



DESIGN OF AN INTEGRATED AUTOMATIC RAILWAY LEVEL CROSSING WARNING SYSTEM WITH AN END-OF-TRAIN DEVICE

Co Nhu Van*

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 20/03/2026

Revised: 23/05/2026

Accepted: 02/06/2026

Published online: 15/06/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.8>

* *Corresponding author*

Email: vancn@utc.edu.vn; Tel: 0987959637

Abstract. Traffic accidents at railway–road level crossings account for a significant proportion of railway accidents, especially at unmanned level crossings. Conventional warning systems often require high installation and maintenance costs, while end-of-train (EOT) signaling devices are typically deployed independently to monitor train integrity. The coexistence of these two separate systems increases infrastructure costs and complicates system management and operation. This study proposes the design of an integrated system that combines an automatic level crossing warning function with an EOT signaling device based on Global Navigation Satellite System (GNSS) technology and long-range LoRa wireless communication. The proposed system architecture consists of a level crossing unit, a locomotive-mounted device, an EOT device, and a monitoring center. GNSS data are used to determine the real-time position and speed of the train and are transmitted to the level crossing unit to activate the warning system. In addition, position information from the EOT device is utilized to accurately determine the moment when the entire train has cleared the crossing and to deactivate the warning system. The proposed approach provides a practical and low-cost railway safety solution with advantages such as simple deployment, flexible system expansion, and improved operational efficiency, thereby enhancing safety at railway level crossings.

Keywords: automatic level crossing warning system, end-of-train device, GNSS, LoRa, railway traffic safety.



NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ HỆ THỐNG CẢNH BÁO TỰ ĐỘNG TẠI ĐƯỜNG NGANG ĐƯỜNG SẮT TÍCH HỢP CHỨC NĂNG THIẾT BỊ ĐUÔI TÀU

Cồ Như Văn*

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: 20/03/2026

Ngày nhận bài sửa: 23/05/2026

Ngày chấp nhận đăng: 02/06/2026

Ngày xuất bản Online: 15/06/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.5.8>

* Tác giả liên hệ

Email: vancn@utc.edu.vn; Tel: 0987959637

Tóm tắt. Tai nạn giao thông tại các điểm giao cắt đồng mức giữa đường sắt và đường bộ chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng số các vụ tai nạn đường sắt, đặc biệt tại các đường ngang không người gác. Các hệ thống cảnh báo truyền thống có chi phí đầu tư và phí bảo trì khá cao, trong khi thiết bị tín hiệu đuôi tàu lại được triển khai độc lập để giám sát trạng thái đoàn tàu. Việc tồn tại hai hệ thống riêng biệt làm tăng chi phí đầu tư và phức tạp trong quản lý khai thác. Bài báo đề xuất thiết kế một hệ thống tích hợp chức năng cảnh báo tự động tại đường ngang tự động và thiết bị tín hiệu đuôi tàu dựa trên công nghệ định vị vệ tinh toàn cầu (GNSS) kết hợp với truyền thông vô tuyến tầm xa LoRa. Hệ thống gồm thiết bị đường ngang, thiết bị trên đầu máy, thiết bị tại đuôi tàu và trung tâm giám sát. Dữ liệu GNSS được sử dụng để xác định vị trí và tốc độ đoàn tàu, truyền đến thiết bị đường ngang để kích hoạt cảnh báo, đồng thời sử dụng tín hiệu từ thiết bị đuôi tàu để xác định chính xác thời điểm kết thúc cảnh báo. Giải pháp đề xuất có chi phí thấp, dễ triển khai và góp phần nâng cao an toàn giao thông tại các đường ngang đường sắt.

Từ khóa: hệ thống cảnh báo đường ngang tự động, thiết bị đuôi tàu, GNSS, LoRa, an toàn giao thông đường sắt.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đường ngang đường sắt là vị trí giao cắt đồng mức giữa đường sắt và đường bộ, nơi tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn giao thông cao do sự tương tác trực tiếp giữa đoàn tàu và phương tiện đường bộ. Khác với các loại phương tiện giao thông khác, đoàn tàu có khối lượng lớn, quãng đường phanh dài và không thể chuyển hướng linh hoạt; vì vậy, khi xảy ra va chạm tại khu vực đường ngang, hậu quả thường đặc biệt nghiêm trọng. Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy tai nạn tại đường ngang vẫn là một trong những nhóm rủi ro an toàn nổi bật của hệ thống đường sắt, đồng thời là chủ đề được quan tâm mạnh trong các nghiên cứu về quản trị rủi ro, phân tích tai nạn và tối ưu giải pháp bảo vệ đường ngang [1-4].

Đối với Việt Nam, mạng lưới đường sắt quốc gia hiện vẫn tồn tại số lượng lớn các điểm giao cắt đồng mức giữa đường sắt và đường bộ; trong đó, nhiều vị trí chưa được bảo vệ đầy đủ hoặc vẫn phụ thuộc vào các hình thức cảnh báo có mức tự động hóa thấp. Đặc điểm này làm cho bài toán bảo đảm an toàn tại đường ngang tiếp tục là một nhu cầu thực tiễn cấp thiết. Trong nghiên cứu trước đây của tác giả, vấn đề thiết kế an toàn cho hệ thống cảnh báo đường ngang tự động ứng dụng công nghệ tiên tiến đã được đặt ra theo hướng giảm chi phí đầu tư, tăng khả năng giám sát và phù hợp hơn với điều kiện khai thác trong nước [5]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu trong nước cũng đã phát triển các thiết kế thiết bị phòng vệ đường ngang dùng radar phát hiện đoàn tàu hoặc thiết bị đếm trục nội địa để thay thế các cấu phần nhập ngoại có giá thành cao [6, 7].

Trong thực tế, nhiều giải pháp kỹ thuật đã được nghiên cứu và triển khai nhằm phát hiện đoàn tàu tiếp cận khu vực đường ngang để kích hoạt thiết bị cảnh báo. Các hệ thống truyền thống thường sử dụng mạch điện đường ray, cảm biến địa chấn, hoặc bộ đếm trục. Các giải pháp này có ưu điểm là độ tin cậy tương đối cao và đã được ứng dụng trong nhiều hệ thống tín hiệu đường sắt; tuy nhiên, việc lắp đặt trực tiếp trên hạ tầng thường làm tăng chi phí đầu tư, chi phí bảo trì và mở rộng hệ thống. Ngay cả trong các nghiên cứu hiện đại hơn, bài toán bảo trì, phát hiện lỗi và quản lý rủi ro tại đường ngang vẫn được xem là thách thức đáng kể [4], [6-8].

Trong những năm gần đây, sự phát triển của công nghệ định vị vệ tinh và truyền thông không dây đã mở ra hướng tiếp cận mới cho các hệ thống giám sát và bảo đảm an toàn đường sắt. Nghiên cứu về đường sắt lấy đoàn tàu làm trung tâm cho thấy GNSS có tiềm năng lớn trong việc xác định vị trí đoàn tàu, hỗ trợ virtual balise, giám sát tính toàn vẹn đoàn tàu và giảm sự phụ thuộc vào thiết bị mặt đất [9-11]. Song song với đó, các nghiên cứu về giám sát đoàn tàu với chi phí thấp và mạng LoRa cho thấy truyền thông tầm xa công suất thấp có thể là một lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng cảnh báo, phát hiện sự hiện diện đoàn tàu và truyền trạng thái thiết bị trong môi trường đường sắt [12, 13].

Trên cơ sở đó, một số nghiên cứu gần đây đã đề xuất các hệ thống cảnh báo đường ngang tự động sử dụng GNSS kết hợp truyền thông vô tuyến nhằm phát hiện đoàn tàu tiếp cận khu vực giao cắt và kích hoạt cảnh báo cho người tham gia giao thông. Trong nghiên cứu trước của tác giả, một hệ thống cảnh báo đường ngang tự động ứng dụng công nghệ tiên tiến đã được đề xuất theo kiến trúc an toàn, hướng tới giảm chi phí xây dựng và bảo trì hệ thống [5]. Tuy nhiên, phần lớn các cấu hình cảnh báo đường ngang hiện nay vẫn tập trung vào chức năng phát hiện tàu đến và kích hoạt cảnh báo, trong khi bài toán xác định chính xác thời điểm tắt hệ thống cảnh báo tại khu vực đường ngang sau khi toàn bộ đoàn tàu đã rời khỏi khu vực giao cắt là chưa được giải quyết triệt để [2-6].

Đây là điểm hạn chế quan trọng của nhiều hệ thống cảnh báo đường ngang hiện hữu. Trong không ít trường hợp, việc kết thúc cảnh báo được xác định dựa trên thời gian ước lượng theo

tốc độ đoàn tàu và chiều dài giả định của đoàn tàu. Cách tiếp cận này có thể tạo ra sai lệch đáng kể trong vận hành thực tế: nếu đoàn tàu ngắn hoặc chạy nhanh, cảnh báo có thể duy trì lâu hơn cần thiết, gây ảnh hưởng đến giao thông đường bộ; ngược lại, nếu đoàn tàu dài hoặc chạy chậm, hệ thống có nguy cơ tắt cảnh báo sớm hơn thời điểm an toàn. Xét từ góc độ quản trị rủi ro tại đường ngang, đây là khoảng trống thực tiễn mà cần khắc phục.

Trong khi đó, ở lĩnh vực vận hành đoàn tàu, thiết bị tín hiệu đuôi tàu (End-of-Train device) hoặc các giải pháp giám sát tính toàn vẹn đoàn tàu bằng GNSS đang được nghiên cứu nhằm xác định trạng thái và vị trí phần cuối đoàn tàu, từ đó hỗ trợ bảo đảm an toàn vận hành và cung cấp dữ liệu cho các hệ thống điều hành hiện đại [9,10], [14]. Về phía tác giả, bài báo trước về thiết bị tín hiệu đuôi tàu cho tàu hàng trên đường sắt Việt Nam đã đặt nền tảng cho hướng tiếp cận sử dụng thông tin ở cuối đoàn tàu như một nguồn dữ liệu hữu ích phục vụ giám sát vận hành [15].

Tuy nhiên, qua rà soát tài liệu có thể thấy rằng hệ thống cảnh báo đường ngang và thiết bị tín hiệu đuôi tàu thường vẫn được nghiên cứu hoặc triển khai như hai phân hệ độc lập. Sự tách biệt này dẫn tới trùng lặp phần cứng, tăng chi phí đầu tư và làm cho dữ liệu về vị trí đuôi tàu chưa được khai thác hiệu quả để phục vụ điều khiển cảnh báo tại đường ngang [4], [9], [14, 15]. Nói cách khác, khoảng trống nghiên cứu không chỉ nằm ở công nghệ phát hiện tàu đến, mà còn nằm ở khả năng tích hợp dữ liệu vị trí đầu tàu – đuôi tàu – đường ngang trong một kiến trúc thống nhất, chi phí thấp và phù hợp với điều kiện khai thác thực tế.

Xuất phát từ các vấn đề nêu trên, bài báo này đề xuất một giải pháp tích hợp chức năng cảnh báo tự động tại đường ngang với chức năng thiết bị tín hiệu đuôi tàu trong cùng một hệ thống dựa trên công nghệ GNSS và truyền thông vô tuyến LoRa. Trong hệ thống đề xuất, thiết bị lắp đặt trên đoàn tàu thực hiện đồng thời hai nhiệm vụ: (i) xác định vị trí đoàn tàu để kích hoạt cảnh báo tại đường ngang; và (ii) xác định chính xác thời điểm đuôi tàu rời khỏi khu vực giao cắt để kết thúc cảnh báo. Đồng thời, hệ thống được kết nối với trung tâm giám sát nhằm theo dõi trạng thái thiết bị theo thời gian thực. Điểm mới nổi bật của nghiên cứu không chỉ nằm ở việc sử dụng GNSS và LoRa, mà ở việc tích hợp hai chức năng vốn thường tách rời – cảnh báo đường ngang và tín hiệu đuôi tàu – trong cùng một kiến trúc hệ thống. Cách tiếp cận này cho phép dùng chung hạ tầng truyền thông và một phần phần cứng, đồng thời giải quyết trực tiếp bài toán tắt cảnh báo theo vị trí thực của đuôi tàu thay vì theo thời gian ước lượng. Đây là điểm khác biệt quan trọng so với các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào phát hiện đoàn tàu tiếp cận hoặc vào từng phân hệ riêng lẻ.

Các đóng góp chính của bài báo được tóm tắt như sau:

- (1) Đề xuất mô hình hệ thống cảnh báo tự động tại đường ngang đường sắt tích hợp chức năng thiết bị tín hiệu đuôi tàu.
- (2) Đề xuất phương pháp xác định chính xác thời điểm kết thúc cảnh báo tại đường ngang dựa trên thông tin vị trí của đuôi tàu.
- (3) Xây dựng kiến trúc hệ thống tích hợp gồm thiết bị trên đoàn tàu, thiết bị tại đường ngang và trung tâm giám sát.
- (4) Chỉ ra tiềm năng ứng dụng thực tế của giải pháp theo hướng chi phí thấp, dễ mở rộng, thuận lợi cho quản lý vận hành và phù hợp với điều kiện khai thác của mạng lưới đường sắt Việt Nam.

Với các đóng góp trên, hệ thống đề xuất hướng tới việc cung cấp một giải pháp cảnh báo đường ngang có chi phí triển khai thấp, dễ mở rộng và phù hợp với điều kiện khai thác của

mạng lưới đường sắt Việt Nam, đồng thời góp phần nâng cao mức độ an toàn giao thông tại các vị trí đường ngang.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG

2.1. Phân tích xây dựng mô hình hệ thống

Trong các hệ thống cảnh báo đường ngang tự động, việc phát hiện đoàn tàu tiếp cận khu vực giao cắt và truyền thông tin đến thiết bị cảnh báo phải đảm bảo các yêu cầu nghiêm ngặt về độ tin cậy (reliability), tính sẵn sàng (availability) và tính an toàn vận hành (safety). Đây là những yêu cầu cơ bản đối với các hệ thống kỹ thuật liên quan trực tiếp đến an toàn chạy tàu. Do đó, việc lựa chọn giải pháp công nghệ cho hệ thống cảnh báo đường ngang cần xem xét đồng thời các yếu tố về độ tin cậy, chi phí triển khai, khả năng mở rộng và tính phù hợp với điều kiện khai thác của mạng lưới đường sắt [1], [4], [9, 10].

Đối với các hệ thống tín hiệu đường sắt truyền thống, việc phát hiện đoàn tàu thường được thực hiện thông qua các công nghệ dựa trên hạ tầng đường ray như mạch điện đường ray, hoặc bộ đếm trục. Đây là các công nghệ có độ tin cậy cao và được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống tín hiệu đường sắt hiện đại. Tuy nhiên, việc triển khai các hệ thống này đòi hỏi phải lắp đặt thiết bị trực tiếp trên hạ tầng đường ray, kéo theo chi phí đầu tư và bảo trì lớn, đồng thời làm giảm tính linh hoạt khi cần mở rộng hệ thống tại số lượng lớn các đường ngang [6, 7], [10]. Vì vậy, trong bài báo này, thay vì sử dụng các cấu hình phát hiện đoàn tàu phụ thuộc vào hạ tầng đường ray, nhóm tác giả định hướng lựa chọn giải pháp dựa trên thiết bị lắp đặt trên đoàn tàu kết hợp truyền thông vô tuyến để giảm khối lượng thiết bị mặt đất.

Một số hệ thống cảnh báo đường ngang chi phí thấp sử dụng các loại cảm biến như cảm biến từ trường, cảm biến địa chấn, cảm biến quang học hoặc các cảm biến dọc tuyến để phát hiện đoàn tàu. Tuy nhiên, các giải pháp này thường chịu ảnh hưởng đáng kể của điều kiện môi trường khai thác và yêu cầu bài toán hiệu chỉnh, bảo trì hoặc xử lý tín hiệu phù hợp để bảo đảm độ tin cậy vận hành. Vì vậy, các thiết kế cảm biến chi phí thấp thường phù hợp hơn với hệ thống thử nghiệm, hệ thống hỗ trợ giám sát hoặc các ứng dụng chưa đòi hỏi mức an toàn cao như các hệ thống tín hiệu đường sắt chính quy [4], [8], [12].

Những năm gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ định vị vệ tinh, nhiều nghiên cứu đã đề xuất sử dụng Global Navigation Satellite System (GNSS) để xác định vị trí đoàn tàu trong các hệ thống giám sát và bảo đảm an toàn giao thông đường sắt. Các nghiên cứu về hệ thống tín hiệu đường sắt lấy đoàn tàu làm trung tâm cho thấy GNSS có tiềm năng lớn trong cảm nhận trạng thái đoàn tàu, hỗ trợ virtual balise và giảm sự phụ thuộc vào thiết bị phát hiện trên hạ tầng [9–11]. Ngoài ra, công nghệ định vị dựa trên GNSS cũng được xem là một trong những hướng tiếp cận quan trọng trong các hệ thống điều khiển chạy tàu tiên tiến như Positive Train Control (PTC) tại Hoa Kỳ và các kiến trúc ETCS Level 3 trong hệ thống ERTMS của châu Âu [16, 17].

Trên thực tế, công nghệ GNSS đã được ứng dụng hoặc nghiên cứu ứng dụng trong nhiều hệ thống đường sắt hiện đại. Tại Hoa Kỳ, Positive Train Control (PTC) là hệ thống bảo đảm an toàn chạy tàu có sử dụng công nghệ định vị vệ tinh kết hợp với truyền thông vô tuyến; theo Cục Đường sắt Liên bang Hoa Kỳ (FRA), PTC đã được đưa vào khai thác trên toàn bộ 57.536 dặm tuyến bắt buộc từ cuối năm 2020 [16]. Tại châu Âu, các nghiên cứu về ERTMS/ETCS Level 3 và virtual balise cũng đang xem GNSS là một hướng quan trọng nhằm hỗ trợ xác định vị trí đoàn tàu và giảm phụ thuộc vào thiết bị đặt dọc tuyến [10, 11], [17]. Các kết quả này cho thấy GNSS là một nền tảng công nghệ khả thi cho các bài toán giám sát và định vị đoàn tàu, đặc biệt

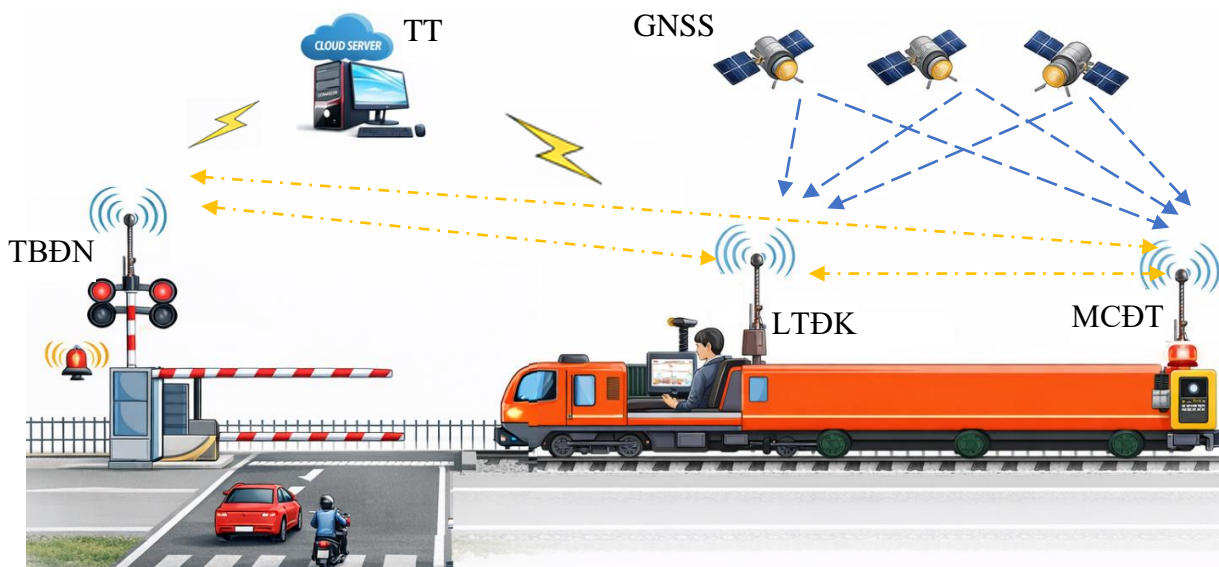
trong các cấu hình hướng tới giảm chi phí hạ tầng.

Bên cạnh việc xác định vị trí đoàn tàu, hệ thống cảnh báo đường ngang tự động cần có cơ chế truyền thông dữ liệu giữa các thiết bị trên đoàn tàu, thiết bị tại đường ngang và trung tâm giám sát. Trong số các công nghệ truyền thông không dây hiện nay, các công nghệ LPWAN (Low Power Wide Area Network) như LoRa được đánh giá là phù hợp với các hệ thống giám sát phân tán nhờ khả năng truyền dữ liệu khoảng cách xa với mức tiêu thụ năng lượng thấp. Các tài liệu kỹ thuật và nghiên cứu gần đây cho thấy LoRa có thể đạt cự ly truyền thông cỡ nhiều kilomet, trong điều kiện thuận lợi có thể lên tới khoảng 15 km [13], [18]. Đặc điểm này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng truyền dữ liệu trạng thái, cảnh báo và giám sát thiết bị trong môi trường đường sắt, nơi lưu lượng dữ liệu không lớn nhưng yêu cầu vùng phủ liên lạc đủ rộng và chi phí triển khai thấp.

Trong lĩnh vực đường sắt, LoRa và các công nghệ LPWAN tương tự đã được nghiên cứu và ứng dụng trong các bài toán giám sát toa xe, giám sát hạ tầng dọc tuyến, giám sát thời tiết khu vực đường sắt và truyền dữ liệu cảnh báo. Một số nghiên cứu cho thấy LoRa có thể duy trì liên lạc ổn định ở quy mô kilomet trong các kịch bản đường sắt và phù hợp cho các hệ thống giám sát phân tán có yêu cầu tiết kiệm năng lượng và chi phí [12, 13], [18, 19]. Kết quả này củng cố cơ sở lựa chọn LoRa làm lớp truyền thông vô tuyến cho mô hình hệ thống được đề xuất trong bài báo.

Trên cơ sở các phân tích trên, giải pháp sử dụng công nghệ GNSS để xác định vị trí đoàn tàu kết hợp với truyền thông LoRa để truyền dữ liệu giữa các thiết bị được đánh giá là phù hợp đối với hệ thống cảnh báo đường ngang tự động tích hợp thiết bị đuôi tàu. Giải pháp này có các ưu điểm chính như: không phụ thuộc vào hạ tầng đường ray, thuận lợi cho triển khai tại số lượng lớn các đường ngang, chi phí hạ tầng thấp hơn các giải pháp phát hiện dựa trên track circuit hoặc axle counter, khả năng mở rộng cao, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi để tích hợp thêm chức năng giám sát trạng thái đoàn tàu và trung tâm giám sát trong tương lai. Ngoài ra, trong nghiên cứu này hệ thống còn được tích hợp chức năng thiết bị tín hiệu đuôi tàu, cho phép xác định chính xác thời điểm toàn bộ đoàn tàu đã rời khỏi khu vực đường ngang. Việc tích hợp này giúp khắc phục hạn chế của các hệ thống cảnh báo hiện có khi phải ước lượng thời gian đoàn tàu đi qua đường ngang, từ đó nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống.

Như vậy, giải pháp sử dụng GNSS kết hợp truyền thông LoRa và tích hợp thiết bị tín hiệu đuôi tàu được lựa chọn cho hệ thống đề xuất trong nghiên cứu này nhằm đáp ứng các yêu cầu về độ tin cậy, tính sẵn sàng, chi phí triển khai và khả năng mở rộng của hệ thống cảnh báo đường ngang đường sắt.



Hình 1. Mô hình tổng quan hệ thống (hình vẽ được hoàn thiện với sự hỗ trợ một phần bởi công cụ AI: chatgpt).

Hình 1 minh họa kiến trúc tổng thể của hệ thống cảnh báo tự động tại đường ngang tích hợp chức năng thiết bị đuôi tàu. Hệ thống gồm bốn thành phần chính: thiết bị đường ngang (TBDN), thiết bị lái tàu điều khiển đặt trên đầu máy (LTĐK), máy chính đuôi tàu (MCĐT) và trung tâm giám sát (TT). Các thiết bị trên đoàn tàu sử dụng tín hiệu định vị vệ tinh GNSS để xác định vị trí và tốc độ của đoàn tàu theo thời gian thực. Thông tin này được truyền đến TBDN thông qua mạng truyền thông vô tuyến LoRa nhằm kích hoạt hệ thống cảnh báo tại đường ngang khi đoàn tàu tiếp cận. Đồng thời, MCĐT cũng truyền thông tin vị trí đến TBDN để xác định chính xác thời điểm đoàn tàu rời khỏi khu vực giao cắt. Dữ liệu từ các thiết bị trong hệ thống được truyền về trung tâm giám sát để phục vụ công tác theo dõi và quản lý vận hành.

2.2. Vai trò và chức năng của các khối trong hệ thống

Hệ thống cảnh báo tự động tại đường ngang tích hợp thiết bị đuôi tàu được xây dựng dựa trên kiến trúc phân tán gồm bốn thành phần chính: Thiết bị đường ngang (TBDN), thiết bị lái tàu điều khiển (LTĐK), máy chính đuôi tàu (MCĐT) và trung tâm giám sát (TT). Các thành phần này phối hợp với nhau thông qua công nghệ định vị vệ tinh GNSS và truyền thông vô tuyến LoRa để đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định và an toàn.

Thiết bị đường ngang (TBDN):

Thiết bị đường ngang được lắp đặt tại khu vực giao cắt đồng mức giữa đường sắt và đường bộ. Đây là khối chức năng chịu trách nhiệm trực tiếp trong việc điều khiển hệ thống cảnh báo giao thông tại đường ngang. TBDN có các chức năng chính gồm:

- Tiếp nhận thông tin vị trí và tốc độ của đoàn tàu từ LTĐK và MCĐT thông qua mạng truyền thông LoRa.
- Xác định khoảng cách giữa đoàn tàu và vị trí đường ngang để kích hoạt hệ thống cảnh báo.
- Điều khiển các thiết bị cảnh báo tại đường ngang như đèn tín hiệu, chuông cảnh báo và hàng rào barie.

- Nhận tín hiệu vị trí từ MCĐT để xác định thời điểm đoàn tàu đã đi qua hoàn toàn khu vực đường ngang và tắt hệ thống cảnh báo.
- Truyền dữ liệu trạng thái hoạt động của hệ thống về trung tâm giám sát.
- Ngoài ra, TBDN còn đóng vai trò là nút giao tiếp giữa hệ thống cảnh báo đường ngang và các thiết bị trên đoàn tàu.

Thiết bị lái tàu điều khiển (LTĐK):

Thiết bị LTĐK được lắp đặt trên đầu máy của đoàn tàu và là nguồn cung cấp thông tin chính về vị trí của đoàn tàu trong quá trình vận hành. Các chức năng chính của LTĐK gồm:

- Thu nhận tín hiệu GNSS để xác định vị trí và tốc độ của đầu tàu theo thời gian thực.
- Truyền dữ liệu vị trí và tốc độ của đoàn tàu đến TBDN để kích hoạt hệ thống cảnh báo khi tàu tiếp cận đường ngang.
- Nhận thông tin trạng thái từ MCĐT nhằm đảm bảo tính toàn vẹn của đoàn tàu.
- Cung cấp thông tin cảnh báo cho lái tàu trong trường hợp hệ thống phát hiện sự cố hoặc có nguy cơ mất an toàn.
- Truyền dữ liệu vận hành của đoàn tàu về trung tâm giám sát để phục vụ công tác quản lý.

Máy chính đuôi tàu (MCĐT):

Máy chính đuôi tàu được lắp đặt tại toa cuối của đoàn tàu và đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống. Các chức năng chính của MCĐT gồm:

- Thu nhận tín hiệu GNSS để xác định vị trí của đuôi đoàn tàu.
- Truyền dữ liệu vị trí và trạng thái hoạt động đến LTĐK trên đầu máy.
- Truyền thông tin vị trí đến TBDN nhằm xác định thời điểm đoàn tàu đã rời khỏi khu vực đường ngang.
- Đóng vai trò như một kênh truyền thông dự phòng trong trường hợp thiết bị LTĐK gặp sự cố.

Việc tích hợp MCĐT giúp hệ thống khắc phục hạn chế của các hệ thống cảnh báo chỉ dựa trên vị trí đầu tàu, đồng thời cho phép tích hợp chức năng cảnh báo đường ngang và thiết bị đuôi tàu trong cùng một hệ thống.

Trung tâm giám sát (TT):

Trung tâm giám sát là thành phần quản lý và giám sát toàn bộ hoạt động của hệ thống. Các chức năng chính của trung tâm giám sát gồm:

- Thu thập và lưu trữ dữ liệu vận hành từ LTĐK, MCĐT và TBDN.
- Theo dõi vị trí của các đoàn tàu theo thời gian thực.
- Giám sát trạng thái hoạt động của hệ thống cảnh báo tại các đường ngang.
- Phát hiện và cảnh báo các sự cố thiết bị.
- Hỗ trợ công tác quản lý, bảo trì và nâng cấp hệ thống.

Thông qua trung tâm giám sát, các đơn vị quản lý có thể thực hiện giám sát tập trung và

nâng cao hiệu quả vận hành của hệ thống.

2.3. Nguyên tắc an toàn của hệ thống

Hệ thống cảnh báo tự động tại đường ngang tích hợp chức năng thiết bị đuôi tàu được thiết kế dựa trên các nguyên tắc an toàn cơ bản của hệ thống tín hiệu đường sắt, bao gồm độ tin cậy (reliability), tính sẵn sàng (availability) và khả năng dự phòng (redundancy). Các nguyên tắc này nhằm đảm bảo hệ thống có thể hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau, đồng thời hạn chế tối đa các nguy cơ gây mất an toàn tại khu vực giao cắt giữa đường sắt và đường bộ.

Trước hết, hệ thống đảm bảo độ tin cậy cao trong việc xác định vị trí đoàn tàu nhờ sử dụng công nghệ định vị vệ tinh GNSS kết hợp với truyền thông vô tuyến LoRa. Các thiết bị lắp đặt trên đoàn tàu gồm thiết bị lái tàu điều khiển (LTĐK) và máy chính đuôi tàu (MCĐT) liên tục thu nhận tín hiệu định vị từ hệ thống vệ tinh để xác định vị trí và tốc độ của đoàn tàu theo thời gian thực. Việc sử dụng đồng thời hai thiết bị định vị tại đầu và cuối đoàn tàu cho phép hệ thống xác định chính xác cả vị trí đầu tàu và đuôi tàu, từ đó nâng cao độ chính xác của hệ thống cảnh báo tại đường ngang.

Thứ hai, hệ thống được thiết kế với kiến trúc truyền thông phân tán, trong đó các thiết bị LTĐK, MCĐT và thiết bị đường ngang (TBĐN) có thể trao đổi thông tin trực tiếp với nhau thông qua mạng truyền thông vô tuyến. Kiến trúc này giúp hệ thống duy trì hoạt động ngay cả khi một trong các thành phần gặp sự cố. Ví dụ, trong trường hợp thiết bị LTĐK trên đầu máy gặp lỗi hoặc mất kết nối, MCĐT vẫn có thể truyền thông tin vị trí của đoàn tàu đến TBĐN để kích hoạt hệ thống cảnh báo tại đường ngang.

Ngoài ra, hệ thống còn được trang bị cơ chế giám sát và chẩn đoán trạng thái thiết bị. Các thông tin về nguồn điện, tín hiệu GNSS, trạng thái truyền thông và hoạt động của các thiết bị cảnh báo được thu thập và truyền về trung tâm giám sát. Nhờ đó, các đơn vị quản lý có thể phát hiện sớm các sự cố và thực hiện các biện pháp khắc phục kịp thời nhằm đảm bảo hệ thống hoạt động liên tục.

Một ưu điểm quan trọng của giải pháp được đề xuất là giảm phụ thuộc vào hạ tầng tín hiệu dọc tuyến so với các phương pháp phát hiện đoàn tàu truyền thống như mạch điện đường ray hoặc bộ đếm trục. Điều này giúp giảm chi phí triển khai và thuận lợi hơn trong việc mở rộng hệ thống đến các đường ngang mới. Như vậy, bằng cách kết hợp công nghệ định vị vệ tinh, truyền thông vô tuyến và kiến trúc hệ thống phân tán, giải pháp đề xuất có thể đảm bảo mức độ an toàn và độ tin cậy cao, đồng thời đáp ứng yêu cầu vận hành thực tế của hệ thống đường sắt

3. MÔ HÌNH TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH TRẠNG THÁI HỆ THỐNG

Để xây dựng cơ chế điều khiển cảnh báo tại đường ngang, bài báo sử dụng thông tin vị trí thu được từ các thiết bị LTĐK và MCĐT thông qua hệ thống định vị vệ tinh GNSS. Dựa trên tọa độ địa lý của LTĐK, MCĐT và thiết bị tại đường ngang (TBĐN), các nhiệm vụ chính của hệ thống bao gồm: (i) xác định vị trí của các thiết bị trên đoàn tàu và tính toán khoảng cách từ chúng đến đường ngang; (ii) ước lượng thời gian đầu tàu đến đường ngang để kích hoạt hệ thống cảnh báo trước thời điểm đoàn tàu tới khu vực giao cắt; (iii) xác định thời điểm kết thúc cảnh báo dựa trên vị trí của MCĐT. Trên cơ sở đó, các biểu thức toán học được thiết lập để mô tả quan hệ giữa vị trí, khoảng cách, tốc độ đoàn tàu và thời điểm điều khiển hệ thống cảnh báo.

Xác định vị trí của LTĐK, MCĐT và khoảng cách đến đường ngang phía trước

Trong hệ thống đề xuất, hai thiết bị lắp đặt trên đoàn tàu gồm LTĐK (thiết bị đầu máy) và MCĐT (thiết bị cuối đoàn tàu) đều được tích hợp module định vị vệ tinh GNSS để xác định vị trí của thiết bị theo thời gian thực. Vị trí của LTĐK, MCĐT, TBĐN được biểu diễn dưới dạng tọa độ địa lý (tọa độ của TBĐN được xác định trước và lưu trữ trong bộ nhớ của LTĐK và MCĐT):

$$P_L = (\varphi_L, \lambda_L) \quad (1)$$

$$P_M = (\varphi_M, \lambda_M) \quad (2)$$

$$P_T = (\varphi_T, \lambda_T) \quad (3)$$

Trong đó:

P_L, P_M, P_T : Tương ứng là tọa độ của LTĐK, MCĐT và TBĐN

$\varphi_L, \varphi_M, \varphi_T$: Tương ứng là vĩ độ của LTĐK, MCĐT và TBĐN

$\lambda_L, \lambda_M, \lambda_T$: Tương ứng là kinh độ của LTĐK, MCĐT và TBĐN

Dựa trên tọa độ GNSS liên tục thu được, LTĐK và MCĐT thực hiện tính toán khoảng cách từ vị trí của mình đến thiết bị tại đường ngang.

Khoảng cách từ LTĐK đến TBĐN:

$$d_L = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_T - \varphi_L}{2} \right) + \cos(\varphi_L) \cos(\varphi_T) \sin^2 \left(\frac{\varphi_T - \varphi_L}{2} \right)} \right) \quad (4)$$

Khoảng cách từ MCĐT đến TBĐN:

$$d_M = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_T - \varphi_M}{2} \right) + \cos(\varphi_M) \cos(\varphi_T) \sin^2 \left(\frac{\varphi_T - \varphi_M}{2} \right)} \right) \quad (5)$$

Trong đó:

R : bán kính trung bình của trái đất

d_L và d_M : lần lượt là khoảng cách từ LTĐK và MCĐT đến TBĐN.

Xác định thời gian tàu đến đường ngang

Từ khoảng cách d_L giữa LTĐK và TBĐN đã tính được, thời gian dự kiến để đầu tàu đến đường ngang được xác định theo tốc độ hiện thời của LTĐK. Gọi v_L là tốc độ của LTĐK, khi đó:

$$T_{den} = \frac{d_L}{v_L} \quad (6)$$

Trong đó:

T_{den} : thời gian đầu tàu đến đường ngang

v_L : tốc độ của LTĐK.

Để thống nhất đơn vị, nếu d_L tính theo mét thì v_L phải tính theo m/s. Trường hợp tốc độ đo

được theo km/h thì đổi về m/s theo:

$$v_L' = \frac{v_L}{3.6} \quad (7)$$

Khi đó

$$T_{den} = \frac{d_L}{v_L'} \quad (8)$$

Theo yêu cầu khai thác, hệ thống cảnh báo tại đường ngang phải được kích hoạt trước khi đoàn tàu đến đường ngang 70 giây. Do đó, điều kiện kích hoạt cảnh báo là: $T_{den} \leq 70$, hay tương đương: $d_L \leq 70v_L'$, khi điều kiện này thỏa mãn, TĐN thực hiện bật đèn cảnh báo, phát chuông và hạ cần chắn.

Xác định thời điểm tắt cảnh báo

Sau khi đầu tàu đi qua đường ngang, hệ thống vẫn phải duy trì cảnh báo cho đến khi toàn bộ đoàn tàu ra khỏi khu vực giao cắt. Để thực hiện điều này, sử dụng vị trí của MCĐT để tính khoảng cách d_M từ đuôi tàu đến TĐN.

Khi MCĐT đi qua khu vực đường ngang, khoảng cách d_M tiến tới giá trị rất nhỏ. Do đó, điều kiện tắt cảnh báo được xác định là: $d_M \leq d_{off}$ (d_M là khoảng cách từ MCĐT đến TĐN, d_{off} là ngưỡng kết thúc cảnh báo, là một giá trị nhỏ được chọn trước để bù sai số định vị). Khi điều kiện trên thỏa mãn, hệ thống xác định đuôi tàu đã đi qua đường ngang, từ đó TĐN thực hiện: tắt đèn cảnh báo, tắt chuông, nâng cần chắn.

Trong thực tế, để tăng độ tin cậy, có thể kết hợp thêm điều kiện khoảng cách bắt đầu tăng trở lại sau khi MCĐT đi qua đường ngang, tức là:

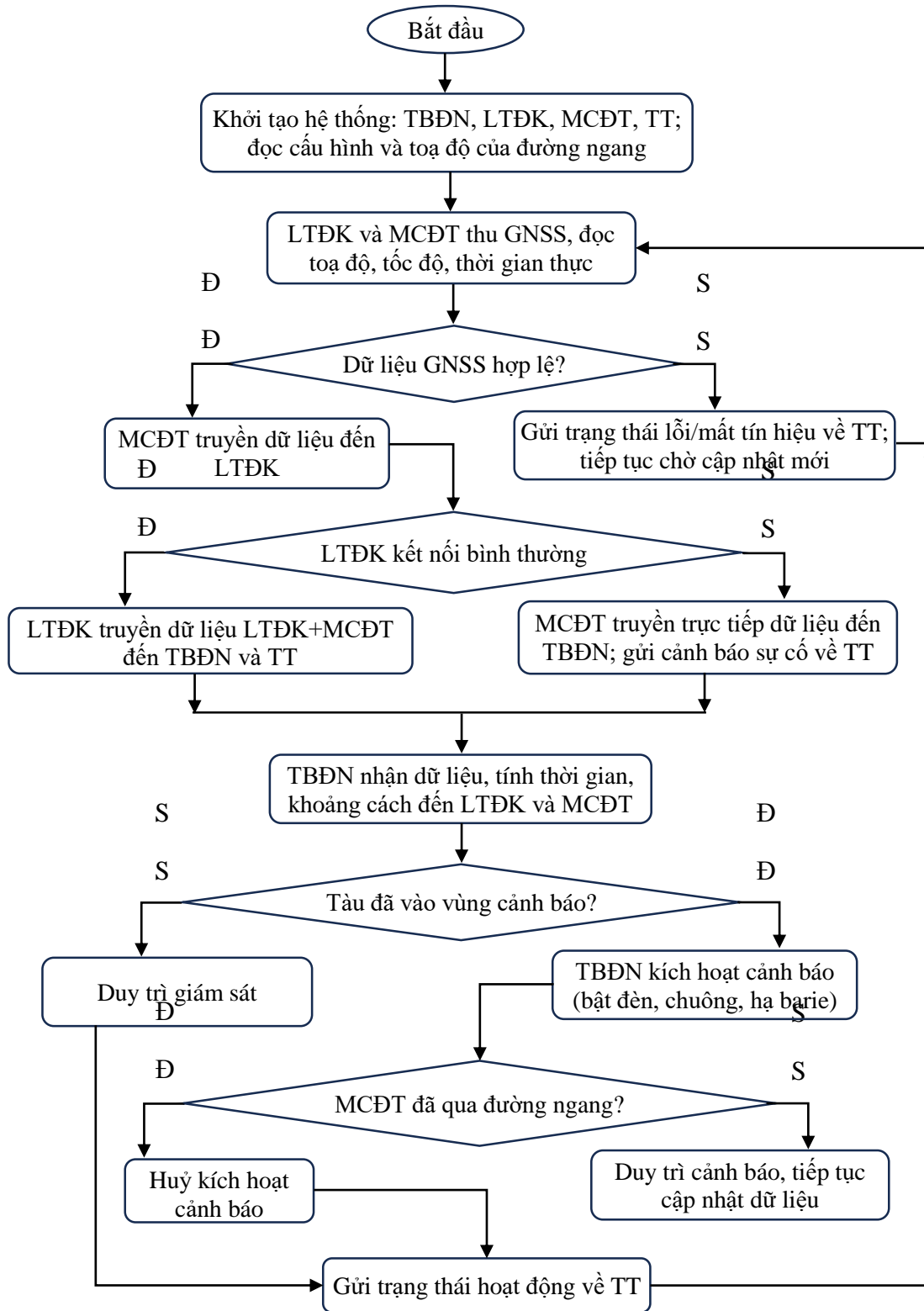
$$\begin{cases} d_M(k) \leq d_{off} \\ d_M(k+1) > d_M(k) \end{cases} \quad (9)$$

Điều kiện này giúp tránh tắt cảnh báo sớm do sai số GNSS.

4. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN, THIẾT KẾ PHẦN CỨNG VÀ THỬ NGHIỆM

4.1. Thuật toán của hệ thống

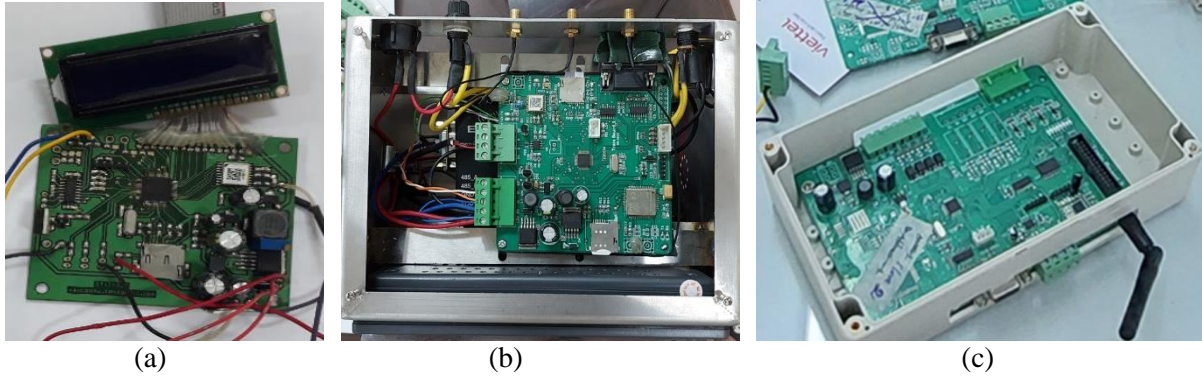
Trên cơ sở mô hình tổng quan và các biểu thức toán học đã thiết lập, thuật toán điều khiển được xây dựng nhằm tối ưu hóa khả năng tương tác đa chiều giữa các thiết bị LTĐK, MCĐT và TĐN thông qua mạng vô tuyến LoRa, đồng thời duy trì kết nối đồng bộ với trung tâm giám sát (TT) qua mạng viễn thông di động. Quy trình này đảm bảo tính logic và độ tin cậy trong việc xác nhận trạng thái hệ thống, cho phép kích hoạt hoặc kết thúc cảnh báo một cách chính xác dựa trên vị trí thực tế của đầu và đuôi đoàn tàu. Đồng thời, giải pháp này hỗ trợ giám sát toàn diện trạng thái vận hành của hệ thống theo thời gian thực, đảm bảo tính minh bạch và an toàn như được mô tả chi tiết tại lưu đồ Hình 2.



Hình 2. Lưu đồ thuật toán.

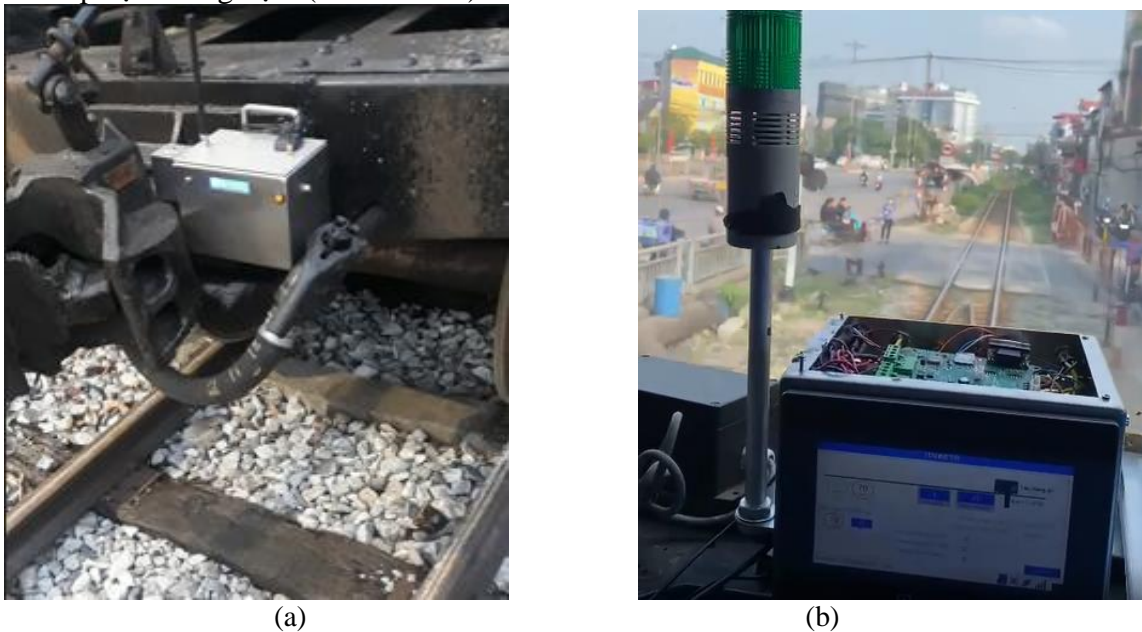
4.2. Thiết kế phần cứng và thử nghiệm

- Mạch điện thiết bị MCĐT, LTĐK và MCĐT (xem Hình 3):



Hình 3. Mạch điện MCĐT (a), LTĐK (b), TBĐN (c).

- Lắp đặt thử nghiệm (xem Hình 4):

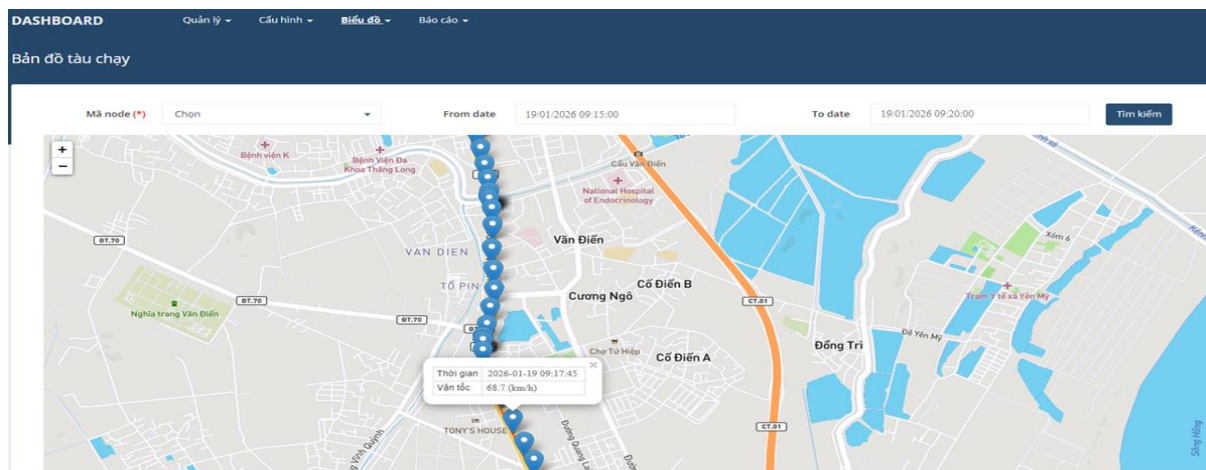


Hình 4. Thiết bị MCĐT (a), thiết bị LTĐK (b) được lắp đặt trên đoàn tàu.

Bảng 1. Giao diện giám sát trạng thái vị trí, tốc độ đoàn tàu và hoạt động của TBĐN.

TIMESTAMP	Mã tàu	Vĩ độ	Kinh độ	Vận tốc (km/h)	Mã đường ngang 1	Trạng thái kết nối đường ngang 1	Mã đường ngang 2	Trạng thái kết nối đường ngang 2
2026-01-19 17:06:41	VN0001	20,7	105,9	54,6	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:06:31	VN0001	20,7	105,9	54,9	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:06:21	VN0001	20,7	105,9	55,1	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:06:11	VN0001	20,6	105,9	55,3	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:06:01	VN0001	20,6	105,9	55,7	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:05:51	VN0001	20,6	105,9	55,6	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:05:41	VN0001	20,6	105,9	55,6	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:05:31	VN0001	20,6	105,9	55,6	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo
2026-01-19 17:05:21	VN0001	20,6	105,9	55,6	11+850	Cảnh báo	11+270	Cảnh báo

- Giao diện giám sát trạng thái vị trí, tốc độ đoàn tàu và hoạt động của TBĐN. được trình bày ở Bảng 1. Giao diện giám sát hành trình của đoàn tàu được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Giao diện giám sát hành trình của đoàn tàu.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất và hiện thực hóa thành công giải pháp tích hợp hệ thống cảnh báo tự động tại đường ngang với thiết bị tín hiệu đuôi tàu (EOT) trên một nền tảng công nghệ thống nhất. Qua quá trình triển khai từ lý thuyết, mô hình toán học đến thực nghiệm, nghiên cứu rút ra các kết luận trọng tâm sau:

Tính mới trong kiến trúc hệ thống: Khác với các hệ thống truyền thống thường tách rời hai chức năng cảnh báo đường ngang và giám sát đuôi tàu, nghiên cứu này đã hợp nhất dữ liệu vị trí đầu tàu - đuôi tàu - đường ngang – trung tâm. Việc sử dụng kiến trúc phân tán dựa trên công nghệ GNSS và truyền thông vô tuyến tầm xa LoRa giúp tối ưu hóa tài nguyên phần cứng, giảm sự phụ thuộc vào hạ tầng dọc tuyến và hạ thấp chi phí đầu tư.

Nâng cao độ chính xác và an toàn vận hành: Đóng góp quan trọng nhất của nghiên cứu là xác định thời điểm kết thúc cảnh báo dựa trên vị trí thực tế của đuôi tàu thay vì các phương pháp ước lượng thời gian truyền thông. Điều này giải quyết triệt để bài toán tắt cảnh báo sai thời điểm, giúp tối ưu hóa dòng lưu thông đường bộ và nâng cao độ tin cậy an toàn tại các điểm giao cắt.

Giá trị thực tiễn và triển vọng: Giải pháp mang tính đột phá về chi phí và khả năng triển khai linh hoạt. Kết quả thực nghiệm thành công là cơ sở vững chắc để phát triển hệ thống thành sản phẩm thương mại, hướng tới ứng dụng rộng rãi nhằm hiện thực hóa các giải pháp an toàn đường sắt thông minh và hiệu quả trong tương lai.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn Công ty Cổ phần Thông tin tín hiệu đường sắt Hà Nội và Trung tâm KHCN – Trường Đại học Giao thông vận tải đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. G.J.M. Read, J.A. Cox, A. Hulme, A. Naweed, P.M. Salmon, What factors influence risk at rail level crossings? A systematic review and synthesis of findings using systems thinking, *Safety Science*, 138 (2021) 105207. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207>
- [2]. J. Strohmmandl, P. Tomášek, M. Tomek, D. Vičar, J. Rak, R. Novák, Traffic safety at level

- crossings in the Czech Republic, *Heliyon*, 10 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39739>
- [3]. A. Anagnostopoulos, Assessing Safety and Infrastructure Design at Railway Level Crossings Through Microsimulation Analysis, *Future Transp*, 5 (2025). <https://doi.org/10.3390/futuretransp5010024>
- [4]. A. Di Graziano, V. Marchetta, Application of a Quantitative Risk-Based Decision Tool for Local Railway Level Crossing Management, *Applied Sciences*, 14 (2024) 8630. <https://doi.org/10.3390/app14198630>
- [5]. Cồ Như Văn, Nghiên cứu thiết kế an toàn cho hệ thống cảnh báo đường ngang tự động ứng dụng công nghệ tiên tiến, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam – B*, 66 (2024) 51-57. [https://doi.org/10.31276/VJST.66\(6\).51-57](https://doi.org/10.31276/VJST.66(6).51-57)
- [6]. Nguyễn Đức Toàn, Phạm Xuân Thắng, Đỗ Đức Tuấn, Nghiên cứu thiết kế, chế tạo hệ thống thiết bị phòng vệ đường ngang cảnh báo tự động có chấn sử dụng radar phát hiện đoàn tàu, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 73 (2022) 327–343. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.3.10>
- [7]. Nguyễn Thanh Hải, Đặng Quang Thạch, Cồ Như Văn, Trần Văn Khuyến, Thiết kế chế tạo thiết bị đếm trục sử dụng phương pháp cảm ứng điện từ, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 72 (2021) 1118–1130. <https://doi.org/10.47869/tcsj.72.9.10>
- [8]. L. De Donato, S. Marrone, F. Flammini, C. Sansone, V. Vittorini, R. Nardone, C. Mazzariello, F. Bernaudin, Intelligent detection of warning bells at level crossings through deep transfer learning for smarter railway maintenance, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123 (2023) 106405. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106405>
- [9]. B. Cai, J. Liu, X. Dong, J. Liu, Study on key technologies of GNSS-based train state perception for train-centric railway signaling, *High-speed Railway*, 1 (2023) 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2022.12.003>
- [10]. M. Chrzan, T. Ciszewski, W. Nowakowski, Selected applications of satellite technologies in rail transport, *Archives of Transport*, 71 (2024) 91–105. <https://doi.org/10.61089/aot2024.z1bfx011>
- [11]. S.-Q. Wang, J. Liu, B.-G. Cai, J. Wang, D.-B. Lu, Virtual balise placement for GNSS-based train control using aquila optimization-enhanced multi-objective optimization, *Expert Systems with Applications*, 273 (2025) 126644. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126644>
- [12]. D. Zorbas, M. Baizhuminova, D. Urazayev, A. Eduard, G. Nurgazina, N. Atymtay, M. Ristin, Cost-Effective Train Presence Detection and Alerting Using Resource-Constrained Devices, *Sensors*, 25 (2025) 6045. <https://doi.org/10.3390/s25196045>
- [13]. Cồ Như Văn, Đỗ Việt Hà, Nguyễn Thanh Hải, Ước lượng cự ly truyền dẫn trong mạng LoRa hai chặng dưới ảnh hưởng của nhiễu giữa các thiết bị đầu cuối, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 72 (2021) 264–276. <https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.3>
- [14]. G. Duan, D. Lu, H. Dong, B. Cai, J. Liu, GNSS-based End-of-Train Device Performance Evaluation and Improvement by Means of Particle Filter Algorithm, *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2022, 101–107. <https://doi.org/10.1109/ICEAA49419.2022.9899946>
- [15]. Cồ Như Văn, Nghiên cứu thiết kế, chế tạo thiết bị tín hiệu đuôi tàu sử dụng trên tàu chở hàng trên đường sắt Việt Nam, *Tạp chí Khoa học GTVT*, 61 (2017).
- [16]. Federal Railroad Administration (FRA), Positive Train Control (PTC), U.S. Department of Transportation, 2023.
- [17]. O. Himrane, J. Beugin, M. Ghazel, Implementation of a Model-Oriented Approach for Supporting Safe Integration of GNSS-Based Virtual Balises in ERTMS/ETCS Level 3, *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2023. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2023.3267142>
- [18]. Semtech Corporation, LoRa and LoRaWAN, Version 1.0 (2024).
- [19]. Y. Chen, G. Shi, M. Al-Quraan, Y. Sambo, O. Onireti, M. Imran, LoRa Mesh-5G Integrated Network for Trackside Smart Weather Monitoring, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3361160>