



A CONCRETE SURFACE MEASUREMENT SYSTEM USING SRF05 ULTRASONIC SENSOR AND TOF METHOD

Ho Thanh Trung*, Dao Thanh Toan

Department of Electronic Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 28/06/2025

Revised: 11/07/2025

Accepted: 10/08/2025

Published online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.3>

* Corresponding author

Email: trunght@utc.edu.vn

Abstract. Ultrasonic non-destructive testing (NDT) is a method for detecting defects without causing damage to the object being inspected. Most current systems in use are imported, typically requiring high initial investment and operators with advanced knowledge in structural health diagnostics and signal processing. In this paper, the author presents a preliminary study on the development of a low-cost NDT system for measuring concrete surface structures. The system is based on a Time-of-Flight (ToF) calculation method implemented using an ATmega128 signal processing chip on an Arduino board, utilizing data from a commonly available commercial ultrasonic sensor, the SRF05. The system was first tested to determine the optimal measurement distance between the concrete surface and the sensor. With the optimal distance set at approximately 50 mm, measurements were carried out across the entire surface of the sample in laboratory. The collected data were analyzed using computer software, allowing for a relatively accurate 2D mapping of the surface, distinguishing between flat and uneven concrete areas. These initial research results contribute to the development of low-cost NDT devices for applications in transportation infrastructure construction, and also pave the way for localizing the technology and reducing reliance on imported equipment.

Keywords: Non-destructive testing of concrete, ultrasonic sensor, ATmega128, SRF05, ToF

@ 2025 University of Transport and Communications



PHÁT TRIỂN THỬ NGHIỆM HỆ ĐO BỀ MẶT BÊ TÔNG VỚI CẢM BIẾN SIÊU ÂM SRF05 VÀ PHƯƠNG PHÁP TOF

Hồ Thành Trung*, Đào Thanh Toán

Bộ môn Kỹ thuật Điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 28/06/2025

Ngày nhận bài sửa: 11/07/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/08/2025

Ngày xuất bản Online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.3>

* Tác giả liên hệ

Email: trunght@utc.edu.vn

Tóm tắt. Kiểm tra không phá hủy bằng siêu âm (NDT) là phương pháp phát hiện khuyết tật mà không gây hại cho đối tượng được kiểm tra. Các hệ thống đo đang sử dụng hiện nay đa số là nhập ngoại, thường có chi phí đầu tư ban đầu cao và đòi hỏi người vận hành có kiến thức chuyên sâu về chẩn đoán sức khỏe công trình và xử lý tín hiệu. Trong bài báo này, tác giả trình bày nghiên cứu phát triển thử nghiệm hệ NDT đo bề mặt kết cấu bê tông giá thành rẻ. Hệ thống dựa trên phương pháp tính toán ToF cho chip xử lý tín hiệu ATmega128 trên bo Arduino với dữ liệu từ cảm biến siêu âm thương mại phổ thông SRF05. Hệ thống trước hết được thử nghiệm để tìm ra khoảng cách đo tối ưu giữa bề mặt bê tông và cảm biến. Với khoảng cách tối ưu được sử dụng khoảng 50 mm, các phép đo được thực hiện trên toàn bộ bề mặt mẫu trong phòng thí nghiệm. Dữ liệu đo được phân tích bằng chương trình máy tính và có thể ánh xạ 2D bề mặt gồm các khu vực phẳng, gồ ghề của bê tông tương đối chính xác. Kết quả nghiên cứu ban đầu này góp phần phát triển các thiết bị NDT ứng dụng trong xây dựng công trình giao thông với giá thành thấp, đồng thời mở ra hướng tiếp cận nội địa hóa công nghệ, giảm phụ thuộc vào các thiết bị nhập khẩu.

Từ khóa: kiểm tra không phá hủy bê tông, cảm biến siêu âm, ATmega128, SRF05, ToF

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chất lượng và độ bền của các kết cấu bê tông đóng vai trò sống còn trong việc đảm bảo an toàn và hiệu quả hoạt động của hệ thống hạ tầng giao thông [1-16]. Các yếu tố như tải trọng lặp đi lặp lại, tác động của môi trường khắc nghiệt (nhiệt độ, độ ẩm, hóa chất) và quá trình lão hóa

tự nhiên có thể dẫn đến sự hình thành và phát triển của các khuyết tật bên trong bê tông như nứt gãy, bên ngoài như bong tróc, lõi lõm,... Việc phát hiện sớm và đánh giá chính xác các khuyết tật này là rất quan trọng để có các biện pháp bảo trì và sửa chữa kịp thời, từ đó kéo dài tuổi thọ công trình và giảm thiểu chi phí duy trì. Các phương pháp chẩn đoán truyền thống, như kiểm tra trực quan, gõ búa, hoặc khoan lấy mẫu, thường mang tính chủ quan, tốn nhiều thời gian và công sức cũng như không cung cấp thông tin đầy đủ về tình trạng bên trong kết cấu. Kiểm tra không phá hủy (Nondestructive investigation) là phương pháp phát hiện khuyết tật/tổn hại mà không gây hại cho đối tượng được kiểm tra. Phương pháp này có ứng dụng đa dạng trong đời sống như trong y tế, quân sự và đặc biệt là trong lĩnh vực giao thông vận tải [1-5].

Đến nay, có một số hướng tiếp cận trên thế giới để phát triển hệ đo không phá hủy trong lĩnh vực xây dựng công trình giao thông [6-13], cụ thể:

- Phương pháp sử dụng chụp ảnh cận cảnh là một phương pháp thông dụng và dễ sử dụng [6]. Chụp ảnh cận cảnh dựa trên những phát triển của máy ảnh kỹ thuật số độ phân giải cao và phần mềm chụp ảnh đa năng. Việc sử dụng kỹ thuật chụp ảnh cận cảnh đã được ứng dụng trong lĩnh vực kỹ thuật kết cấu cho phép đo đạc những biến dạng hay hình học của cầu. Tuy nhiên, việc triển khai chụp ảnh cận cảnh đòi hỏi máy ảnh kỹ thuật số và các phụ kiện liên quan, cần quan tâm tới bố trí phân bố điểm mục tiêu trên cấu trúc tham chiếu và phương pháp này thường chỉ được dùng để kiểm tra trên bề mặt.
- Phương pháp dòng điện xoáy: Đầu dò được tích hợp giữa một cuộn dây phát từ trường với một cuộn dây cảm ứng hoặc cảm biến từ trường [7]. Trở kháng của cuộn dây sẽ thay đổi khi có sự xuất hiện của vết ăn mòn. Phương pháp dòng điện xoáy là phương pháp tiên tiến sử dụng trong kiểm tra và đánh giá tình trạng khuyết tật. Tuy nhiên phương pháp này chỉ phù hợp kiểm tra một số vật liệu có từ tính như vật liệu dẫn điện – nhôm trong buồng đốt phi cơ và thân vỏ máy bay.
- Phương pháp chụp ảnh hồng ngoại: Sự phá hủy dưới bề mặt bê tông dẫn tới phá vỡ sự truyền nhiệt và được thu lại bởi camera hồng ngoại [8]. Sử dụng xử lý ảnh nhiệt, hình ảnh bê tông sẽ được tái tạo, căn cứ vào phân tích ảnh để tìm ra vết nứt, khuyết tật hay sự phá hủy. Đây là phương pháp kiểm tra không phá hủy nhanh chóng, đáng tin cậy, tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là cần có nguồn nhiệt trong quá trình đo, cho nên không thuận tiện lắm khi thực hiện đo đạc tại công trường.
- Phương pháp chụp cắt lớp siêu âm: đây là phương pháp cho kết quả chính xác [9], nhưng phạm vi đo lại khá hẹp và nhược điểm lớn nhất đó là cần có các chuyên gia đào tạo lâu năm mới có thể vận hành và phân tích dữ liệu đo. Bên cạnh đó, các sản phẩm sản xuất cho mục đích kiểm tra chung, không hướng tới trọng tâm là các kết cấu công trình giao thông.
- Phương pháp sử dụng sóng siêu âm trong kiểm tra không phá hủy nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Sử dụng bước sóng điện từ dân dụng (không phải đăng ký) chiếu vào không gian cần kiểm tra, sự phản xạ của sóng điện từ sẽ khác nhau ứng với môi trường vật chất khác nhau. Qua phân tích tương quan của tín hiệu thu về kết hợp với xử lý tín hiệu sẽ giúp kiểm tra, đánh giá các khía cạnh khác nhau bên trong hay bề mặt kết cấu bê tông [10-13].

Mặt khác, những năm gần đây, trong lĩnh vực nghiên cứu về kiểm tra không phá hủy bắt đầu nhận được sự quan tâm đầu tư nghiên cứu của nhà khoa học và các chuyên gia tại Việt Nam. Nhóm của TS. Phan Hải Đăng-Trường Đại học Duy Tân đã tập trung vào phát triển mô hình mô phỏng sóng truyền có dẫn hướng trong cấu trúc lớp (guided wave propagation). Họ đã

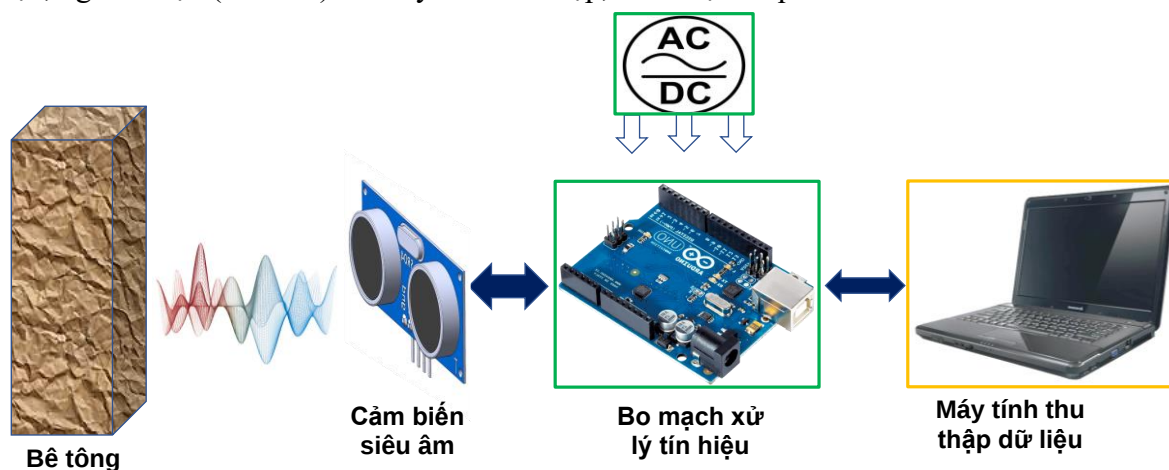
thu được những kết quả rất khả quan khi sử dụng sóng Rayleigh và sóng Love trong việc đánh giá cấu trúc phân lớp [16]. Nhóm nghiên cứu của TS. Lê Minh Huy- Trường Đại học Phenikaa tập trung vào việc nghiên cứu phương pháp kiểm tra không phá hủy khuyết tật trong kết cấu nhiều lớp [15]. Các nhóm nghiên cứu này chủ yếu là tập trung vào nghiên cứu lý thuyết hay sử dụng một số thiết bị đã thương mại hóa của các hãng như ScreeningEagle (Thụy sĩ), hay hãng IDS GeoRadar (Ý),... Tuy nhiên, các hệ thống thương mại thường có chi phí đầu tư ban đầu cao và đòi hỏi người vận hành có kiến thức chuyên sâu về xử lý tín hiệu và chẩn đoán sức khỏe công trình. Điều này tạo ra một rào cản đối với việc ứng dụng rộng rãi trong công tác kiểm định và bảo trì thường xuyên. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các hệ thống NDT có chi phí thấp hơn, dễ sử dụng hơn, nhưng vẫn đảm bảo được hiệu quả chẩn đoán là một hướng đi có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao.

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về quá trình phát triển thiết bị chẩn đoán sơ bộ kết cấu bê tông không tiếp xúc NDT, dựa trên sự kết hợp của cảm biến siêu âm thương mại phổ thông SRF05 và phương pháp tính toán ToF cho chip xử lý tín hiệu ATmega128 trên bo Arduino. Dữ liệu thử nghiệm trong phòng thí nghiệm cho thấy nghiên cứu có khả năng góp phần vào giải mã, phát triển thiết bị đo siêu âm bê tông giá thành rẻ bằng nguồn lực trong nước.

2. THIẾT KẾ VÀ CHƯƠNG TRÌNH CHO THIẾT BỊ

2.1 Hệ thống thiết bị phân cứng

Sơ đồ hệ thống đo không phá hủy bề mặt bê tông NDT sử dụng cảm biến siêu âm SRF05 thể hiện ở hình 1. Hệ thống gồm bốn thành phần chính: cảm biến siêu âm, bo mạch xử lý tín hiệu, nguồn điện (AC/DC) và máy tính thu thập dữ liệu.



Hình 1. Sơ đồ hệ thống đo không phá hủy bề mặt bê tông sử dụng cảm biến siêu âm SRF05.

- **Cảm biến siêu âm:** Các tham số cơ bản của cảm biến siêu âm SRF05 thể hiện ở bảng 1. Tần số phát sóng 40 kHz, đây là tần số được phép sử dụng trong các ứng dụng dân dụng, không phải xin cấp phép. Khi được kích thích bằng tín hiệu điện phù hợp, cảm biến sẽ phát ra sóng siêu âm truyền đến khối bê tông rồi quay lại cảm biến, được thu nhận thành tín hiệu điện;
- **Bo mạch xử lý tín hiệu:** Bo mạch xử lý sử dụng vi điều khiển ATmega128 trên Arduino để tạo xung kích thích cảm biến siêu âm, thu nhận sóng phản hồi, khuếch đại, lọc nhiễu, số hóa tín hiệu analog thành dạng số.

- **Nguồn điện AC/DC:** Hệ thống sử dụng nguồn điện xoay chiều được chuyển đổi thành điện áp một chiều phù hợp để cung cấp nguồn 5VDC cho toàn bộ mạch điện;
- **Máy tính thu thập dữ liệu:** Dữ liệu được truyền từ bo mạch xử lý lên máy tính thông qua kết nối có dây USB. Kết quả đo được có thể hiển thị trên máy tính hoặc lưu vào file excel để phân tích tiếp.

Bảng 1. Các tham số của cảm biến SRF05.

Thông số kỹ thuật	Tham số
Điện áp hoạt động	5VDC
Dòng tiêu thụ	10-40mA
Chân tín hiệu	Echo, Trigger
Tần số phát sóng	40 kHz
Góc quét	< 15°

2.2 Phát triển công thức tính và chương trình cho phần cứng

Trong phương pháp siêu âm, nếu kết cấu có khuyết tật như lõm, lỗm, rỗng, nứt, phân lớp, sóng bị phản xạ, khúc xạ hoặc hấp thụ, làm thay đổi thời gian truyền ToF, biên độ tín hiệu, hình dạng xung. Trong ba phương pháp này, ToF là phương pháp khá thuận tiện để phát triển thiết bị đo trong điều kiện phòng thí nghiệm tại Trường đại học. Bởi vì, tín hiệu siêu âm phát đi đập vào đối tượng cần đo và phản xạ lại đầu thu, cho nên khoảng cách giữa cảm biến và đối tượng đo d tính theo công thức [12]:

$$d = \frac{1}{2} (v \times t) \quad (1)$$

Trong đó: v , t là vận tốc và thời gian truyền sóng, trong đó tốc độ âm trong không khí được tính theo công thức [17]:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2)$$

Trong đó:

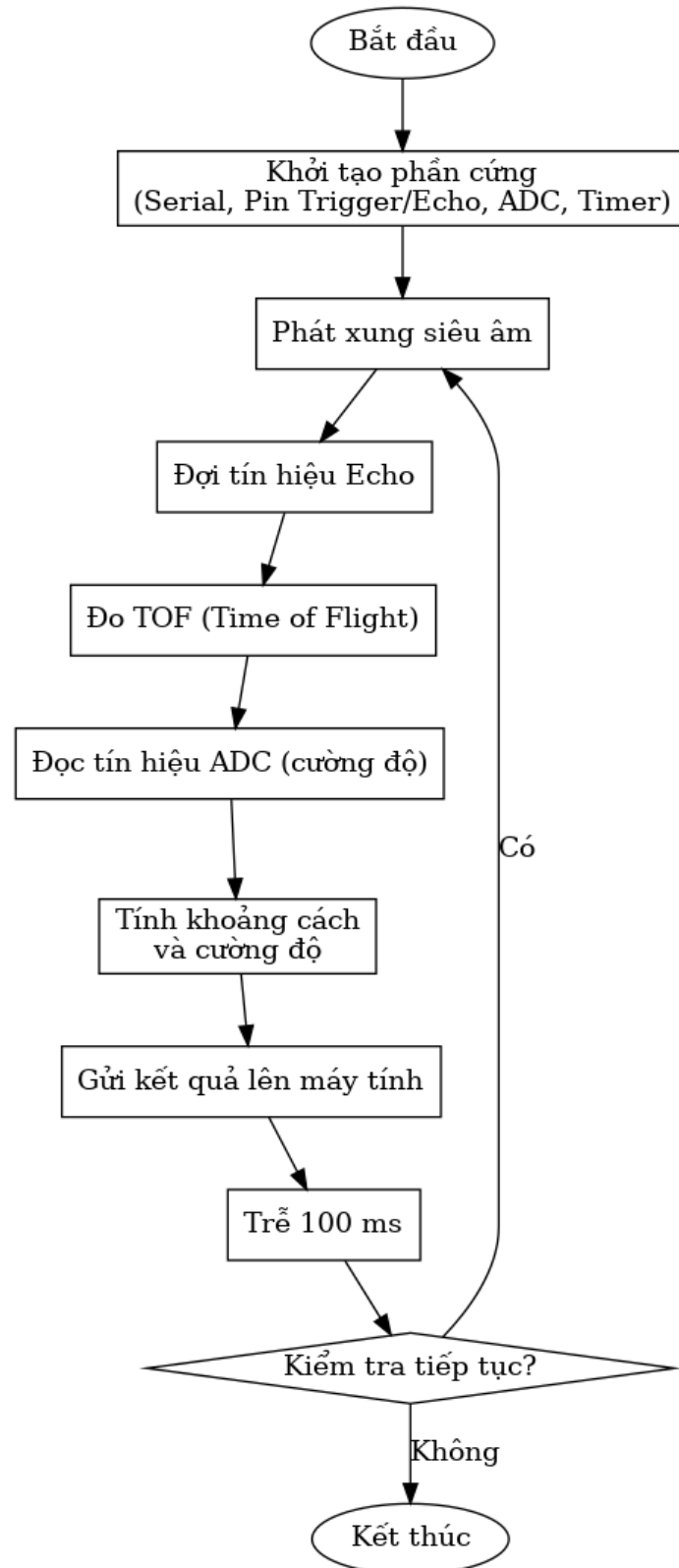
- γ : tỉ số nhiệt dung ($\approx 1,4$ cho không khí)
- R : hằng số khí lý tưởng ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$)
- T : nhiệt độ tuyệt đối (Kelvin)
- M : khối lượng mol khí ($\approx 0,029 \text{ kg/mol}$ cho không khí)

Sau khi thay hằng số và chuyển nhiệt độ từ Kelvin sang độ C, công thức (2) được xấp xỉ thành:

$$v \approx 331,3 + 0,606 \times T \quad (3)$$

Giả thiết, các thí nghiệm được thực hiện tại nhiệt độ phòng 25°C , v là 346450 mm/s . Như vậy công thức (1) được rút gọn thành công thức (4) tính theo mm sau:

$$d = \frac{1}{2} (346450 \times t) \quad (4)$$



Hình 2. Lưu đồ thuật toán cho chip ATmega128 trên bo mạch Arduino.

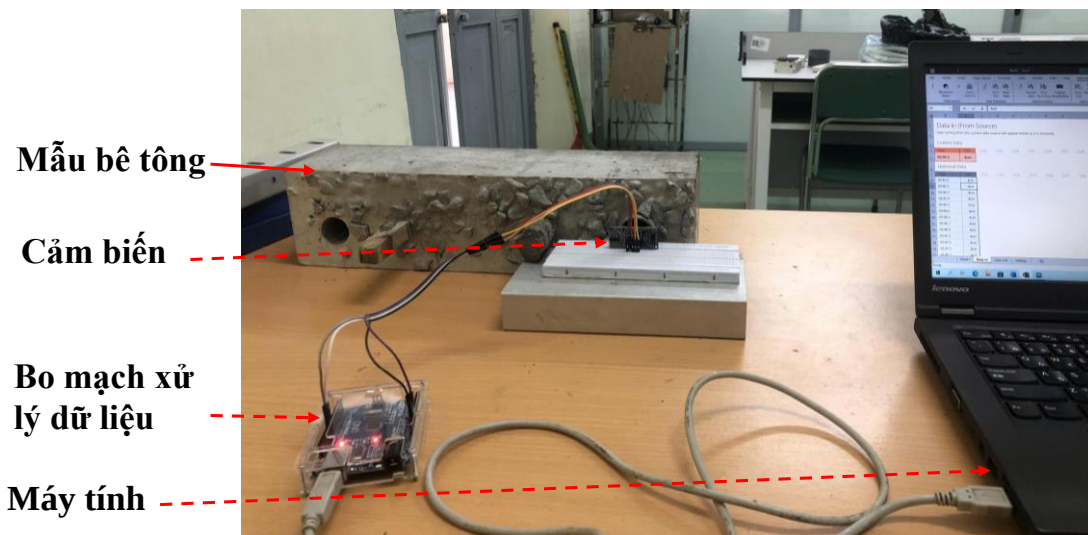
Lưu đồ thuật toán cho chip ATmega128 được vẽ trên hình 2, bao gồm toàn bộ các bước từ khâu khởi tạo phần cứng, phát xung, thu thập dữ liệu cho đến truyền kết quả lên máy tính. Bắt

đầu quy trình, hệ thống thực hiện khởi tạo phần cứng, cấu hình các thành phần cần thiết gồm cổng nối tiếp qua USB, chân Trigger/Echo, bộ ADC (bộ chuyển đổi tương tự-số), cùng biến Timer để đếm thời gian truyền sóng. Sau đó, hệ thống tiến hành phát xung siêu âm bằng cách kích hoạt chân Trigger trên cảm biến, tạo ra xung sóng siêu âm lan truyền trong không khí đến kết cấu cần đo. Khi sóng phản hồi quay trở lại, hệ thống sẽ đợi tín hiệu Echo trên chân Echo để xác định thời điểm sóng quay về. Sau khi nhận được tín hiệu phản hồi, hệ thống thực hiện đo ToF nhằm xác định khoảng thời gian sóng di chuyển từ nguồn phát đến đối tượng cần đo rồi quay lại cảm biến. Tiếp đó, hệ thống đọc tín hiệu ADC để xác định mức độ cường độ của sóng phản hồi, giúp đánh giá tình trạng hoạt động của hệ thống. Hệ thống sẽ tính toán khoảng cách theo công thức (4) nêu trên. Kết quả được gửi lên máy tính để hiển thị, phục vụ công tác giám sát, đánh giá. Sau khi truyền kết quả, hệ thống thực hiện Trễ 100 ms để tránh trùng lặp dữ liệu, giúp duy trì tính ổn định trong chu kỳ đo. Chương trình cho lưu đồ hình 2 được phát triển và nạp vào chip trên nền tảng Arduino IDE với ngôn ngữ C/C++.

3. THỬ NGHIỆM, ĐÁNH GIÁ PHÂN TÍCH

3.1. Thử nghiệm trong phòng thí nghiệm

Hình ảnh thử nghiệm trong phòng thí nghiệm tại nhiệt độ phòng thể hiện ở hình 3. Mẫu bê tông tiêu chuẩn có kích thước $400 \times 100 \times 100$ đã được tạo sẵn với bề mặt lồi lõm, có lỗ rỗng được sử dụng để thử nghiệm hệ thống đo. Mẫu bê tông được cố định chắc chắn trên mặt bàn để giảm thiểu sai số do bị rung với các tác động bên ngoài gây ra. Trên mặt bàn thí nghiệm, cảm biến siêu âm SRF05 được gắn trực tiếp lên để truyền phát sóng siêu âm vào kết cấu. Cảm biến được kết nối bằng dây dẫn tín hiệu sang phần bo mạch xử lý tín hiệu. Nhìn chung hệ thống đơn giản, dễ lắp đặt và triển khai hơn và tháo dỡ so với các hệ thống công nghiệp phức tạp [1-10]. Dữ liệu được đo nhiều lần và toàn bộ bề mặt bê tông cũng được đo để giảm thiểu sai số và phân tích.

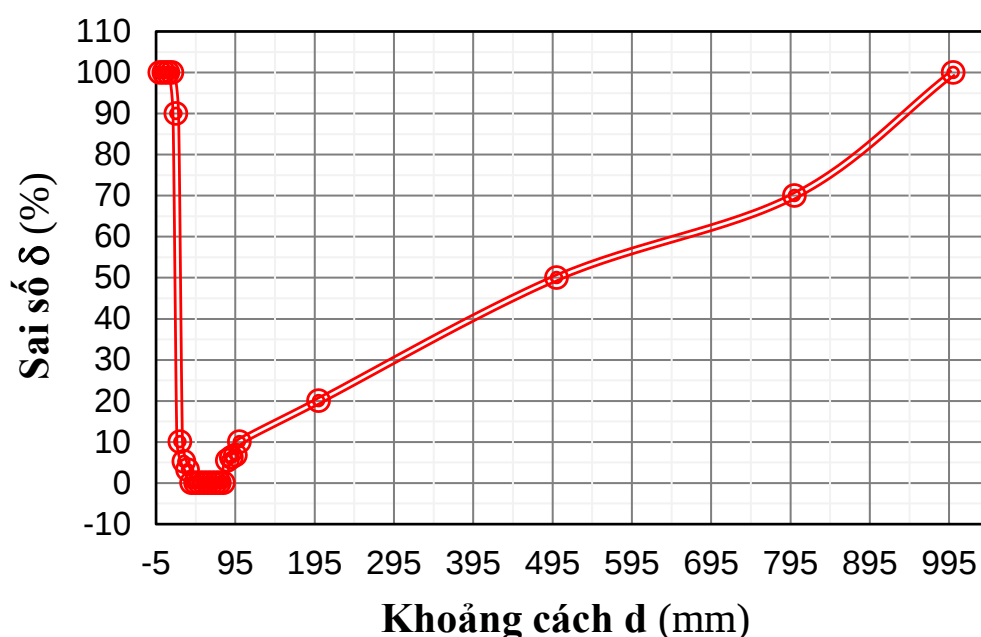


Hình 3. Hình ảnh thử nghiệm hệ thống đo không phá hủy bề mặt bê tông trong điều kiện phòng thí nghiệm.

3.2. Mối quan hệ giữa độ chính xác và khoảng cách giữa cảm biến và bề mặt bê tông.

Đa số các cảm biến siêu âm dân dụng đều có khoảng mù, vì vậy độ chính xác của phép đo theo khoảng cách từ cảm biến đến bề mặt đo cần được kiểm tra cẩn thận trước khi chính thức

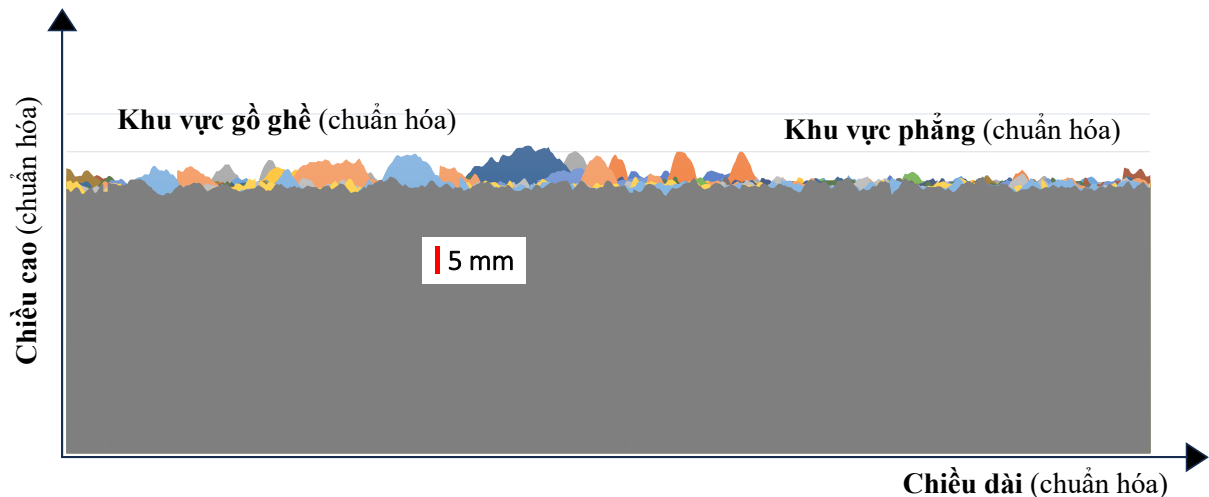
sử dụng trong hệ thống. Hình 4 thể hiện dữ liệu đo về mối quan hệ giữa sai số δ (%) và khoảng cách d (tính bằng mm). Trục hoành được chia theo thang khoảng cách từ 0–1000 mm, còn trục tung biểu diễn phần trăm sai số trong khoảng từ 0% đến 100%. Khi khoảng cách còn rất gần (dưới 20 mm), tức điểm mù, có thể nhận thấy sai số rất cao, lên tới trên 100%. Khi đạt khoảng cách trong đoạn 20–100 mm, sai số được duy trì tương đối thấp, dao động trong khoảng từ 0–30%. Khi khoảng cách d từ 40 mm lên khoảng 80 mm, sai số có xu hướng giảm về gần mức 0%. Khi khoảng cách bắt đầu vượt trên 100 mm, đồ thị cho thấy xu hướng tăng dần của sai số, lên mức 30–50%, và khi khoảng cách gần đạt mức tối đa trong thí nghiệm (1000 mm), sai số tăng mạnh lên mức gần 100%. Hình dạng tổng thể của đường biểu diễn phản ánh rõ đặc tính đo của hệ thống siêu âm trên khoảng cách thay đổi: trong đoạn gần, hệ thống chịu tác động của hiệu ứng vùng mù hoặc phản hồi sóng siêu âm bị ảnh hưởng nghiêm trọng, khiến sai số cao; trong đoạn trung gian, hiệu suất đo ổn định, đạt độ chính xác cao nhất (sai số thấp), phù hợp để sử dụng trong thực tế; còn khi khoảng cách ngày càng lớn, sai số lại có xu hướng gia tăng do sóng siêu âm bị suy hao, nhiễu loạn trong không khí, góc phản hồi thay đổi, hoặc độ nhạy của cảm biến suy giảm. Từ dữ liệu hình 4 suy ra khoảng làm việc tối ưu (từ ~40–80 mm) nơi sai số thấp. Thông số này có ý nghĩa tham khảo hữu ích khi thiết lập phép đo.



Hình 4. Mối quan hệ giữa độ chính xác và khoảng cách giữa cảm biến và bề mặt bê tông.

3.3. Thử nghiệm đo bề mặt bê tông

Hình 5 là hình ảnh ảnh xạ 2 chiều kết quả đo đặc bề mặt bê tông sử dụng phương pháp siêu âm hình 3 với khoảng cách giữa cảm biến và bề mặt thiết lập trong khoảng 50 mm. Các giá trị chiều cao thực tế của mặt bê tông tại mỗi điểm có thể được xác định và ánh xạ theo mặt cắt ngang (hình 5). Vùng màu xám phía dưới biểu thị phần thân khối bê tông, còn đường biên gồ ghề phía trên đại diện cho bề mặt thật của bê tông được xác định qua tín hiệu siêu âm phản xạ. Mỗi dải màu trên mặt bê tông thể hiện các tín hiệu phản hồi khác nhau tương ứng với các điểm đo được tại các vị trí khác nhau theo chiều ngang. Trên hình có thể thấy rõ tính không đồng đều của bề mặt bê tông, với các gồ ghề và vết lõm ngẫu nhiên, thể hiện đặc trưng của bề mặt mẫu bê tông hình 3. Có thể thấy, mặc dù độ chính xác chưa thực sự cao nhưng hình ảnh đo thể hiện được tính trực quan về hình học bề mặt bê tông.



Hình 5. Ảnh xạ dữ liệu đo bề mặt mẫu thử.

So sánh một số tham số của các thiết bị siêu âm bê tông có trên thị trường và thiết bị phát triển trình bày trong bài báo này thể hiện ở Bảng 2. Có thể thấy mặc dù còn một số hạn chế cần tiếp tục nghiên cứu hoàn thiện như tính năng như tăng độ chính xác, khả năng đo bên trong bê tông, tăng tần số làm việc, tăng độ tin cậy... Nhưng có thể thấy hệ đo có chi phí thành phần rất thấp và phần cứng, phần mềm có thể điều chỉnh một cách thuận tiện do tự phát triển.

Bảng 2. So sánh các thiết bị siêu âm bê tông và thiết bị trong bài báo.

Tên thiết bị	Tần số làm việc	Đo bề mặt	Đo bên trong	Giá thành (tham khảo)	Nguồn gốc xuất xứ	Vận hành
Matest C369N	54 kHz	✓	✓	Cao (~500 triệu VNĐ)	Ý	Cần chuyên gia
iWin U910	5 Hz – 500 kHz	✓	✓	Trung bình (~88,4 triệu VNĐ)	Trung Quốc	Cần chuyên gia
PCE PCE-UCD 100	1 kHz – 500 kHz	✓	✓	Cao (~288 triệu VNĐ)	Đức	Cần chuyên gia
Proceq Pundit Lab Plus	24 – 500 kHz	✓	✓	Cao (>300 triệu VNĐ)	Thụy Sĩ	Cần chuyên gia
Hệ thống trong bài báo	40 Hz	✓	NA	Thấp (6 triệu VNĐ)	Trường ĐH GTVT	Chỉ cần xem hướng dẫn sử dụng

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày quá trình thiết kế và phát triển thiết bị kiểm tra không phá hủy NDT bằng siêu âm trên cơ sở cảm biến siêu âm thương mại phổ thông SRF05 làm việc tại tần số 40 kHz và chip xử lý tín hiệu ATmega128 trên bo Arduino. Dựa trên phương pháp ToF, công thức tính khoảng cách từ cảm biến đến đối tượng đo được tìm ra và triển khai lập trình cho chip. Trước khi thử nghiệm thiết bị được căn chỉnh và xác định khoảng cách tối ưu khi thiết lập phép đo. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống có thể xây dựng bản đồ địa hình 2D của bề mặt bê

tông. Mặc dù độ chính xác, độ tin cậy cũng như tính năng cần được tiếp tục nghiên cứu phát triển, hệ đo phát triển trong nghiên cứu này có thể hỗ trợ trong các công việc như kiểm tra chất lượng thi công, giám sát sự lão hóa công trình hoặc hỗ trợ tái thi công và sửa chữa. Từ đó có thể thấy ý nghĩa nghiên cứu là góp phần trong việc giải mã công nghệ để phát triển các thiết bị kiểm tra không phá hủy ứng dụng trong lĩnh vực giao thông vận tải với giá thành thấp, đồng thời mở ra hướng tiếp cận nội địa hóa công nghệ, giảm phụ thuộc vào các thiết bị nhập khẩu.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-DT-006.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J.R.Casas et al., Remote sensing in bridge digitalization: a review, *Remote Sensing*, 16 (2024) 4438. <https://doi.org/10.3390/rs16234438>
- [2]. Vu Thuy Phuong, Van Su Luong, Minh huy Le, Hidden corrosion detection in aircraft structures with a lightweight magnetic convolutional neural network, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 40 (2025) 1797-1819. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2360052>
- [3]. R-O. Oh et al., Evaluation of Delaminations and Defects in Concrete Deck Using Non-Destructive Multi-Physical Scanning Technology, *Sustainability*, 16 (2024) 9225. <https://doi.org/10.3390/su16219225>
- [4]. J. Shu et al., Subsurface Defect Area Quantification of Reinforced Concrete Structures with Array Ultrasound and Dual-scale Neural Network, *Journal of Building Engineering*, 111 (2025) 113130. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.113130>
- [5]. M.A.Gacem et al., Concrete classification using Wi-Fi channel state information and convolutional neural networks, *Construction and Building Materials*, 439 (2024) 137280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137280>
- [6]. K. Dinh, N. Gucunski, T. H. Duong, An algorithm for automatic localization and detection of rebars from GPR data of concrete bridge decks, *Automation in Construction*, 89 (2018) 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.017>
- [7]. N. Gucunski et al., *Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration* Transportation Research Board, Washington DC, 2013
- [8]. Tao Liu, Yutao Zhu, Yi Su, Method for Compensating Signal Attenuation Using Stepped-Frequency Ground Penetrating Radar, *Sensors*, 18 (2018) 1366. <https://doi.org/10.3390/s18051366>
- [9]. <https://ndt.com.vn/gioi-thieu-ve-phuong-phap-kiem-tra-sieu-am-ut>, truy cập ngày 26 tháng 6 năm 2025
- [10]. Weihua Wang et al., Application of Object Detection Algorithms in Non-Destructive Testing of Pressure Equipment: A Review, *Sensors*, 24 (2024) 5944. <https://doi.org/10.3390/s24185944>
- [11]. D. Santos et al., Non-Destructive Inspection of High Temperature Piping Combining Ultrasound and Eddy Current Testing, *Sensors*, 23 (2023) 3348. <https://doi.org/10.3390/s23063348>
- [12]. F. Honarvar, et al., A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control, *Ultrasonics*, 108 (2020) 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>
- [13]. H. Sun et al., Machine learning for ultrasonic nondestructive examination of welding

- defects: A systematic review, Ultrasonics, 127 (2023) 106854. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106854>
- [14]. Vu Ngoc Quy, Toan Thanh Dao, Ho Thanh Trung, A Non-destructive Radar Device for Detecting Additive Materials in Concrete, Engineering, Technology & Applied Science Research, 13 (2023) 10969-10972. <https://doi.org/10.48084/etasr.5900>
- [15]. Le Quang Trung, Naoya Kasai, Minhhuy Le, Kouichi Sekino, predicting actual crack size through crack signal obtained by advanced Flexible Eddy Current Sensor using ResNet integrated with CBAM and Huber loss function, NDT & E International, 149 (2025) 103249. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103249>
- [16]. H. Phan, Y. Cho Y, Q.H. Le, C.V Pham, H.T.L Nguyen, P.T. Nguyen, T.Q Bui, A closed-form solution to propagation of guided waves in a layered halfspace under a time-harmonic load: An application of elastodynamic reciprocity, Ultrasonics, 96 (2019) 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.03.015>
- [17]. Robert Resnick, David Halliday, Jearl Walker, Fundamentals of Physics, 10th Edition, Wiley, 2014