

NGHIÊN CỨU CẤU TẠO VÀ ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ RADAR XUYỀN ĐẤT IDS KẾT HỢP PHƯƠNG PHÁP HỌC SÂU TRONG KHẢO SÁT CÔNG TRÌNH NGẦM

Đoàn Xuân Hưng¹, Phạm Thị Thanh Vân², Vũ Đức Trường³

^{1,2,3}Viện Thiết kế/Tổng cục Hậu cần - Kỹ thuật/Bộ Quốc phòng

¹Email: xuanhungdhhk@gmail.com, 0334 044 402; ²vanvtkbqp@gmail.com, 0914 344 761;

³truongthinhkiem.vtk@gmail.com, 0989 310 024

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-6>

TÓM TẮT: Công nghệ radar xuyên đất (Ground Penetrating Radar - GPR) là một kỹ thuật khảo sát không phá hủy sử dụng sóng điện từ để phát hiện các vật thể nằm sâu dưới bề mặt đất mà không cần đào bới. Bài báo trình bày phân tích chi tiết cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ thống radar xuyên đất IDS tần số kép F200-600 MHz. Nghiên cứu tập trung vào ứng dụng thiết bị trong việc dò tìm các cấu trúc ngầm phức tạp, đồng thời đề xuất một quy trình tự động dựa trên kỹ thuật học sâu (deep machine learning) để xác định vị trí và đặc điểm của công trình ngầm từ dữ liệu radar đầu ra. Phương pháp này giúp nâng cao độ chính xác trong nhận dạng mục tiêu và tối ưu hóa quá trình xử lý tín hiệu, đồng thời giảm thiểu sự phụ thuộc vào phân tích thủ công. Kết quả thử nghiệm thực địa cho thấy hiệu quả vượt trội của giải pháp tích hợp giữa radar xuyên đất IDS và thuật toán học sâu trong các ứng dụng địa kỹ thuật và quản lý hạ tầng ngầm.

TỪ KHÓA: Radar xuyên đất, IDS, công trình ngầm, dị vật ngầm, GeoRadar.

ABSTRACT: Ground Penetrating Radar (GPR) technology is a non-destructive surveying technique that utilizes electromagnetic waves to detect subsurface objects without excavation. This paper presents a detailed analysis of the structure and operating principles of the IDS dual-frequency Ground Penetrating Radar system, operating at F200-600 MHz. The study focuses on the application of the device for detecting complex underground structures and proposes an automated procedure based on deep machine learning techniques to identify the location and characteristics of subsurface infrastructures from radar data. This approach enhances target recognition accuracy and optimizes signal processing while minimizing reliance on manual interpretation. Field test results demonstrate the superior performance of the integrated IDS GPR system and deep learning algorithms in geotechnical applications and underground infrastructure management.

KEYWORDS: Ground Penetrating Radar, IDS, subsurface infrastructure, buried objects, GeoRadar.

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và hạ tầng kỹ thuật ngày càng phát triển, nhu cầu khảo sát, quản lý và bảo trì các công trình ngầm (đường ống cấp - thoát nước, cáp điện lực, viễn thông, hệ thống hầm kỹ thuật) ngày càng trở nên cấp thiết. Các phương pháp truyền thống như dựa trên bản vẽ thiết kế, hồ sơ quản lý hay khoan đào kiểm chứng đều có những hạn chế lớn: dữ liệu thường không cập nhật, công tác đào bới gây tốn kém, gián đoạn sinh hoạt đô thị và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn [1].

Trong hai thập kỷ qua, công nghệ radar xuyên đất (Ground Penetrating Radar - GPR) đã chứng minh hiệu quả vượt trội trong khảo sát không phá hủy, cho phép thu thập thông tin dưới bề mặt nhờ sử dụng sóng điện từ [2]. Radar xuyên đất (GPR) là phương pháp địa vật lý sử dụng sóng điện từ (thông thường trong khoảng tần số từ 10 - 2000 MHz) để nghiên cứu xác định vị trí, độ sâu và hình dạng của các đối tượng ngầm, từ đó hỗ trợ kỹ sư trong công tác khảo sát địa kỹ thuật, kiểm định kết cấu, quản lý hạ tầng ngầm [3, 4, 5, 6, 7]. Trong số nhiều hệ thống thương mại, thiết bị IDS GPR RIS MF Hi-mod#4

tần số kép (200 - 600 MHz) được đánh giá cao bởi tính linh hoạt, khả năng khảo sát ở cả độ sâu lớn và độ phân giải cao [8, 9].



Hình 1: Khảo sát công trình ngầm bằng công nghệ Radar xuyên đất tần số kép (200 - 600 MHz)

Tuy nhiên, một thách thức lớn trong ứng dụng GPR là việc diễn giải dữ liệu còn phụ thuộc nhiều vào chuyên gia. Các bản ghi radar thường chứa nhiễu, tín hiệu chồng lấn và biến thiên mạnh theo điều kiện địa chất. Do đó, việc tự động hóa quá trình phân tích dữ liệu GPR để nâng cao độ chính xác, giảm thiểu sai sót, bớt phụ thuộc và yếu tố con người và tiết kiệm thời gian là một vấn đề cần được nghiên cứu.

Trong những năm gần đây, các phương pháp học sâu đã chứng minh hiệu quả vượt trội trong xử lý ảnh và nhận dạng mẫu [10, 11]. Việc kết hợp công nghệ GPR với học sâu mở ra triển vọng xây dựng hệ thống phân tích dữ liệu tự động, có khả năng nhận diện công trình ngầm một cách chính xác và đáng tin cậy.

Bài báo này tập trung vào hai nội dung chính: (i) phân tích cấu tạo và nguyên lý hoạt động của hệ thống radar xuyên đất IDS F200-600 MHz, và (ii) đề xuất quy trình tích hợp học sâu trong xử lý dữ liệu radar để nhận dạng công trình ngầm. Kết quả nghiên cứu được kiểm chứng qua thử nghiệm thực địa tại khu vực cụ thể, chứng minh tính khả thi và hiệu quả ứng dụng trong quản lý hạ tầng ngầm và khảo sát địa kỹ thuật.

2. CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG RADAR XUYÊN ĐẤT IDS F200-600 MHz

2.1. Cấu tạo của hệ hống

Hệ thống radar xuyên đất RIS MF Hi-mod#4 (Hình 2) được trang bị cụm ăng-ten tần số kép 200 - 600 MHz, cho phép đồng thời đạt độ xuyên sâu và độ phân giải cao trong khảo sát địa chất và công trình ngầm [13, 14]. Ăng-ten 200 MHz thích

hợp cho phát hiện các đối tượng ở độ sâu lớn (khoảng 6 m), trong khi ăng-ten 600 MHz cung cấp dữ liệu chi tiết ở vùng nông (< 3,5 m) [15]. Hệ thống được tích hợp bánh xe ghi hành trình giúp đánh dấu vị trí di vật.



Hình 2: Cấu tạo hệ thống Radar xuyên đất IDS tần số kép (200 - 600 MHz) [12]

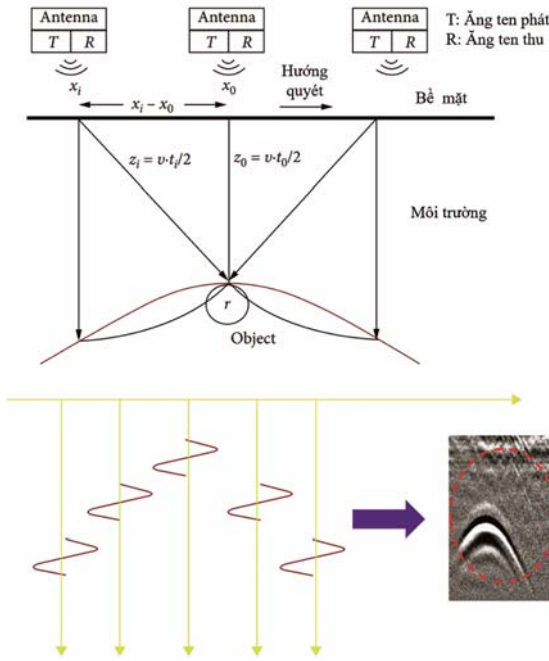
Tín hiệu thu được được xử lý qua bộ điều khiển trung tâm Hi-mod với bộ xử lý tín hiệu số (DSP), bảo đảm lọc nhiễu, hiệu chỉnh biên độ và truyền dữ liệu thời gian thực tới thiết bị hiển thị [13]. Máy tính gắn trên khung xe đẩy đóng vai trò hiển thị và lưu trữ dữ liệu, đồng thời hỗ trợ phân tích bằng phần mềm chuyên dụng bao gồm phần mềm K2 FastWave được sử dụng để thu thập dữ liệu 2D và phần mềm Gred HD để xử lý số liệu [14, 16].

Ngoài ra, phụ kiện đi kèm bao gồm hệ thống dây cáp, nguồn điện dung lượng cao cho phép máy hoạt động liên tục trong nhiều giờ.

2.2. Nguyên lý hoạt động

2.2.1. Cơ sở lý thuyết

Hệ thống radar xuyên đất IDS F200-600 MHz hoạt động dựa trên nguyên lý lan truyền và phản xạ sóng điện từ trong môi trường đất. Khi sóng điện từ được phát từ ăng-ten, chúng truyền xuống lớp đất và bị phản xạ tại các ranh giới có sự thay đổi hằng số điện môi. Tín hiệu phản xạ được ăng-ten thu nhận, số hóa và xử lý để suy ra vị trí và đặc tính của công trình ngầm [17, 18].



Hình 3: Nguyên lý hình thành dạng đặc trưng hyperbol trong ảnh radar dạng B-scan [16]

Sự lan truyền sóng trong môi trường điện môi được mô tả bởi hệ phương trình Maxwell:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

Trong đó: E và H lần lượt là cường độ điện trường và từ trường; ε là độ điện thẩm; μ là độ từ thẩm; σ là độ dẫn điện của môi trường.

Trong phần lớn các trường hợp khảo sát công trình ngầm, $\mu \approx \mu_0$, do đó vận tốc lan truyền sóng v phụ thuộc chủ yếu vào độ điện thẩm tương đối ε_r :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

Với c là tốc độ ánh sáng trong môi trường chân không. Khi tín hiệu được phản xạ lại ăng-ten, độ sâu đối tượng d được tính từ thời gian lan truyền hai chiều t theo công thức (3):

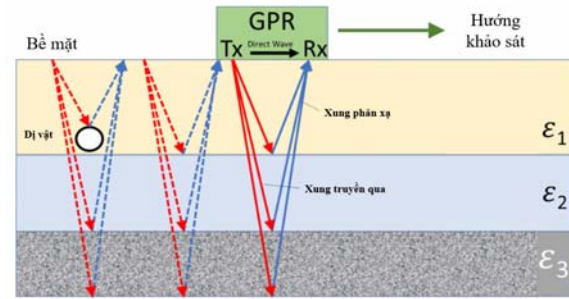
$$d = \frac{c \times t}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3)$$

Trong đó: d là độ sâu công trình ngầm.

Hằng số điện thẩm ε_r nằm trong khoảng 1 - 40 tùy loại đất và 80 đối với nước mặn và nước ngọt. Ngoài ra, cường độ phản xạ lại ranh giới môi trường phụ thuộc vào sự khác biệt độ điện thẩm, được xác định bởi hệ số phản xạ theo (4):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r_{i+1}}} - \sqrt{\varepsilon_{r_i}}}{\sqrt{\varepsilon_{r_{i+1}}} + \sqrt{\varepsilon_{r_i}}} \quad (4)$$

Với $\varepsilon_{r_{i+1}}$ và ε_{r_i} lần lượt là độ điện thẩm của hai môi trường liền kề. Nếu $\varepsilon_{r_{i+1}} > \varepsilon_{r_i}$, sóng phản xạ sẽ đảo pha, nếu $\varepsilon_{r_{i+1}} < \varepsilon_{r_i}$, sóng phản xạ sẽ cùng pha.



Hình 4: Sự phản xạ sóng điện từ qua môi trường các lớp đất đá khác nhau [19]

2.2.2. Nguyên lý hoạt động của hệ thống

Sóng điện từ phát ra từ một ăng-ten phát dưới dạng xung, lan truyền trong vật chất với vận tốc được quyết định chủ yếu bởi tính chất điện của vật liệu. Khi sóng lan truyền vào vật chất bên dưới mặt đất, nếu nó gặp các bất đồng nhất hoặc các mặt ranh giới giữa các môi trường có tính chất điện khác nhau, một phần năng lượng sóng sẽ phản xạ hoặc tán xạ trở lại mặt đất trong khi phần năng lượng còn lại tiếp tục di chuyển xuống phía dưới. Sóng phản xạ lại được ghi nhận bởi ăng-ten thu và lưu trữ trong bộ nhớ của thiết bị để sử dụng cho việc xử lý và phân tích về sau.

Màn hình hiển thị dữ liệu chỉ hiển thị tín hiệu số thông qua biên độ và được gọi là đường ghi, một đường ghi gồm có năng lượng xung phát, theo sau là năng lượng xung thu ghi nhận từ sự phản xạ của các vật thể hoặc các mặt ranh giới. Khi ăng-ten di chuyển dọc theo tuyến khảo sát, một loạt các đường ghi được tập hợp ở các thời điểm rời rạc và được sắp xếp cạnh nhau để hình thành mặt cắt trên màn hình. Dữ liệu có thể được lọc để loại trừ nhiễu ở thực địa hoặc có thể được lưu trữ dưới dạng thô và xử lý loại trừ nhiễu sau đó. Thời gian lan truyền của sóng điện từ từ lúc phát, lan truyền trong môi trường vật chất và phản xạ trở lại anten thu thay đổi từ vài chục đến vài ngàn nano giây. Do đó, đòi hỏi các thiết bị phải bảo đảm độ chính xác cao, để ghi nhận thời gian lan truyền của sóng trong môi trường từ lúc bắt đầu đến khi phản xạ trở lại.

Kết quả của phương pháp được thể hiện dưới dạng ảnh B-scan cho phép kỹ sư phát hiện đúng vị trí theo chiều sâu và chiều dọc tính từ điểm xuất phát (góc tạo độ lưới quét)

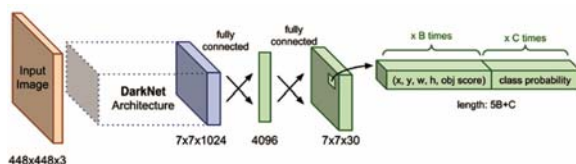


Hình 5: Quy trình vận hành trong thử nghiệm hiện trường GPR

3. XÂY DỰNG BỘ XỬ LÝ HUẤN LUYỆN DỮ LIỆU XÁC ĐỊNH DỊ VẬT, CÔNG TRÌNH NGẦM SỬ DỤNG KẾT QUẢ CỦA RADAR XUYỀN ĐẤT

3.1. Mạng YOLO

YOLO (You Only Look Once) là một thuật toán học sâu chuyên dùng cho nhận dạng và phát hiện đối tượng trong ảnh. Phương pháp này coi bài toán phát hiện đối tượng như một bài toán hồi quy duy nhất, trực tiếp dự đoán vị trí và loại đối tượng chỉ qua một lần tính toán, do đó có ưu điểm tốc độ nhanh và độ chính xác cao [20]. Trong lĩnh vực khảo sát ngầm bằng công nghệ radar xuyên đất, YOLO có thể được huấn luyện trên tập dữ liệu ảnh radar đã gán nhãn để tự động phát hiện và phân loại công trình ngầm, dị vật ngầm (ống, cáp, hầm kỹ thuật...). Việc áp dụng YOLO giúp giảm phụ thuộc vào phân tích thủ công, nâng cao hiệu quả và độ tin cậy trong công tác nhận dạng. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu sử dụng cấu trúc YOLOv8.



Hình 6: Sơ đồ kiến trúc mạng YOLO [21]

YOLOv8 sử dụng mô hình có tính năng xử lý độc lập các tác vụ đối tượng, phân loại và hồi quy. Thiết kế này cho phép mỗi nhánh tập trung vào nhiệm vụ của mình và cải thiện độ chính xác tổng thể của mô hình. Trong lớp đầu ra của YOLOv8 sử dụng hàm sigmoid làm hàm kích hoạt cho điểm đối tượng, biểu thị xác suất hộp giới hạn chứa một đối tượng. Nó sử dụng hàm softmax cho xác suất của lớp, biểu thị xác suất của các đối tượng thuộc từng lớp có thể.

Trong huấn luyện mô hình Deep learning như YOLOv8, việc lựa chọn và điều chỉnh siêu tham số quyết định hiệu suất và độ chính xác của mô hình [22]. Các siêu tham số quan trọng gồm: Batch size (số mẫu xử lý trong một lần lặp, ảnh hưởng đến tốc độ và tài nguyên tính toán), Learning rate (tốc độ cập nhật trọng số, cần cân bằng giữa tốc độ học và độ ổn định) và Epochs (số vòng lặp toàn bộ dữ liệu nhằm cải thiện dần độ chính xác).

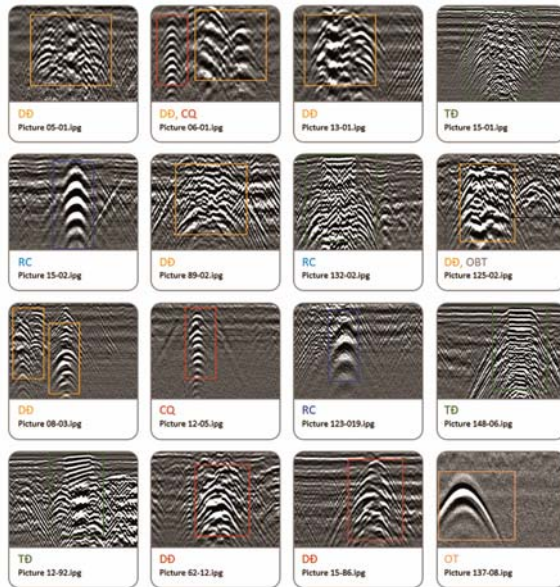
3.2. Tham số huấn luyện mô hình

Trong nghiên cứu này, để kiểm tra khả năng nhận dạng tự động các loại công trình ngầm, dị vật ngầm một cách trực tiếp từ các hình B-scan của mô hình học sâu YOLOv8, các loại công trình ngầm thường gặp nhất khi thực hiện tại hiện trường sẽ được nghiên cứu và gán nhãn vào các hình ảnh. Mười một công trình ngầm, dị vật ngầm được phân loại bao gồm: đường ống tròn bê tông (ký hiệu nhãn: OBT), đường ống thép (ký hiệu nhãn: OT), đường dây điện (ký hiệu nhãn: DD), đường cáp quang (ký hiệu nhãn: CQ), đường ống nhựa (ký hiệu nhãn: ON), đường cống bê tông chữ nhật (ký hiệu nhãn: OCN), tấm đan cống (ký hiệu nhãn: TĐ), rễ cây (ký hiệu nhãn: RC), hố sụt, hang hờ hàm ếch (ký hiệu nhãn: HS), bể nước ngầm (ký hiệu nhãn: NN).

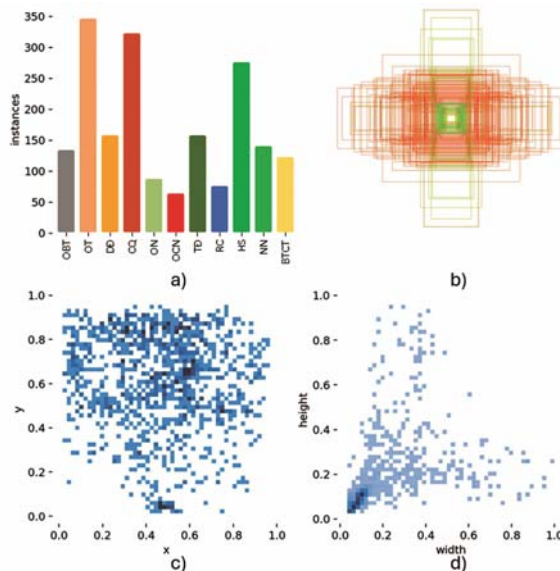
Tổng cộng bao gồm 1.894 hình ảnh thuộc nhiều công trình khác nhau với 2.328 nhãn được gán. Thông tin về nhãn và số lượng các nhãn tương ứng được thể hiện trong Hình 7.

Hình 8 thể hiện các tính chất của bộ dữ liệu. Trong đó, có thể thấy số lượng các dữ liệu của mỗi nhãn không được phân bố đồng đều. Điều này do quá trình khó khăn trong việc thu thập các dữ liệu công trình ngầm, không phải lúc nào cũng có thể thu được hình ảnh của dị vật, công trình ngầm mong muốn. Những dị vật ngầm như đường ống tròn bê tông (OBT), đường ống thép (OT), đường dây điện (DD), đường cáp quang (CQ), đường ống nhựa (ON), tấm đan cống (TĐ), bể nước ngầm

(BN), cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT), hồ sục hang hờ hàm ếch (HS) là những đối tượng có thể dễ dàng nhận thấy, dễ xảy ra và dễ phân loại chiếm số lượng nhiều hơn hẳn. Trong khi, các nhãn công chữ nhật (OCN), rễ cây (RC) ít khi xảy ra hoặc khó nhận thấy có rất ít dữ liệu được phân loại. Các biểu đồ còn lại thể hiện kích thước của khung dán nhãn, vị trí và tỷ lệ các kích thước của những khung dán nhãn trong bộ dữ liệu. Thêm vào đó, Hình 8b thể hiện khung của các nhãn khi được đề tất cả cùng trong một biểu đồ. Hình 8c và d lần lượt là tỷ lệ của vị trí và kích thước của các khung dán nhãn trong hình ảnh của vật thể cần xác định.



Hình 7: Các hình ảnh thuộc bộ dữ liệu nghiên cứu



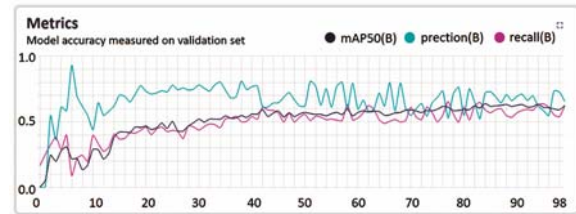
Hình 8: Tính chất bộ dữ liệu nghiên cứu

Bảng 1: Thông tin bộ dữ liệu

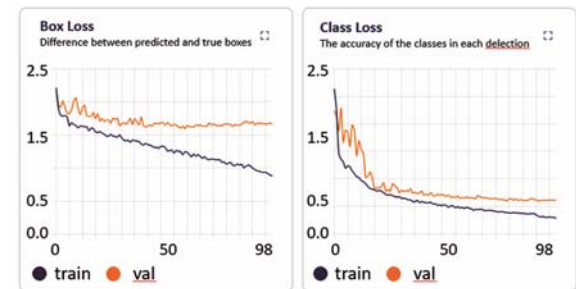
	OBT	OT	DB	CQ	ON	OCN
Số lượng nhãn	141	346	152	325	76	62
	TD	RC	HS	NN	BTCT	
Số lượng nhãn	153	73	283	145	138	

3.3. Kết quả huấn luyện mô hình

Hình 9 và Hình 10 là biểu đồ thể hiện độ chính xác và hàm mất mát của mô hình trong vòng 100 epochs huấn luyện. Có thể thấy, với biểu đồ độ chính xác, đồ thị có xu hướng tăng dần sau mỗi lần huấn luyện và dần hội tụ ở những lần lặp cuối trước khi kết thúc quá trình huấn luyện. Đối với các biểu đồ hàm mất mát, các đường này có xu hướng giảm về 0 trong suốt quá trình huấn luyện. Điều này cho thấy, mô hình có xu hướng giảm thiểu các sai số dần theo số lượng vòng lặp. Các giá trị hàm mất mát của tập dữ liệu thử nghiệm (Val) cũng lớn hơn của tập huấn luyện (Train), có thể giải thích do tập dữ liệu huấn luyện là tập mà mô hình trực tiếp huấn luyện và cập nhật theo mô hình, vậy nên độ chính xác cũng như sai số trên tập này thường sẽ tốt hơn đối với tập thử nghiệm.



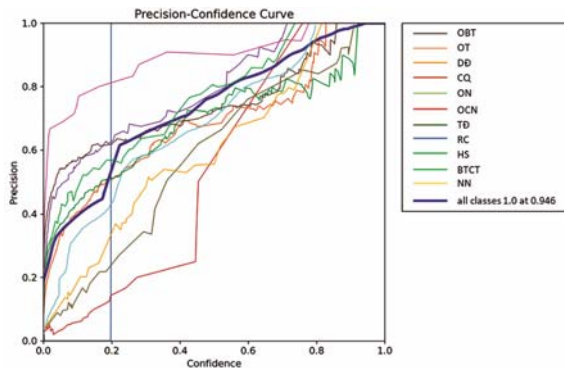
Hình 9: Biểu đồ độ chính xác của mô hình sau mỗi epochs



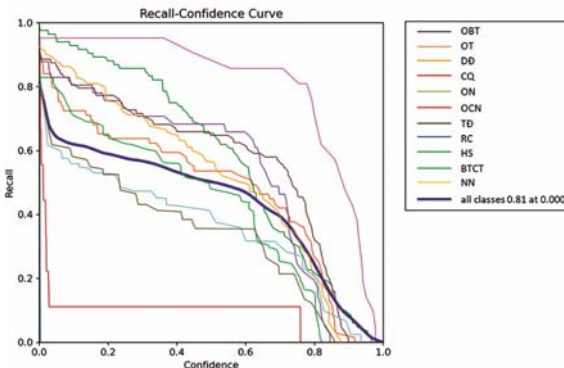
Hình 10: Biểu đồ hàm mất mát mô hình sau mỗi epochs

Hình 11 và Hình 12 là các biểu đồ thể hiện đường cong Precision - Confidence và Recall - Confidence của mô hình đã huấn luyện. Do hai giá trị Precision và Recall có tương quan tỷ lệ nghịch với nhau khi thay đổi ngưỡng quyết định giá trị

phân loại, nên biểu đồ trong hai trường hợp có dạng đối nghịch nhau. Trường hợp mô hình đạt kết quả mong muốn, các kết quả đều tiệm cận tới giá trị 1.0, có nghĩa phần dưới của biểu đồ chiếm mức độ lớn nhất có thể. Có thể thấy, đường cong của nhãn cáp quang (CQ) trong cả hai biểu đồ đều nằm trên cùng và nhãn ống chữ nhật (OCN) nằm dưới cùng. Hai đường này tách biệt với các nhãn còn lại cho thấy độ chính xác của mô hình khi phát hiện nhãn CQ đạt kết quả tốt nhất, điều ngược lại xảy đến với nhãn OCN, vấn đề này cũng rõ ràng giải thích do số lượng nhãn OCN được sử dụng để huấn luyện là thấp nhất.



Hình 11: Biểu đồ đường cong Precision của mô hình



Hình 12: Biểu đồ đường cong Recall của mô hình

Bảng 2 thể hiện kết quả phát hiện cụ thể của mô hình, dựa trên hai thông số là precision và recall. Trong đó, precision thể hiện cho khả năng các nhãn mô hình phát hiện chính xác và recall thể hiện cho khả năng mô hình phát hiện đủ các nhãn cần có. Giá trị precision có kết quả tốt hơn recall cho thấy mô hình những kết quả mô hình phát hiện dị vật có thể tin tưởng được. Tuy nhiên, với các giá trị recall, một vài nhãn cho thấy kết quả rất thấp, thể hiện việc mô hình chưa thể phát hiện được hoàn toàn các dị vật, công trình ngầm. Nguyên nhân có thể do sai sót trong quá trình gán nhãn,

do các nhãn không có đủ lượng dữ liệu cần có hoặc do mô hình chưa đủ mạnh để phân biệt được các công trình ngầm.

Bảng 2: Kết quả phát hiện của mô hình

Loại hình dị vật	Precision	Recall
Ống thoát nước (OBT)	0.714	0.333
Ống thép (OT)	0.913	0.739
Dây điện (DD)	0.753	0.756
Cáp quang (CQ)	0.824	0.750
Ống nhựa (ON)	0.685	0.905
Ống chữ nhật (OCN)	0.548	0.511
Tấm đan (TD)	0.769	0.724
Rễ cây (RC)	0.582	0.522
Hố sụt (HS)	0.867	0.827
Bê tông cốt thép (BTCT)	0.721	0.435
Bể nước ngầm (NN)	0.713	0.518

Kết quả của quá trình huấn luyện xác định các dị vật ngầm bằng công nghệ Radar xuyên đất dưới dạng ảnh B-Scan là hoàn toàn có thể thực hiện được. Dựa vào mô hình YOLOv8 ứng với kết quả huấn luyện dưới dạng Precision đã cho thấy việc sử dụng mạng YOLO đáp ứng các yêu cầu đặt ra về việc tự động xác định công trình ngầm, dị vật ngầm một cách chính xác nhất. Thông qua quá trình huấn luyện bằng thuật toán, các dị vật ngầm (bao gồm 11 dị vật ngầm chủ yếu được đề cập trong quá trình nghiên cứu) có thể xác định được một cách dễ dàng, giúp kỹ thuật viên, kể cả những kỹ thuật viên có trình độ tay nghề chưa cao cũng có thể thực hiện được. Từ kết quả của thuật toán cho cho bước đầu việc thành lập hồ sơ, bản đồ dị vật ngầm. Tuy mức độ chính xác chưa cao đạt kết quả 100% do số lượng mẫu của nhiều dị vật ngầm đưa vào đầu vào của quá trình huấn luyện còn ít so với số lượng mẫu cần thiết, điển hình như ống cống dạng chữ nhật (OCN), rễ cây (RC) hay ống nhựa (ON). Chính vì vậy, việc thu thập kết quả từ hiện trường để đưa vào huấn luyện nhận dạng dị vật, công trình ngầm là điều vô cùng quan trọng.

4. THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH HUẤN LUYỆN

4.1. Thu thập số liệu hiện trường

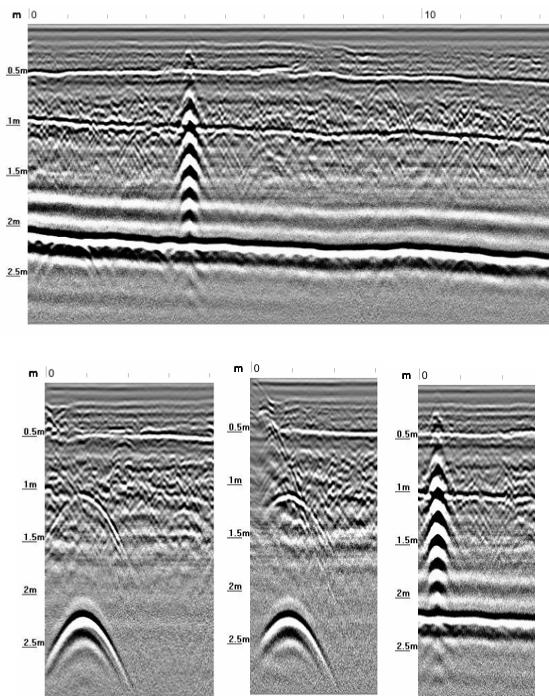
Sử dụng thiết bị Radar xuyên đất IDS F200-600 MHz khảo sát hiện trường. Với mục đích dò tìm các dị vật ngầm nhằm hỗ trợ cho công tác khoan khảo sát địa chất, định vị tim cọc, trụ của cầu vượt qua hệ kênh mương phục vụ công tác khoan khảo

sát tuyến đường vành đai 4 đi qua địa phận Hoài Đức, thành phố Hà Nội. Đơn vị khảo sát cần tiến hành dò tìm dị vật ngầm phía dưới mặt đường nhằm tránh khoan vào các công trình đường ống cấp thoát nước, đường điện hay cáp quang nhằm đảm bảo tính an toàn cũng như vận hành của tuyến ống phía dưới.



Hình 13: Công tác khảo sát hiện trường

Trước tiên, thu thập tài liệu về hệ thống công trình ngầm của khu vực (nếu có), khảo sát sơ bộ địa hình, địa vật xung quanh khu vực dò tìm để có cơ sở phán đoán cho việc phân tích giải đoán hình ảnh các tín hiệu GPR thu được phù hợp với thực tế.



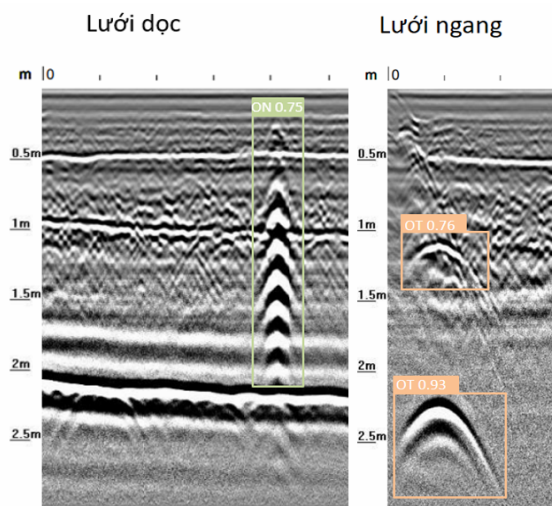
Hình 14: Kết quả dạng ảnh B-Scan cho lát quét dọc L1 và lát quét ngang T2, T3, T4

Đối với công tác hiện trường sử dụng mềm K2 FastWave để thu thập dữ liệu. Tiến hành lập ô lưới 1×1 m hoặc lớn hơn trên diện tích khảo sát và tiến hành quét theo phương trục hoành (T - Traversal) và theo chiều dọc (L - Longitudinal) của từng ô lưới. Trước tiên chúng tôi tiến hành quét theo phương L các đường quét lần lượt là (T1, T2, T3... T_n) đến hết chiều dài T. Tiếp tục chuyển sang quét theo phương ngang T các đường quét được đánh số tiếp theo đường T (L_{n+1}, L_{n+2}, L_{n+3}...) khi hết chiều dài L thì kết thúc điểm khảo sát. Trình tự các bước thực hiện khảo sát hiện trường được nêu ở sơ đồ Hình 5. Kết quả quá trình thu thập dữ liệu được lưu dưới dạng file ảnh B-Scan.

4.2. Xử lý dữ liệu qua mạng huấn luyện

Mục tiêu của giai đoạn này là đánh giá mức độ chính xác và khả năng ứng dụng của mô hình trong điều kiện khảo sát ngoài hiện trường, nơi dữ liệu thu được thường chịu tác động của nhiều yếu tố phức tạp như nhiễu địa chất, hạ tầng kỹ thuật dày đặc và biến thiên môi trường. Việc kiểm chứng thực tế không chỉ giúp xác định hiệu quả nhận dạng công trình ngầm của mạng đã huấn luyện, mà còn cung cấp cơ sở quan trọng để điều chỉnh, tối ưu mô hình và đảm bảo độ tin cậy trước khi áp dụng rộng rãi vào công tác khảo sát phục vụ xây dựng tuyến đường Vành đai 4.

Kết quả xác định công trình ngầm, dị vật ngầm trên cơ sở mạng huấn luyện nhận dạng được 2 đối tượng bao gồm ống thép và ống nhựa được thể hiện như Hình 15.

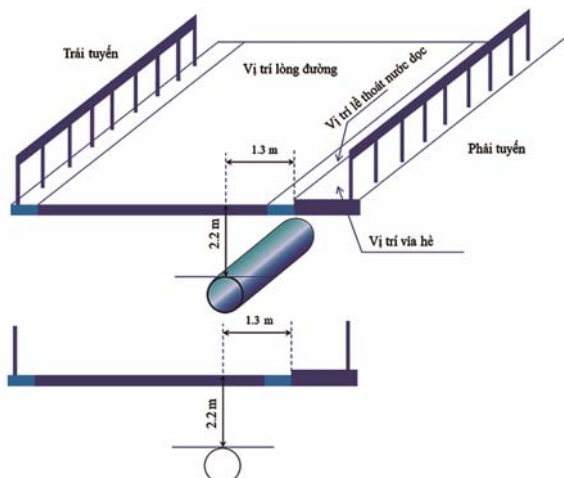


Hình 15: Kết quả tự động nhận dạng công trình ngầm

Kết quả Hình 15 cho thấy, mô hình nhận dạng 2 đối tượng. Với hệ thống ống thép, kết quả mô hình nhận dạng với 2 vị trí tại cao độ -1.05 m và -2.2 m so với mặt nền đường, cách gốc tọa độ một khoảng 1m (cách bó vỉa 1.3 m). Với hệ thống ống nhựa, kết quả mô hình nhận dạng tại vị trí có chiều sâu -0.6 m so với mặt đường và cách gốc tọa độ 4 m.

Trong các hình minh họa kết quả, mỗi khung nhận dạng do mô hình YOLOv8 dự đoán đều kèm theo một giá trị số nằm trong khoảng từ 0 đến 1, gọi là điểm tin cậy (confidence score). Giá trị này biểu thị mức độ chắc chắn của mô hình khi xác định đối tượng thuộc về một nhãn cụ thể. Đối với đối tượng tại vị trí 2.2 m, điểm tin cậy 0.93 nghĩa là mô hình có 93% khả năng tin tưởng rằng đối tượng trong khung chính là loại công trình ngầm hoặc đối tượng được gán nhãn (ống thép). Trong thực tế, người sử dụng thường đặt một ngưỡng tin cậy (ví dụ 0.5 hoặc 0.6), các dự đoán có điểm tin cậy thấp hơn ngưỡng này sẽ bị loại bỏ nhằm giảm thiểu sai sót và nâng cao độ chính xác của hệ thống.

So sánh với kết quả phân tích thủ công đối với dữ liệu ảnh bên trên, kết quả nhận dạng qua mô hình có độ chính xác, nhận dạng đúng đối tượng ngầm, công trình ngầm là ống nhựa cắt ngang đường ở độ sâu -0.6 m và ống thép ở độ sâu 2.2 m. Do khi sóng điện từ tại ăng-ten phát gặp biên kim loại dẫn điện mạnh, gần như toàn bộ năng lượng bị phản xạ trở lại. Điều này làm cho hyperbola từ ống thép rất sáng, rõ nét, đối xứng, khác biệt so với vật liệu phi kim (ống nhựa, bê tông), vốn thường mờ hơn và có mô hình phản xạ kém rõ ràng. Chính sự phản xạ mạnh dẫn đến xuất hiện hyperbola mờ ở độ sâu 1.05 m.



Hình 16: Sơ đồ vị trí công trình ngầm

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày rõ cấu tạo, nguyên lý hoạt động của hệ thống radar xuyên đất IDS F200-600 MHz và ứng dụng trong khảo sát công trình ngầm. Việc kết hợp công nghệ radar xuyên đất với phương pháp học sâu, cụ thể là mô hình YOLOv8, đã chứng minh tính khả thi hiệu quả vượt trội trong việc tự động phát hiện, phân loại và xác định vị trí công trình ngầm từ dữ liệu radar.

Kết quả thực nghiệm trên tuyến đường Vành đai 4, đoạn qua địa phận Hoài Đức, cho thấy giải pháp tích hợp này không chỉ nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong nhận dạng công trình ngầm mà còn giảm thiểu đáng kể sự phụ thuộc vào phân tích thủ công vốn tốn nhiều thời gian và dễ sai lệch. Bên cạnh đó, phương pháp này mở ra khả năng xử lý dữ liệu quy mô lớn, góp phần tăng tốc độ và hiệu quả trong công tác quy hoạch, thiết kế và quản lý hạ tầng ngầm đô thị. Tuy nhiên, để mức độ chính xác đạt đến tối đa cần thêm số lượng lớn dữ liệu đầu vào và nhiều hạng mục công trình ngầm, đối tượng ngầm cần được dán nhãn đầy đủ.

Những kết quả đạt được khẳng định tiềm năng ứng dụng rộng rãi của công nghệ radar xuyên đất kết hợp học sâu trong lĩnh vực khảo sát địa kỹ thuật và quản lý công trình ngầm, đồng thời đặt nền tảng cho việc tiếp tục nghiên cứu, tối ưu hóa và triển khai ở các dự án hạ tầng quan trọng khác trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Benedetto, L. Pajewski. *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar*. Springer, 2015.
- [2] H. M. Jol. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, 2009.
- [3] Daniels, D. J. *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed. IET, 2004.
- [4] N. T Ván, V. M Triết, Đ. H Trung, L.V.A Cường. *Xác định vận tốc truyền sóng điện từ trong Radar xuyên đất bằng phép hiệu chỉnh động*. Tạp chí các Khoa học về Trái đất, 35(2), 137-145.
- [5] Nguyễn Văn Giảng. *Khả năng áp dụng radar xuyên đất trong địa kỹ thuật và môi trường ở Việt Nam*. Tạp chí Địa chất, số 257 (3-4/2000), tr.23-32.
- [6] Jol H. M, 2009: *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Oxford, UK, p.365.

- [7] N.T. Van, L.V.A. Cuong, D.H. Trung, V.M. Triet, H.K. Tuan. *Kirchhoff migration for specifying velocity model in ground penetrating radar method. Proceedings of International conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Shanghai, China @ ISBN 978-1-4673-2663-6, pp.419-424.
- [8] IDS GeoRadar (2020). *IDS Opera Duo and Stream X product manual*. IDS GeoRadar Srl.
- [9] N.P Son, L.V Nam, N. T Thủy, *Độ chính xác định vị đối tượng địa lý trong lòng đất bằng công nghệ Georadar*, Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ số 59-3/2024: 27-35.
- [10] Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2020). *Deep learning Nature*, vol. 521, pp. 436-444, 2015.
- [11] Zhao, Z., et al. *Deep learning in the processing of ground penetrating radar data: A review*. Remote Sensing, vol. 12, no. 22, pp. 1-24.
- [12] <https://bketechn.vn/san-pham/thiet-bi-radar-xuyen-dat-gpr-georadar/>
- [13] IDS GeoRadar (2020). *RIS MF Hi-Mod Ground Penetrating Radar System*. Technical Datasheet.
- [14] Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar* (2nd ed.). The Institution of Engineering and Technology, London.
- [15] Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, Amsterdam.
- [16] Daochuan Zhou and Haitang Zhu (2021). *Application of Ground Penetrating Radar in Detecting Deeply Embedded Reinforcing Bars in Pile Foundation*. Advances in Civil Engineering.
- [17] D. J. Daniels (2004). *Ground Penetrating Radar*. IET, London.
- [18] H. M. Jol (Ed.) (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier.
- [19] https://www.epa.gov/environmental-geophysics/ground-penetrating-radar-gpr?utm_source
- [20] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 779-788.
- [21] Riadh Ayachi, Mouna Afif, Yahia Said, Abdessalem Ben Abdelali (2022). *An edge implementation of a traffic sign detection system for Advanced driver Assistance Systems*. International Journal of Intelligent Robotics and Applications 6:207-215.
- [22] 2 Yu, T. and H. Zhu, (2020). Hyper-parameter optimization: A review of algorithms and applications. arXiv preprint arXiv:2003.05689.