tuyến T15 chưa dịch chuyển (Trái). Dữ liệu GPR tuyến T15 đã dịch chuyển (Phải). Xung sóng ứng với đỉnh của hyperbol (Trên)**

Đối với thông tin vị trí trong tuyến đo: Chúng tôi sẽ sử dụng lát cắt dịch chuyển GPR chưa dịch chuyển xác định xác định theo trục x (khoảng cách). Kết quả khoảng cách so với

đầu tuyến đo là 3,7m

Sau đó, áp dụng phương pháp dịch chuyển F-K, các thông tin độ sâu và kích thước của dị vật sẽ được lấy từ lát cắt đã dịch chuyển F-K. Chú ý rằng, để phát hiện các vị trí hyperbol, đỉnh của hyperbol, chúng tôi sử dụng sự khác biệt về biên độ của hyperbol so với khu vực xung quanh ở đường xung sóng (xem hình 12, phía trên). Các vị trí thuộc hyperbol có biên độ cao hơn hẳn so với các điểm không thuộc hyperbol.

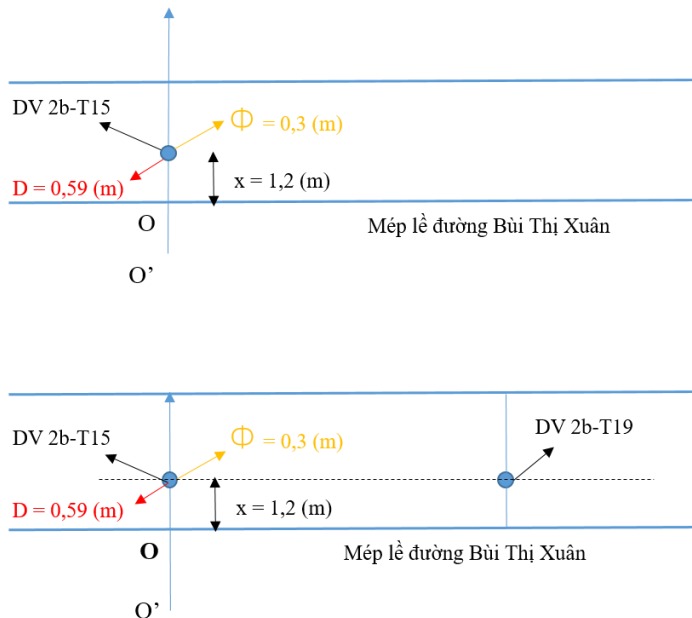
Đối với thông tin kích thước: Chúng tôi xác định theo trục x (khoảng cách). Cụ thể là: vị trí mép bên phải (Hình 13, bên phải) trừ vị trí mép bên trái (Hình 13, bên trái) của tín hiệu hyperbol đã hội tụ. Kết quả thu được đường kính dị vật khoảng 0.3m.



Hình 13. Xác định kích thước dị vật

Đối với độ sâu: Chúng tôi áp dụng công thức:  $D = \frac{v \times t}{2}$  (Nguyễn & cs, 2017). Với biến thời gian chúng tôi sẽ xác định dựa trên đỉnh hyperbol trong quá trình phân tích biên độ sóng (xem hình 12, phía bên phải). Vậy độ sâu của dị vật là 0,59 (m).

#### Giai đoạn 4: Minh giải tài liệu



Hình 14. Dị vật 2b tuyến T15 được xác định vị trí x, đường kính  $\phi$  và độ sâu D (trên). Nối tuyến vị trí các dị vật được rút ra từ dữ liệu GPR (dưới)

Chuyển các kết quả đo đạc, phân tích được trong giai đoạn 3 vào sơ đồ tuyến đo để có hình vẽ của dị vật một cách cụ thể xem **hình 14**.

Trong **hình 14** thể hiện kết quả phân tích dị vật ở một tuyến T15 gồm có vị trí, độ sâu và kích thước (hình tròn màu xanh). Đối với ảnh dưới ở **hình 14**, dị vật này cũng được phát hiện ra ở tuyến T19. Để thể hiện việc minh giải, một đoạn thẳng tuyến tính đi qua hai vị trí này mang ý nghĩa rằng đây có thể là một dị vật là đường ống ngầm dân dụng kéo dài suốt vị trí khảo sát.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Kết quả

Trong quá trình xử lý sơ bộ chúng tôi nhận thấy rằng nếu tại một điểm đo hai tuyến đo trùng khớp tín hiệu dị vật thì chúng ta có thể khẳng định được rằng dị vật có kéo dài theo phương tuyến. Chúng tôi đã áp dụng quy trình phân tích gồm 4 giai đoạn được trình bày trong phần 2 cho tất cả các số liệu. Tuy nhiên, tại một số vị trí, hình ảnh dị vật trên một hoặc cả hai lát cắt GPR chưa thể hiện rõ do tín hiệu phản xạ yếu hoặc mức độ nhiễu cao. Để đảm bảo tính khách quan và độ tin cậy của kết quả, chúng tôi đã lựa chọn các tuyến T2, T4, T7, T10, T11, T15, T19 và T21 để trình bày và phân tích chi tiết trong bài viết. Kết quả minh giải cho thấy các dị vật được phát hiện ổn định trên nhiều tuyến đo, chúng tôi quy trình xử lý đã loại bỏ phần lớn nhiễu và giữ được cấu trúc phản xạ thực. Các giá trị đường kính và độ sâu được tổng hợp trong **bảng 1** và **bảng 2**, thể hiện sai số tương đối giữa các tuyến.

**Bảng 1. Kết quả xử lý số liệu tại đường Bùi Thị Xuân.**

Tuyến đo	Dị vật 1b			Dị vật 2b			Dị vật 3b		
	Đường kính $\phi$ (m)	Vận tốc v(m/ns)	Độ sâu D(m)	Đường kính $\phi$ (m)	Vận tốc v(m/ns)	Độ sâu D(m)	Đường kính $\phi$ (m)	Vận tốc v(m/ns)	Độ sâu D(m)
BTX1	0,26	0,14	0,22	0,30	0,10	0,21	0,30	0,13	0,21
BTX2	0,23	0,14	0,32	0,30	0,09	0,60	0,26	0,15	0,45
BTX3	0,25	0,14	0,35	X	X	X	X	X	X
BTX4	0,30	0,14	0,22	0,29	0,16	0,50	0,31	0,16	0,50
BTX5	0,30	0,07	0,50	0,32	0,15	0,46	0,30	0,16	0,53
BTX6	0,30	0,16	0,45	0,25	0,15	0,59	0,30	0,15	0,75
BTX7	0,31	0,13	0,67	0,31	0,12	0,84	0,26	0,12	0,70
BTX8	0,30	0,14	0,33	0,20	0,13	0,40	0,30	0,15	0,31

Ghi chú: Dấu “X” thể hiện sự không có kết quả minh giải từ lát cắt GPR. Điều này sẽ được thảo luận ở phần 3.2.

Tổng hợp kết quả từ các mặt cắt tại các tuyến đo chúng ta tính giá trị trung bình và sai

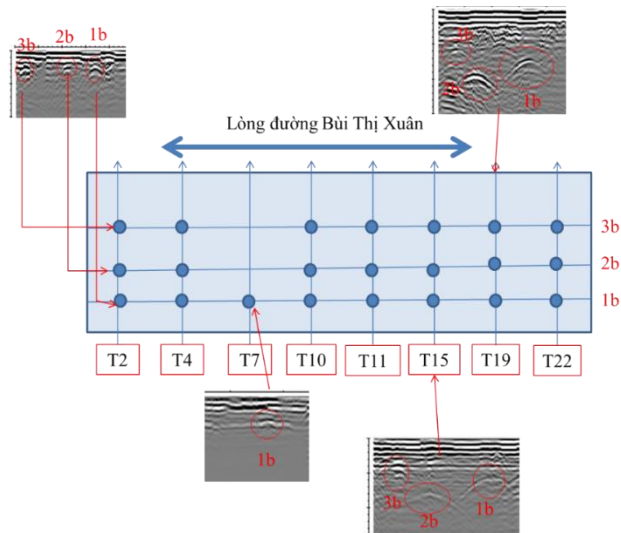
số. Sau đó, tổng hợp kết quả như ở **bảng 2**.

**Bảng 2. Bảng tổng hợp kết quả**

	Dị vật 1b		Dị vật 2b		Dị vật 3b	
	Đường kính $\phi$ (m)	Độ sâu D(m)	Đường kính $\phi$ (m)	Độ sâu D(m)	Đường kính $\phi$ (m)	Độ sâu D(m)
	0,28 ± 0,02	0,38±0,12	0,28 ± 0,03	0,51±0,25	0,29 ± 0,02	0,49±0,14
Sai số tương đối	7,1%	31,6%	10,7%	27,4%	6%	28,6%

Sai số kích thước nhỏ hơn 11%, trong khi sai số độ sâu dao động từ 27 - 32%. Điều này cho thấy độ tin cậy của quy trình trong việc xác định kích thước ngang là khá cao, nhưng việc xác định độ sâu vẫn còn chịu ảnh hưởng bởi vận tốc truyền sóng, thời gian truyền sóng và điều kiện địa chất cục bộ vì vậy kết quả độ sâu có sai số lớn.

Cuối cùng, dựa trên cơ sở phân tích toàn bộ các bước được trình bày trong Mục 2 kết hợp với kết quả ở **Bảng 1**, chúng tôi tiến hành liên kết các dị vật theo tuyến, như minh họa trong **Hình 15**.



**Hình 15. Kết quả sơ đồ nối tuyến các dị vật của đường Bùi Thị Xuân**

### 3.2. Thảo luận

Kết quả xử lý dữ liệu GPR tại tuyến Bùi Thị Xuân cho thấy sự hiện diện của ba dị vật (1b, 2b, 3b) với các thông số đường kính và độ sâu đã được xác định. Giá trị trung bình cho thấy đường kính các dị vật dao động quanh 0,25–0,31m với sai số tương đối nhỏ (6–10,7%), chứng tỏ độ tin cậy của kết quả khá cao trong việc xác định kích thước ngang. Tuy nhiên, sai số đối với độ sâu lại khá lớn (27–31%) phản ánh tính không ổn định của phép ước lượng độ sâu. Dựa trên kết quả sai số thực nghiệm, độ sâu khảo sát cho kết quả tin cậy nhất nằm trong khoảng 0–0,4 m, với sai số trung bình khoảng 20%. Khi độ sâu vượt quá 0,5 m, sai số tăng lên trên 27–30%, do ảnh hưởng của suy giảm tín hiệu và biến thiên vận tốc trong tầng đất, nên kết quả chỉ nên dùng để tham khảo định tính.

Ngoài ra, tại điểm đo BTX3, một số mặt cắt không thu được kết quả minh giải (ký hiệu “X” trong bảng 1), dù đã áp dụng các phương pháp xử lý chuyên biệt nhưng chỉ phát hiện dị vật 1b, trong khi các điểm đo trước đó đều xuất hiện ba dị vật. Ban đầu, chúng tôi giả định đây có thể là đường ống nước dân dụng nên có khả năng đã chuyển hướng. Tuy nhiên, tại các điểm đo từ BTX4 đến BTX8, dị vật 2b và 3b lại xuất hiện rõ ràng. Do đó, chúng tôi cho rằng nguyên nhân có thể đến từ điều kiện địa chất phức tạp hoặc tín hiệu phản xạ yếu tại BTX3. Kết quả này cho thấy tầm quan trọng của việc triển khai nhiều tuyến đo song song và áp dụng các thuật toán xử lý nâng cao nhằm cải thiện độ phân giải và giảm nhiễu. Đồng thời, quá trình phân tích dữ liệu GPR cần được thực hiện cẩn trọng, kết hợp chặt chẽ với thông tin tiên nghiệm về địa chất từng khu vực khảo sát.

Trong các nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn, cần đặc biệt chú trọng đến việc hiệu chỉnh chính xác mô hình vận tốc và áp dụng các phương pháp xử lý tiên tiến để giảm thiểu sai số về độ sâu, từ đó nâng cao độ tin cậy và giá trị khoa học của kết quả minh giải.

Kết quả nghiên cứu cho thấy quy trình trong bài nghiên cứu này có thể được ứng dụng trong các công tác khảo sát, khoanh vùng dị vật để tiến hành quy hoạch, chỉnh trang đô thị. Chúng tôi nhận thấy nên áp dụng quy trình và các bộ lọc mà chúng tôi đã sử dụng trong nghiên cứu này trước khi áp dụng các thuật toán và phương pháp xử lý số liệu khác.

Hướng nghiên cứu cần phát triển:

Các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào việc hiệu chỉnh mô hình vận tốc chính xác hơn, đồng thời áp dụng các thuật toán xử lý tiên tiến nhằm giảm sai số độ sâu. Ngoài ra, việc phát triển mô hình không gian ba chiều (3D) từ dữ liệu nhiều tuyến đo sẽ giúp tái hiện trực quan hơn hình thái và sự phân bố của dị vật, từ đó nâng cao độ tin cậy trong minh giải số liệu GPR.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi trường Đại học Công nghệ Sài Gòn thông qua hợp đồng số 14/HĐ-DSG-NCKH.

#### Tài Liệu Tham Khảo

- Bao, Q. Z., Li, Q. C., & Chen, W. C. (2014). GPR data noise attenuation on the curvelet transform. *Applied Geophysics*, 11(3), 301-310. <https://doi.org/10.1007/s11770-014-0444-2>.
- Battista, B. M., Addison, A. D., & Knapp, C. C. (2009). Empirical mode decomposition operator for dewowing GPR data. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 14(4), 163-169. <https://doi.org/10.2113/JEEG14.4.163>.
- Bộ môn, V. L. (2020). Ảnh tư liệu 2021. *Máy Detector Duo(IDS)*. Trường ĐH Khoa học Tự nhiên, ĐHQG-HCM, Hồ Chí Minh.
- Đặng, D. H., Lê, C. V. A., Đặng, T. H., & Nguyễn, V. T. (2019). Data analysis of two-dimensional ground penetration radar profiles in three-dimensional space to study of underground objects. *VNUHCM Journal of Natural Sciences*, 3(3), 169-179. <https://doi.org/10.32508/stdjns.v3i3.720>.
- Đặng, T. H., Đặng, H. T. T., Nguyễn, V. T. (2013). Áp dụng dịch chuyển sai phân hữu hạn vào xử lý số liệu Ra đa xuyên đất. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*, ISSN: 1859-3097, 13(3A), 120-126.
- Hexagon. (2019). Georadar, IDS. Retrieved from <<http://idsgeoradar.com/products/ground-penetrating-radar/opera-duo>>

- Lê, C. V. (2020). Xây dựng qui trình tự động hoá chuỗi xử lý và minh giải dữ liệu sóng điện từ tần số cao trong việc khảo sát dị thường và công trình ngầm. *Hồ Chí Minh: Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh*.
- Nguyễn, V. T. (Chủ Biên), Đặng, T. H., Nguyễn, T. V., Võ, T. M., Võ, L. N. N., Lê, C. V. (2017). *Phương pháp dịch chuyển và các phần mềm xử lý dữ liệu Ra đa xuyên đất*. Tp. Hồ Chí Minh: NXB Đại học Quốc gia TP.HCM.
- Rudzki, M. (2008). Coherent Noise Attenuation in the GPR Data via the Karhunen-Loève Transform. *Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, cp-64-00065. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20146289>
- Stolt, R. H. (1978). Migration by Fourier Transform. *Geophysics*, 43(1), 23-48. <https://doi.org/10.1190/1.1440826>
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. United States of America: Society of Exploration Geophysicists.
- Yulianita, D., Aisyah, R. R., Wafi, A., Setiawan, N. S., & Mariyanto, M. (2021, April). Detection of water seepage in lake body using ground penetrating radar method. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1876, No. 1, p. 012012). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1876/1/012012>
- Zhao, A., Jiang, Y., & Wang, W. (2005). Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel GPR data via the Karhunen-Loève transform. *PIERS Online*, 1(6), 754-757. <https://doi.org/10.2529/piers041210090705>