

Giải pháp tự động hóa trong kiểm soát an toàn giao cắt đường sắt: nghiên cứu hệ thống điều khiển barie tự động

Phạm Minh Trí*, Hồ A Lil, Nguyễn Hữu Luân, Bùi Vũ Minh

Khoa Kỹ thuật – Công nghệ, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh

*pmtri@ntt.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung thiết kế và triển khai hệ thống điều khiển tự động nhằm giảm thiểu rủi ro tai nạn tại các giao điểm đường sắt – đường bộ không có rào chắn. Mô hình được xây dựng dựa trên phương pháp điều khiển nhúng ba trạm phân tán sử dụng vi điều khiển và mạng truyền thông không dây LoRa. Trạm 1 sử dụng cảm biến địa chấn để xác định tàu đến. Trạm 2 đóng vai trò điều phối, truyền lệnh cảnh báo sớm. Trạm 3 tại giao cắt đảm nhiệm điều khiển cơ cấu barie và tích hợp thị giác máy tính để giám sát và phát hiện xâm nhập vùng nguy hiểm. Đóng góp mới là sự tổng hợp của cảm biến vật lý và hệ thống thị giác thông minh. Mô hình này tích hợp cơ chế an toàn hai chiều, cho phép Trạm 3 cảnh báo ngược về tàu (Trạm 2) khi phát hiện vật cản không an toàn. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động tin cậy với tỷ lệ truyền/nhận tín hiệu thành công giữa các trạm đạt (1,2-1,8) km và mức tiêu thụ điện năng thấp 81 Wh/24 giờ. Khi kết nối với pin dự phòng 6750 mAh và pin quang điện, các trạm có khả năng vận hành độc lập và liên tục mà không cần nguồn điện lưới.

© 2025 Journal of Science and Technology - NTTU

Nhận 30/07/2025

Được duyệt 11/11/2025

Công bố 28/11/2025

Từ khóa

barie tự động, an toàn đường sắt, hệ thống cảnh báo, tự động hóa, xử lý ảnh, lora

1 Đặt vấn đề

An toàn trong lĩnh vực giao thông đường sắt là một vấn đề cấp bách mang tính toàn cầu, đặc biệt tại các điểm giao cắt giữa đường sắt – đường bộ, nơi tồn tại rủi ro tai nạn tiềm ẩn. Các sự cố va chạm liên quan đến tàu hỏa, bao gồm cả phương tiện đường bộ, người đi bộ hay các vật cản khác, không chỉ thiệt hại về người và tài sản mà còn gây ra gián đoạn hoạt động toàn bộ hệ thống giao thông. Tình hình này trở nên đặc biệt quan trọng tại các giao điểm thiếu hệ thống cảnh báo hoặc rào chắn bảo vệ, thường thấy ở các vùng nông thôn hay khu vực ít dân cư. Vì vậy, việc nghiên cứu và triển khai các giải pháp kiểm soát an toàn hiệu quả, tích hợp tự động hóa là thiết yếu để giảm rủi ro và cải thiện mức độ an toàn trong giao thông đường sắt.

Trong những năm gần đây, xu hướng nghiên cứu chú trọng vào việc cải thiện mức độ an toàn tại các giao cắt đường sắt. Một số nghiên cứu cho thấy, tín hiệu giao thông truyền thống chưa mang lại sự hiệu quả an toàn [1]. Vì vậy cần thiết phải có các hệ thống cảnh báo và kiểm soát tiên tiến hơn. Ở Ấn Độ, hệ thống an ninh tại các giao cắt đường sắt đã được cải tiến, chuyển đổi từ vận hành thủ công sang hệ thống tự động hoàn toàn bằng sử dụng Arduino UNO và cảm biến siêu âm. Nghiên cứu này tích hợp hệ thống phát hiện vật thể dựa trên OpenCV để cảnh báo khi có người hoặc phương tiện còn kẹt trên đường ray [2]. Các công trình khác cũng đã đi sâu vào mô hình hóa xác suất tai nạn, quản lý an toàn thông minh, xác định thời gian tàu đến, và phân tích các yếu tố nguy hiểm [3-5]. Một số nghiên

cứu còn tập trung vào việc áp dụng các công nghệ mới như cảm biến rung địa chấn để xác định vị trí tàu đang đến [6, 7]. Mặc dù đã có những sự tiến bộ đáng kể, vẫn còn tồn tại những khó khăn trong việc nghiên cứu và phát triển hệ thống toàn diện có khả năng đáp ứng nhanh, chính xác và độ tin cậy cao trong nhiều điều kiện khác nhau, đặc biệt tại các khu vực đường sắt không được bảo vệ.

Để giải quyết những tồn tại trên, nghiên cứu này đề xuất một giải pháp tự động hóa toàn diện nhằm tăng cường kiểm soát an toàn tại các giao cắt đường sắt – đường bộ không có rào chắn bảo vệ. Mục tiêu chính là thiết kế và phát triển một hệ thống điều khiển barie tự động, có khả năng cảnh báo sớm và phản ứng kịp thời trước các nguy cơ tai nạn.

2 Phương pháp nghiên cứu

2.1 Các công nghệ và cảm biến sử dụng

- Cảm biến rung địa chấn (Geophone) được lắp đặt tại Trạm 1 có chức năng phát hiện tàu trong phạm vi (50-100) m. Cảm biến chuyển đổi rung động cơ học (do tàu di chuyển với vận tốc (40-60) km/h) thành tín hiệu điện áp. Việc phân tích biên độ và tần số của tín hiệu này cho phép hệ thống xác định chính xác sự hiện diện và vị trí tương đối của nguồn rung.

- Hệ thống áp dụng phương pháp truyền thông không dây LoRa (Long Range), một công nghệ điều chế trải phổ (Spread Spectrum Modulation), để truyền tín hiệu giữa các trạm chức năng cách xa nhau (1,2-1,8) km. Đặc tính truyền dẫn tầm xa kết hợp với khả năng tiêu thụ năng lượng thấp khiến LoRa trở thành giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng tại khu vực ít dân cư hoặc nông thôn. LoRa đảm bảo các gói tín hiệu cảnh báo và điều

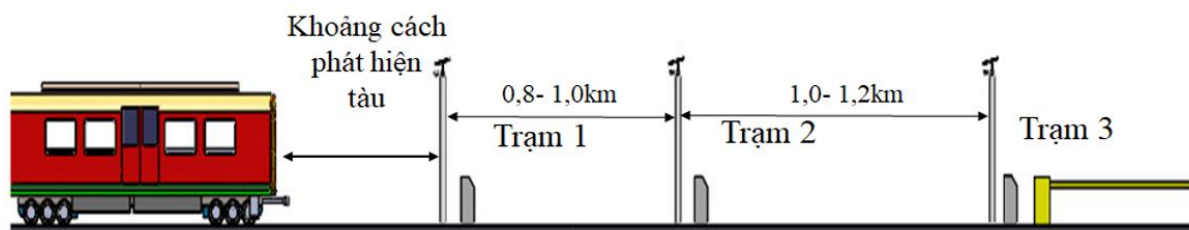
khiển được truyền tải ổn định và nhanh chóng giữa Trạm 1, Trạm 2 và Trạm 3.

- Camera và xử lý ảnh là một trong những đóng góp nổi bật nhất của hệ thống, cho phép Trạm 3 liên tục giám sát khu vực giao cắt. Dữ liệu hình ảnh được xử lý bằng thuật toán nhận dạng vật thể tiên tiến, cụ thể là YOLOv11n (You Only Look Once, version 11n). YOLOv11n có khả năng phát hiện và phân loại các vật thể lạ như người, phương tiện hoặc các vật cản khác nằm trên đường ray với độ chính xác cao. Việc nhận diện vật cản này kích hoạt tín hiệu cảnh báo ngược về Trạm 2, cho phép thông báo khẩn cấp tới lái tàu để xử lý kịp thời.

- Vi điều khiển ATmega328p được lựa chọn làm đơn vị xử lý trung tâm cho các trạm, nổi bật với khả năng tiêu thụ năng lượng thấp và đảm nhiệm việc thu thập dữ liệu từ cảm biến, thực hiện xử lý thuật toán, và điều khiển các cơ cấu chấp hành. Để đảm bảo vận hành an toàn của barie, hệ thống còn trang bị các cảm biến phụ trợ như hồng ngoại hoặc siêu âm. Các cảm biến này có nhiệm vụ xác định vị trí chính xác của barie và phát hiện kịp thời các vật cản trong vùng hoạt động, từ đó ngăn ngừa va chạm trong quá trình nâng hạ.

- Cơ cấu chấp hành barie bao gồm động cơ điện, hệ thống truyền động và cơ cấu khóa. Động cơ được điều khiển bởi tín hiệu từ vi điều khiển để thực hiện chức năng nâng/hạ barie một cách an toàn. Song song, hệ thống cảnh báo (gồm còi báo động và đèn tín hiệu LED/chớp) được kích hoạt đồng bộ với quá trình đóng barie để cảnh báo tức thời người tham gia giao thông.

2.2 Đề xuất hệ thống cảnh báo an toàn giao cắt đường sắt



Hình 1 Thiết kế hệ thống cảnh báo an toàn giao cắt đường sắt

Hệ thống hoạt động theo một quy trình tuần tự và phối hợp giữa ba trạm chức năng như sau (Hình 1):

- Phát hiện tàu (Trạm 1): khi một đoàn tàu di chuyển đến gần khu vực giao cắt, cảm biến rung địa chấn tại

Trạm 1 phát hiện rung động từ đường ray để xác định sự hiện diện của tàu đến. Khi phát hiện tàu trong phạm vi (50-100) m với vận tốc tàu (40-60) km/giờ, Trạm 1 gửi tín hiệu cảnh báo về Trạm 2 thông qua kết nối LoRa.

- Cảnh báo sớm cho lái tàu (Trạm 2): Trạm 2 là trạm trung gian, có nhiệm vụ tiếp nhận tín hiệu từ cả Trạm 1 và Trạm 3. Khi nhận được tín hiệu tàu đến từ Trạm 1, Trạm 2 kích hoạt đèn cảnh báo sớm cho người lái tàu. Điều này giúp lái tàu biết được rằng có tàu đến gần giao cắt và cần chuẩn bị các biện pháp an toàn.

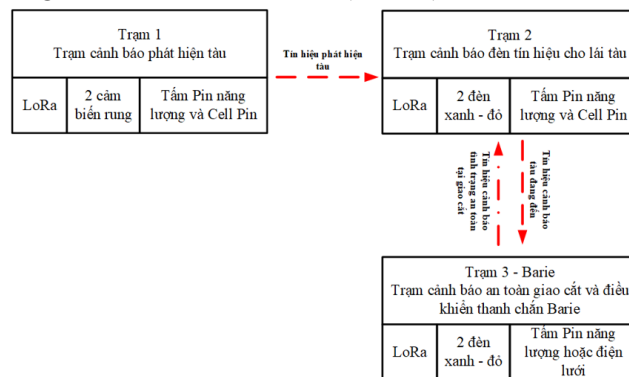
- Điều khiển Barie và cảnh báo tại giao cắt (Trạm 3): khi Trạm 3 nhận được tín hiệu tàu đến từ Trạm 1, còi và đèn cảnh báo được kích hoạt tại giao cắt. Đồng thời, barie hạ chắn đường bộ, ngăn không cho phương tiện và người đi qua. Trong suốt quá trình barie hoạt động, camera tại Trạm 3 liên tục quét khu vực giao cắt. Nếu thuật toán xử lý ảnh phát hiện vật thể xâm nhập (người, phương tiện hoặc vật cản) nằm trên đường ray, Trạm 3 sẽ truyền tín hiệu cảnh báo khẩn cấp ngược về Trạm 2. Trạm 2 tiếp nhận và hiển thị cảnh báo đặc biệt, cung cấp đủ thời gian cho lái tàu để thực hiện các biện pháp giảm tốc độ hoặc dừng khẩn cấp, nhằm tránh va chạm.

- Hoàn tất an toàn: sau khi tàu đã đi qua khỏi khu vực giao cắt (được xác nhận bằng cảm biến hoặc timer), Trạm 3 điều khiển barie tự động nâng lên, cho phép giao thông đường bộ tiếp tục.

Toàn bộ hệ thống được thiết kế với khả năng tự cung cấp năng lượng, vận hành độc lập nhờ vào việc sử dụng pin quang điện và hệ thống pin lưu trữ, qua đó đảm bảo hệ thống duy trì trạng thái hoạt động trong khi không có nguồn từ điện lưới.

2.3 Thiết kế hệ thống điều khiển barie tự động

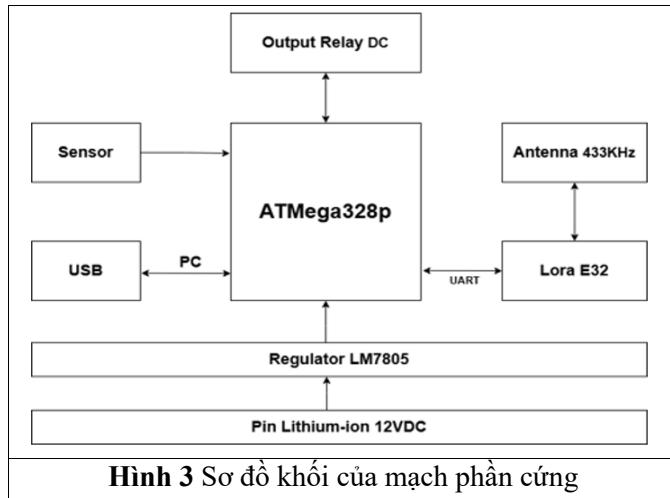
Trọng tâm của nghiên cứu này là thiết kế hệ thống điều khiển barie tự động, với mục đích kiến tạo một giải pháp toàn diện và đáng tin cậy nhằm tăng cường khả năng an toàn tại các giao cắt đường sắt. Hệ thống này được phát triển dựa trên một kiến trúc phân tán bao gồm ba trạm chức năng chính, mỗi trạm giữ vai trò cụ thể trong chuỗi vận hành an toàn (Hình 2).



Hình 2 Sơ đồ mô hình các trạm chức năng

2.3.1 Thiết kế phần cứng

- Vi điều khiển ATmega328p thuộc kiến trúc AVR là đơn vị xử lý trung tâm (CPU) thực hiện thu thập dữ liệu từ cảm biến và xử lý logic theo thuật toán nhúng. Tín hiệu từ các trạm được truyền/nhận thông qua module LoRa E32 bằng cách sử dụng giao thức UART. Mặc khác, ATmega328p có thể nhận lệnh điều khiển từ xa qua LoRa. Dựa trên dữ liệu từ cảm biến hoặc lệnh điều khiển nhận được, vi điều khiển kích hoạt hoặc vô hiệu hóa Output Relay DC để thực hiện hành động điều khiển vật lý. Toàn bộ hoạt động được duy trì bởi nguồn pin 12 V (DC) được ổn áp về 5 V (DC) thông qua module Regulator LM7805 (Hình 3). Board mạch phần cứng được thiết kế bằng phần mềm Altium Designer với tiêu chí nhỏ gọn, đảm bảo hiệu suất, độ tin cậy và khả năng hoạt động độc lập (Hình 4).



- Để đánh giá hiệu suất hoạt động thực tế của board mạch, nhóm tác giả đã tiến hành đo dòng điện tiêu thụ. Dữ liệu này được sử dụng để tính toán và lựa chọn loại pin phù hợp, đảm bảo cung cấp năng lượng tối ưu cho board mạch, giúp hệ thống hoạt động ổn định và hiệu quả. Khi cấp nguồn 12 V (DC), board mạch ở chế độ chờ tiêu thụ dòng điện là 0,21 A (Hình 5). Tương tự với

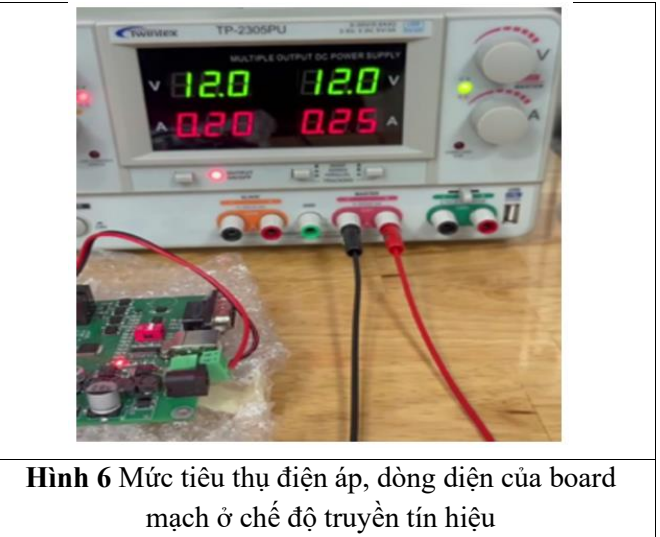
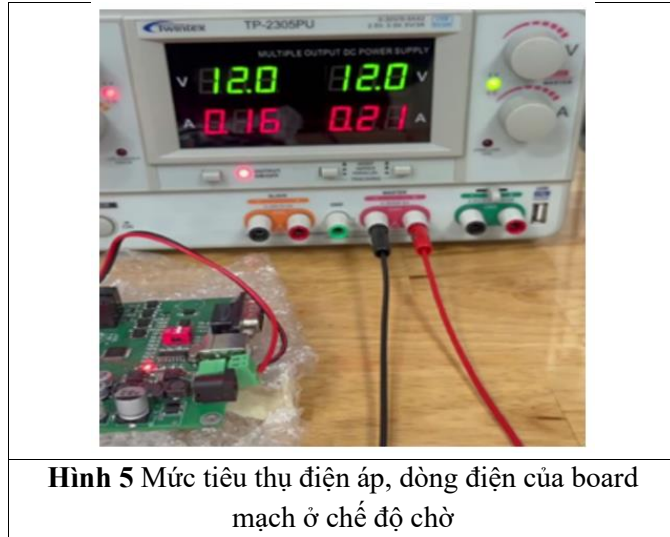
chế độ truyền tín hiệu Lora, board mạch tiêu thụ dòng điện là 0,25 A (Hình 6). Từ đó ta có thể tính toán được mức công suất tiêu thụ của mạch như sau:

+ Khi mạch ở chế độ chờ:

$$P = U \times I = 12 \times 0,21 = 2,52 \text{ W}$$

+ Khi mạch ở chế độ truyền tín hiệu Lora:

$$P = U \times I = 12 \times 0,25 = 3 \text{ W}$$



- Theo nguyên lý: mỗi 1 giờ sẽ có một đoàn tàu chạy qua, mạch hoạt động trong 5 phút. Trong 5 phút đó, một bóng đèn có công suất 10 W được kết nối với mạch cũng sẽ hoạt động. Ta sẽ tính toán được mức tiêu thụ của mạch trong 1 giờ như sau:

+ Năng lượng tiêu thụ ở chế độ chờ trong 1 giờ:

- Công suất mạch hoạt động trong chế độ chờ:

$$\text{Thời gian 55 phút} = 0,917 \text{ giờ}$$

- Công suất:

$$P = U \times I = 12 \times 0,21 = 2,52 \text{ W}$$

- Năng lượng tiêu thụ trong 0,917 giờ là:

$$A1 = P \times t = 2,52 \times 0,917 = 2,3 \text{ Wh}$$

+ Năng lượng tiêu thụ ở chế độ truyền tín hiệu trong 5 phút:

- Công suất của mạch: 3 W
- Công suất của bóng đèn: 10 W
- Tổng công suất:

$$P = 3 + 10 = 13 \text{ W}$$

- Thời gian mạch hoạt động ở chế độ truyền:

Thời gian 5 phút = 0,083 giờ

- Năng lượng tiêu thụ trong 0,083 giờ là:

$$A_2 = P \times t = 13 \times 0,083 = 1,079 \text{ Wh}$$

+ Năng lượng tiêu thụ của mạch hoạt động trong một giờ là:

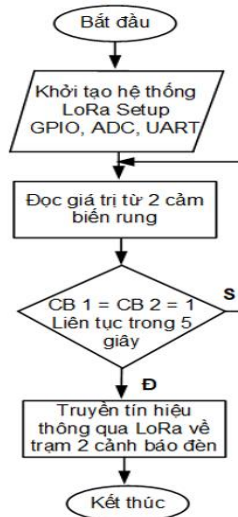
$$A = A_1 + A_2 = 2,3 + 1,079 = 3,379 \text{ Wh}$$

+ Như vậy, năng lượng mạch tiêu thụ trong 24 giờ là:

$$A_{24h} = A \times 24 = 3,379 \times 24 = 81 \text{ Wh}$$

2.3.2 Thiết kế phần mềm

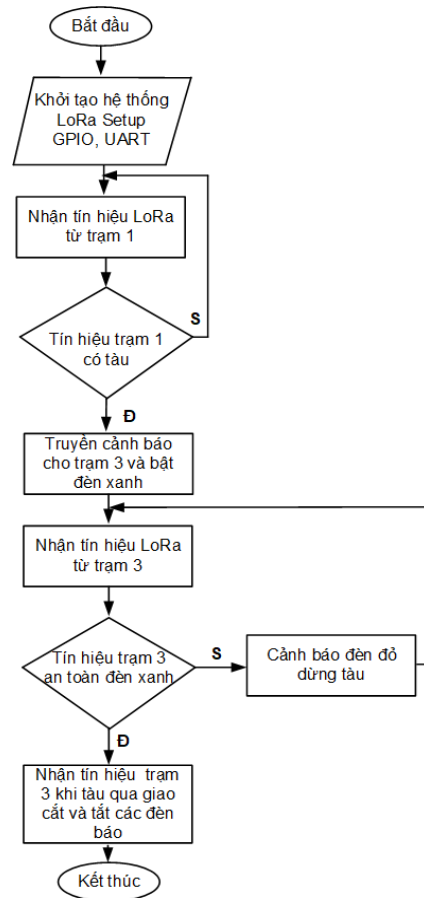
- Khối Node (Trạm 1) có vai trò phát hiện tàu đến với nguyên lý được mô tả trong lưu đồ giải thuật (Hình 7):



Hình 7 Lưu đồ giải thuật Trạm 1

+ Sau khi khởi tạo, hệ thống bước vào vòng lặp giám sát liên tục. Bắt đầu bằng việc đọc giá trị từ hai cảm biến rung (CB1 và CB2), cảm biến được điều chỉnh độ nhạy để phát hiện cường độ rung ở ngưỡng (3-5) mm/s. Tại đây, vi điều khiển thực hiện kiểm tra điều kiện kích hoạt: CB1 và CB2 phải đồng thời báo trạng thái kích hoạt (Giá trị 1) và duy trì trạng thái này liên tục trong 3 giây. Nếu điều kiện này không được thỏa mãn (Điều kiện sai), hệ thống sẽ quay lại bước đọc cảm biến để tiếp tục giám sát. Nếu điều kiện được đáp ứng (Điều kiện đúng), hệ thống xác nhận đã xảy ra rung động đáng kể và chuyển sang bước cảnh báo. Cuối cùng, hệ thống thực hiện truyền tín hiệu thông qua LoRa về Trạm 2 cảnh báo đèn, sau đó thuật toán kết thúc.

- Khối Node (Trạm 2) có vai trò cảnh báo đèn tín hiệu cho lái tàu, Trạm 2 hoạt động với nguyên lý được mô tả trong lưu đồ giải thuật (Hình 8):



Hình 8 Lưu đồ giải thuật Trạm 2

+ Sau khi khởi tạo, hệ thống bước vào trạng thái chờ nhận tín hiệu LoRa từ Trạm 1. Hệ thống sẽ liên tục kiểm tra điều kiện tín hiệu Trạm 1 có tàu đến hay không. Nếu không, hệ thống tiếp tục chờ nhận tín hiệu. Khi phát hiện có tàu (Điều kiện đúng), hệ thống thực hiện hành động truyền cảnh báo cho Trạm 3 và bật đèn xanh để cảnh báo về sự xuất hiện của tàu.

+ Tiếp theo, hệ thống chuyển sang giai đoạn phối hợp an toàn, bằng cách chờ nhận tín hiệu LoRa từ Trạm 3. Hệ thống sẽ kiểm tra tín hiệu Trạm 3 đạt trạng thái an toàn hay chưa (an toàn đèn xanh). Nếu chưa an toàn (Điều kiện sai), hệ thống sẽ bật cảnh báo đèn đỏ dừng tàu. Nếu đã nhận được tín hiệu an toàn (Điều kiện đúng), hệ thống chờ nhận tín hiệu Trạm 3 khi tàu đi qua giao cắt và tắt đèn báo để hoàn thành chu trình. Cuối cùng, thuật toán kết thúc.

- Khối Master (Trạm 3) có vai trò giám sát bằng camera cảnh báo an toàn tại điểm giao cắt, điều khiển barie và Trạm 3 hoạt động với nguyên lý được mô tả trong lưu đồ giải thuật (Hình 9):

5 giây khi tàu không còn xuất hiện. Nếu đếm hết 5 giây, hệ thống gửi tín hiệu "2" (tàu đã đi qua) qua serial.

+ Xác định vùng nguy hiểm: với các vật thể còn lại (phương tiện/người) đủ điều kiện, hệ thống tính toán tọa độ tâm và áp dụng thuật toán nội suy tuyến tính dựa trên hai đường thẳng an toàn để xác định xem vật thể có nằm trong vùng nguy hiểm (thỏa mãn đồng thời hai điều kiện $tx > ty$ và $tx < ty$) hay không.

+ Gửi tín hiệu cảnh báo:

- Nếu có ít nhất một vật thể nằm trong vùng nguy hiểm, hệ thống gửi tín hiệu cảnh báo "1".
- Nếu tất cả vật thể đều an toàn, hệ thống gửi tín hiệu "0".
- Tín hiệu gửi đi bị giới hạn bởi bộ đếm tốc độ (tối đa 4 tín hiệu/giây).

+ Kết thúc vòng lặp: Cuối cùng, hình ảnh đã xử lý được hiển thị lên giao diện và vòng lặp mới bắt đầu.

2.3.3 Quản lý năng lượng

- Mỗi trạm đều tích hợp thuật toán quản lý năng lượng nhằm tối ưu vấn đề sử dụng năng lượng từ pin quang điện và pin dự phòng. Điều này bao gồm việc giám sát mức pin, điều chỉnh chế độ hoạt động (chế độ chờ/vận hành), và quản lý quá trình sạc/xả pin để kéo dài tuổi thọ hệ thống. Từ kết quả tính toán công suất tiêu thụ trong 24 giờ của board mạch hệ thống, dung lượng pin mà hệ thống cần để hoạt động hiệu quả:

$$C = (E \times 1000)/V$$

Trong đó:

C là dung lượng pin (mAh)

E là năng lượng tiêu thụ (Wh)

V là điện áp (V)

- Áp dụng công thức tính:

$$C = (E \times 1000)/V = (81 \times 1000)/12 = 6750 \text{ mAh}$$

– Như vậy, để trạm hoạt động ổn định trong 24 giờ, cần sử dụng bộ pin có dung lượng tối thiểu 6750 mAh. Bộ pin có thể được chọn với dung lượng lớn hơn để đảm bảo hoạt động ổn định trong điều kiện thời tiết xấu hoặc khi tấm pin mặt trời không cung cấp đủ năng lượng.

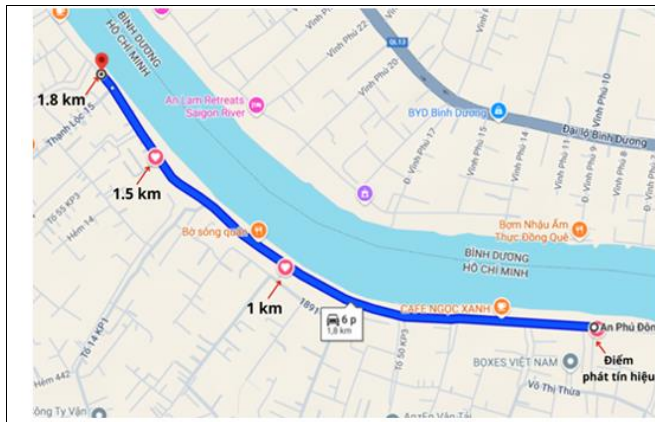
3 Kết quả và thảo luận

Để đánh giá toàn diện hệ thống, các thử nghiệm trong nhiều điều kiện khác nhau được tiến hành trên cả mô hình thực tế và tại các địa điểm ngoài trời đại diện cho môi trường hoạt động của đường sắt.

– Thiết bị thử nghiệm: hệ thống được xây dựng với các phần cứng đã thiết kế, bao gồm các board mạch điều khiển ATmega328p, module LoRa, cảm biến địa chấn, camera, cơ cấu barie nhỏ, còi và đèn cảnh báo. Toàn bộ hệ thống được cấp nguồn bằng pin quang điện và pin dự phòng.

– Thử nghiệm sự ổn định của bộ truyền nhận LoRa, nhóm tác giả đã tiến hành đo khoảng cách truyền/nhận của module LoRa tại nhiều khu vực khác nhau. Để đảm bảo các thông số giống nhau ở các môi trường thử nghiệm, phương pháp chọn các thông số trung bình trong cài đặt để đảm bảo khách quan trong thử nghiệm, các thông số gồm:

- + Tần số hoạt động: 413 MHz
- + Công suất: 12 dBm
- + Kênh truyền thông: 3
- + Tốc độ truyền: 9600
- + Độ dài gói tin: 16 byte
- + Thời gian chờ: 250 ms
- + An-ten: 433 MHz, 3 DBi, dài 52 mm, trở kháng 50 Ohm.



Hình 11 Đo khoảng cách truyền/nhận tại khu vực bờ sông Sài Gòn



Hình 12 Đo khoảng cách truyền/nhận tại đường ngang khu vực Bình Dương

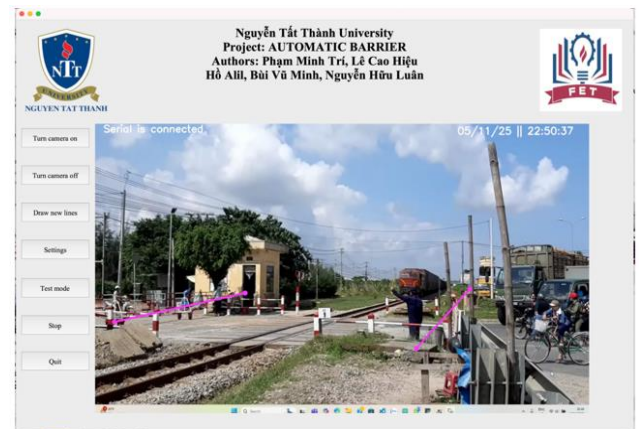
→ Kết quả về hiệu suất truyền thông LoRa: các thử nghiệm cho thấy module LoRa truyền/nhận tín hiệu thành công giữa các trạm với khoảng cách đạt (1,2-1,8) km, ngay cả trong điều kiện có một số vật cản. Điều này đáp ứng yêu cầu về khoảng cách vận hành của hệ thống tại các giao cắt đường sắt (Hình 11, Hình 12).

– Khả năng phát hiện tàu của Trạm 1: cảm biến địa chấn tại Trạm 1 đã phát hiện tàu một cách đáng tin cậy trong phạm vi (50-100) m. Cảm biến địa chấn được hiệu chỉnh độ nhạy để phát hiện rung động ở ngưỡng (3-5) mm/s. Khi cường độ rung địa chấn do tàu hỏa gây ra đạt ngưỡng kích hoạt, cảm biến sẽ xuất tín hiệu logic 5 V (DC). Giá trị tín hiệu này được hệ thống xử lý liên tục với tần số lấy mẫu là 100ms. Sự hiện diện của tàu được xác định dựa trên hai điều kiện: tín hiệu đồng thời từ hai cảm biến (được lắp đặt cách nhau 10 m) phải cùng đạt mức 5 V (DC) và trạng thái này phải duy trì liên tục trong khoảng thời gian 3 giây. Đồng thời, Trạm 2 phát tín hiệu cảnh báo sớm khi có tín hiệu từ Trạm 1 phát hiện tàu di chuyển đến.

– Hoạt động của barie và cảnh báo: hệ thống điều khiển tại Trạm 3 đã vận hành barie an toàn. Thời gian từ khi nhận tín hiệu tàu đến cho đến khi barie đóng hoàn toàn và cảnh báo kích hoạt được tối ưu để đảm bảo an toàn trước khi tàu đến. Còi và đèn cảnh báo hoạt động hiệu quả, gây sự chú ý đến người tham gia giao thông.

– Hệ thống camera đóng vai trò quan trọng, chịu trách nhiệm phát hiện và cảnh báo nguy hiểm. Camera được lắp đặt cố định tại vị trí có tầm nhìn toàn cảnh khu vực đường ray và barie, đảm bảo ghi nhận đầy đủ mọi

hoạt động xảy ra trong vùng cần giám sát (Hình 13). Thuật toán YOLOv11n đã chứng tỏ khả năng phát hiện vật cản trên đường ray với độ chính xác cao trong thời gian thực. Hệ thống đã thành công trong việc nhận diện người và phương tiện, cho phép Trạm 3 gửi tín hiệu cảnh báo khẩn cấp về Trạm 2.



Hình 13 Giao diện phần mềm điều khiển chính

- Hiệu quả năng lượng:
- + Pin dự phòng với dung lượng 6750 mAh kết hợp với pin quang điện, các trạm hoạt động độc lập và liên tục mà không cần nguồn điện lưới.
- + Board mạch hệ thống có mức tiêu thụ điện năng thấp vào khoảng 81 Wh/24 giờ, thời gian hoạt động của hệ thống được kéo dài, giảm phát nhiệt và tiết kiệm chi phí vận hành.

Tóm lại, kết quả thử nghiệm khẳng định rằng hệ thống điều khiển barie tự động đề xuất hoạt động chính xác, ổn định và đáng tin cậy, góp phần nâng cao đáng kể sự

an toàn tại các giao cắt đường sắt không được bảo vệ. Mặc dù hệ thống đã đạt được các mục tiêu đặt ra, việc tối ưu hóa hơn nữa thuật toán xử lý ảnh trong các điều kiện khác nhau và tích hợp thêm các cảm biến dự phòng là định hướng nghiên cứu triển vọng trong tương lai.

4 Kết luận và đề xuất

Bài báo này đã trình bày mô hình tự động hóa toàn diện nhằm nâng cao kiểm soát an toàn tại các giao cắt đường sắt-đường bộ, thông qua việc nghiên cứu và phát triển hệ thống điều khiển barie tự động. Hệ thống với kiến trúc ba trạm chức năng (phát hiện tàu, cảnh báo lái tàu, điều khiển chính tại giao cắt kết hợp phát hiện vật cản) tích hợp cảm biến địa chấn, LoRa và xử lý ảnh YOLOv11n. Kết quả thử nghiệm trong điều kiện thực tế đã chứng minh mô hình hệ thống hoạt động ổn định, chính xác và đáng tin cậy: khả năng phát hiện tàu và vật cản được thực hiện kịp thời, đảm bảo an toàn cho quá trình đóng/mở barie và cảnh báo khẩn cấp tới lái tàu. Về hiệu suất truyền thông: hệ thống hoạt động với

tỷ lệ truyền/nhận tín hiệu thành công giữa các trạm đạt (1,2-1,8) km, đáp ứng yêu cầu về phạm vi hoạt động thực tế. Về hiệu quả năng lượng: mức tiêu thụ điện năng thấp 81 Wh/24 giờ. Khi kết nối với pin dự phòng 6750 mAh và pin quang điện, các trạm có khả năng vận hành độc lập và liên tục mà không cần nguồn điện lưới. Trong tương lai, nghiên cứu có thể tập trung vào việc cải thiện hiệu suất của hệ thống trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, tích hợp các kỹ thuật học máy và trí tuệ nhân tạo để nâng cao khả năng dự đoán và thích ứng. Đồng thời, việc phát triển các tính năng giám sát và điều khiển từ xa, cùng với các cơ chế chịu lỗi và tối ưu chi phí, sẽ là những hướng đi quan trọng để hoàn thiện và nhân rộng hệ thống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ đề tài mã số 2024.01.99/HĐ-KHCN.

Tài liệu tham khảo

1. M.G. Lenné. (2011). Driver behavior at rural rail level crossings. *Accident Analysis & Prevention*, 43, 1629.
2. G. Singh, S. Singh, H. Kaur, and J. Singh. (2020). Design and implementation of smart railway crossing security system. *Proceedings of the International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, 1105.
3. T. Oyama and M. Miwa. (2016). Development of a probabilistic risk assessment model for railway level crossing accidents. *Safety Science*, 84, 149.
4. D. Davydov, A. Khmelov, and A. Khomich. (2020). An intelligent system for railway safety management. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*.
5. S. Boufidis, C. Zikas, and E. Siskos. (2019). IoT-based smart railway crossing system. *Proceedings of the International Conference on Embedded and Real Time Systems (ICERTS)*.
6. A. Read, D. A. Jones, and N. M. P. Singh. (2021). Predicting train arrival times at level crossings using machine learning. *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*.
7. J.M. Russell, M. J. Russell, and M. G. Russell. (2020). Detection of train movement using railway track vibrations. *Sensors*, 20, 288.

Automation Solution for Railway Crossing Safety Control: A Study on Automatic Barrier Control System

Pham Minh Tri*, Ho A Lil, Nguyen Huu Luan, Bui Vu Minh

Faculty of Engineering and Technology, Nguyen Tat Thanh University, Ho Chi Minh City, Viet Nam

*pmtri@ntt.edu.vn

Abstract This study focuses on the design and implementation of an automated control system aimed at optimizing safety and mitigating accident risks at unprotected railway-road intersections. The model was constructed based on a three-station distributed embedded control architecture, utilizing microcontrollers and a LoRa wireless communication network. Station 1 employed geophone sensors for seismic data acquisition to determine the presence of an approaching train. Station 2 served as the coordinator, transmitting early warning commands. Station 3, situated at the crossing, was responsible for barrier mechanism control and integrates computer vision for monitoring and detecting intrusion into the danger zone. The novel contribution is the synthesis of physical sensors and an intelligent vision system. This model incorporated a bidirectional safety mechanism, enabling Station 3 to reverse-alert the train (via Station 2) upon detecting unsafe obstacles. Experimental results demonstrated the system's reliable operation, with a successful signal transmission/reception rate between stations reaching (1.2–1.8) km. Furthermore, the system exhibited low power consumption, quantified at approximately 81 Wh/24 hours. When connected with a 6750 mAh backup battery and photovoltaic cells, the stations were capable of continuous and autonomous operation without reliance on the power grid.

Keywords automatic barrier, railway safety, warning system, automation, image processing, lora