



DOI:10.22144/ctujos.2026.099

TỔNG QUAN CÓ HỆ THỐNG CÁC PHƯƠNG PHÁP BẢO DƯỠNG TRỤ THU PHÁT SÓNG THÔNG TIN DI ĐỘNG

Lư Tất Thắng^{1,2}, Nguyễn Hoàng Dũng¹ và Trương Quốc Bảo^{1*}

¹Khoa Tự động hóa, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Viễn thông Đồng Tháp, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tqbao@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 10/03/2026

Sửa bài (Revised): 13/04/2026

Duyệt đăng (Accepted): 20/05/2026

Title: A Systematic Review of Maintenance Methods for Mobile Communication Towers

Author(s): Lu Tat Thang^{1,2}, Nguyen Hoang Dung¹ and Truong Quoc Bao^{1*}

Affiliation(s): ¹Faculty of Automation Technology, Can Tho University, Viet Nam; ²Vietnam Posts and Telecommunications Group Dong Thap, Viet Nam

TÓM TẮT

Việc bảo dưỡng trụ thu phát sóng thông tin di động là yêu cầu thiết yếu để đảm bảo tính liên tục và chất lượng hạ tầng viễn thông. Trong bài báo này, một tổng quan có hệ thống các phương pháp bảo dưỡng trụ viễn thông đã được trình bày theo hướng dẫn PRISMA 2020. Tài liệu được thu thập từ IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink và Google Scholar giai đoạn 2015–2025. Sau sàng lọc, [N=42] tài liệu được chọn, phân loại thành bốn nhóm: kiểm tra thủ công, giám sát sức khỏe kết cấu, kiểm tra bằng thiết bị bay không người lái (UAV) và phát hiện hư hỏng dựa trên học sâu. Kết quả cho thấy các phương pháp truyền thống còn hạn chế về hiệu quả và mở rộng, trong khi tích hợp UAV với trí tuệ nhân tạo thể hiện tiềm năng rõ rệt trong phát hiện ăn mòn, bong tróc lớp phủ và biến dạng kết cấu. Bên cạnh đó, nghiên cứu xác định các khoảng trống về bộ dữ liệu chuyên biệt, khung pháp lý cho UAV tại Việt Nam và triển khai thực tế, định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: Bảo dưỡng trụ viễn thông, giám sát sức khỏe kết cấu, học sâu, phát hiện hư hỏng, thiết bị bay không người lái, tổng quan có hệ thống

ABSTRACT

Maintenance of mobile telecommunication towers is essential for ensuring the continuity and quality of telecommunication infrastructure. This paper presents a systematic review of maintenance methods for telecommunication towers, conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines. Relevant literature was retrieved from IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar, covering the period 2015–2025. Following a structured screening process, [N=42] studies were selected and classified into four categories: manual inspection, structural health monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV)-based inspection, and deep learning-based defect detection. The findings indicate that conventional methods remain limited in efficiency and scalability, whereas the integration of UAVs with artificial intelligence demonstrates clear potential for automated detection of corrosion, coating degradation, and structural deformation. The review also identifies key research gaps concerning domain-specific datasets, the regulatory framework for UAV operations in Vietnam, and real-world deployment, thereby outlining directions for future research.

Keywords: Deep learning, defect detection, structural health monitoring, systematic review, telecommunication tower maintenance, unmanned aerial vehicle

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh chuyển đổi số và sự phát triển mạnh mẽ của hạ tầng viễn thông, các trụ thu phát sóng thông tin di động đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo vùng phủ sóng, chất lượng dịch vụ và tính liên tục của mạng lưới. Theo thống kê của Liên minh Viễn thông Quốc tế (International Telecommunication Union – ITU), số lượng trạm thu phát sóng di động toàn cầu tiếp tục tăng mạnh trong giai đoạn triển khai 5G, điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về công tác bảo dưỡng và kiểm tra định kỳ nhằm duy trì hiệu suất vận hành và giảm thiểu gián đoạn dịch vụ (ITU, 2021).

Các phương pháp bảo dưỡng truyền thống chủ yếu dựa vào kiểm tra thủ công, đòi hỏi nhiều nhân lực, chi phí cao và tiềm ẩn rủi ro an toàn lao động, đặc biệt trong điều kiện làm việc trên cao hoặc tại các khu vực khó tiếp cận (Al-Khateeb et al., 2022; Pomarnacki et al., 2025). Ngoài ra, số lượng trạm viễn thông ngày càng tăng làm cho phương pháp kiểm tra thủ công trở nên khó mở rộng về quy mô và khó đảm bảo tính nhất quán trong đánh giá.

Trong những năm gần đây, kết quả nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc ứng dụng thiết bị bay không người lái (UAV) có thể cải thiện đáng kể hiệu quả kiểm tra, giảm chi phí và nâng cao mức độ an toàn so với phương pháp truyền thống (Rakha & Gorodetsky, 2018; Greenwood et al., 2019; Shakhatreh et al., 2019; Mendu & Mbuli, 2025). Bên cạnh đó, sự phát triển của trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI), đặc biệt là các mô hình học sâu, đã mở ra khả năng tự động hóa quá trình phát hiện và đánh giá hư hỏng kết cấu từ dữ liệu hình ảnh. Kết quả các nghiên cứu gần đây cho thấy việc kết hợp UAV với các mô hình học sâu có thể hỗ trợ phát hiện các dạng hư hỏng như ăn mòn, bong tróc lớp phủ và biến dạng kết cấu với độ chính xác cao (Savino & Tondolo, 2025; Pomarnacki et al., 2025; Tang & Yang, 2025).

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến kiểm tra và giám sát kết cấu sử dụng UAV và AI được thực hiện; tuy nhiên, phần lớn việc các nghiên cứu tổng quan hiện nay khi được tiến hành còn tập trung vào các công trình hạ tầng dân dụng như cầu, nhà cao tầng và đường dây truyền tải điện (Koch et al., 2015; Spencer et al., 2019; Lyu et al., 2025). Trong khi đó, trụ viễn thông có những đặc thù riêng về chiều cao, môi trường vận hành, nhiễu điện từ và phân bố địa lý, dẫn đến các yêu cầu khác biệt trong công tác bảo dưỡng mà các tổng quan hiện có chưa đề cập đầy đủ.

Ngoài ra, các phương pháp hiện có thường được nghiên cứu riêng lẻ, thiếu các phân tích tổng hợp và so sánh trong một khung đánh giá thống nhất. Đồng thời, việc triển khai các công nghệ mới như UAV trong thực tế còn chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố như quy định pháp lý, khả năng tích hợp hệ thống và điều kiện vận hành, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam chưa có hướng dẫn chuyên biệt cho ứng dụng UAV trong bảo dưỡng hạ tầng viễn thông (Shakhatreh et al., 2019; Quốc hội Việt Nam, 2024).

Do đó, bài báo này thực hiện một tổng quan có hệ thống về các phương pháp bảo dưỡng trụ thu phát sóng thông tin di động, nhằm: (i) phân loại và phân tích các phương pháp hiện có, bao gồm kiểm tra thủ công, giám sát sức khỏe kết cấu, kiểm tra bằng UAV và các phương pháp dựa trên AI; (ii) so sánh các phương pháp theo các tiêu chí thống nhất về chi phí, độ chính xác, mức độ tự động hóa và khả năng triển khai và (iii) xác định các khoảng trống nghiên cứu và đề xuất định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo. Phần tiếp theo trình bày phạm vi nghiên cứu và phương pháp tổng quan.

2. PHẠM VI VÀ PHƯƠNG PHÁP TỔNG QUAN

Trong nghiên cứu này, phương pháp tổng quan có hệ thống đã được áp dụng nhằm đảm bảo tính minh bạch, khả năng tái lập và độ tin cậy của kết quả phân tích. Quy trình tổng quan được xây dựng theo hướng dẫn báo cáo PRISMA 2020 (Page et al., 2021) và các nguyên tắc tổng quan học thuật (Snyder, 2019).

2.1. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tập trung vào các phương pháp bảo dưỡng và kiểm tra trụ thu phát sóng thông tin di động, bao gồm cả phương pháp truyền thống và hiện đại. Cụ thể, bốn nhóm phương pháp được xem xét gồm: (i) kiểm tra thủ công, (ii) giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring – SHM), (iii) kiểm tra bằng thiết bị bay không người lái (UAV) và (iv) các phương pháp phát hiện hư hỏng dựa trên AI, đặc biệt là học sâu. Bên cạnh đó, các yếu tố liên quan đến khả năng triển khai thực tế cũng đã được xem xét, bao gồm điều kiện môi trường, yêu cầu kỹ thuật và các ràng buộc pháp lý, nhằm đảm bảo tính ứng dụng của kết quả tổng quan.

Kết quả các nghiên cứu về hạ tầng dân dụng như cầu, nhà cao tầng và đường dây truyền tải điện được đưa vào xem xét khi phương pháp áp dụng có khả năng chuyển giao trực tiếp sang bối cảnh trụ viễn thông. Kết quả các nghiên cứu tập trung thuần túy

vào tối ưu hóa hiệu năng mạng, quy hoạch tần số hoặc quản lý vô tuyến được loại trừ khỏi phạm vi tổng quan.

2.2. Nguồn dữ liệu và chiến lược tìm kiếm

Tài liệu được thu thập từ bốn cơ sở dữ liệu khoa học uy tín gồm IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink và Google Scholar. Chiến lược tìm kiếm được xây dựng dựa trên sự kết hợp các từ khóa chính và bộ trợ như trình bày trong Bảng 1, các toán tử logic AND và OR được sử dụng để mở rộng hoặc thu hẹp phạm vi tìm kiếm khi cần thiết.

Khung thời gian tìm kiếm được giới hạn từ năm 2015 đến năm 2025, trong đó các nghiên cứu được công bố từ năm 2022 trở lại được ưu tiên phân tích sâu nhằm phản ánh xu hướng công nghệ mới nhất về UAV và học sâu. Các tiêu chuẩn kỹ thuật, quy chuẩn quốc gia, văn bản pháp quy có giá trị hiệu lực liên tục, cũng như một số tài liệu nền tảng có tính kinh điển trong lĩnh vực giám sát sức khỏe kết cấu, vẫn được đưa vào tổng quan ngay cả khi ban hành trước năm 2015 nhằm đảm bảo tính chuẩn tắc của các luận điểm về khung pháp lý, kỹ thuật và lý thuyết nền. Việc tìm kiếm ban đầu thu được tổng cộng [N = 153] bản ghi trước khi sàng lọc.

Bảng 1. Từ khóa tìm kiếm theo nhóm chủ đề

Nhóm chủ đề	Từ khóa
Đối tượng công trình	"telecommunication tower", "communication tower", "lattice tower", "monopole tower", "BTS tower"
Phương pháp kiểm tra	"inspection", "maintenance", "monitoring", "structural health monitoring"
Công nghệ hỗ trợ	"UAV", "unmanned aerial vehicle", "drone", "deep learning", "artificial intelligence", "convolutional neural network"
Loại hư hỏng	"corrosion detection", "defect detection", "crack detection", "damage assessment"

2.3. Tiêu chí lựa chọn và loại trừ

Tiêu chí lựa chọn và loại trừ được xác định trước khi tiến hành tìm kiếm, nhằm hạn chế sai lệch trong

lựa chọn. Các tài liệu được đưa vào nếu đáp ứng đồng thời các điều kiện sau: (i) có nội dung liên quan đến kiểm tra, bảo dưỡng hoặc giám sát kết cấu công trình; (ii) có áp dụng ít nhất một trong các phương pháp UAV, SHM hoặc AI; (iii) có khả năng áp dụng cho các kết cấu dạng trụ hoặc tương tự trụ viển thông và (iv) được công bố trên tạp chí có bình duyệt, hội nghị quốc tế uy tín hoặc văn bản tiêu chuẩn/quy chuẩn kỹ thuật chính thức.

Các tài liệu bị loại trừ nếu thuộc một trong các trường hợp: (i) không có nội dung kỹ thuật rõ ràng hoặc chỉ là tóm tắt hội nghị ngắn dưới 4 trang, (ii) nội dung không thuộc phạm vi bốn nhóm phương pháp đã xác định, (iii) trùng lặp với tài liệu đã được chọn hoặc (iv) không có toàn văn.

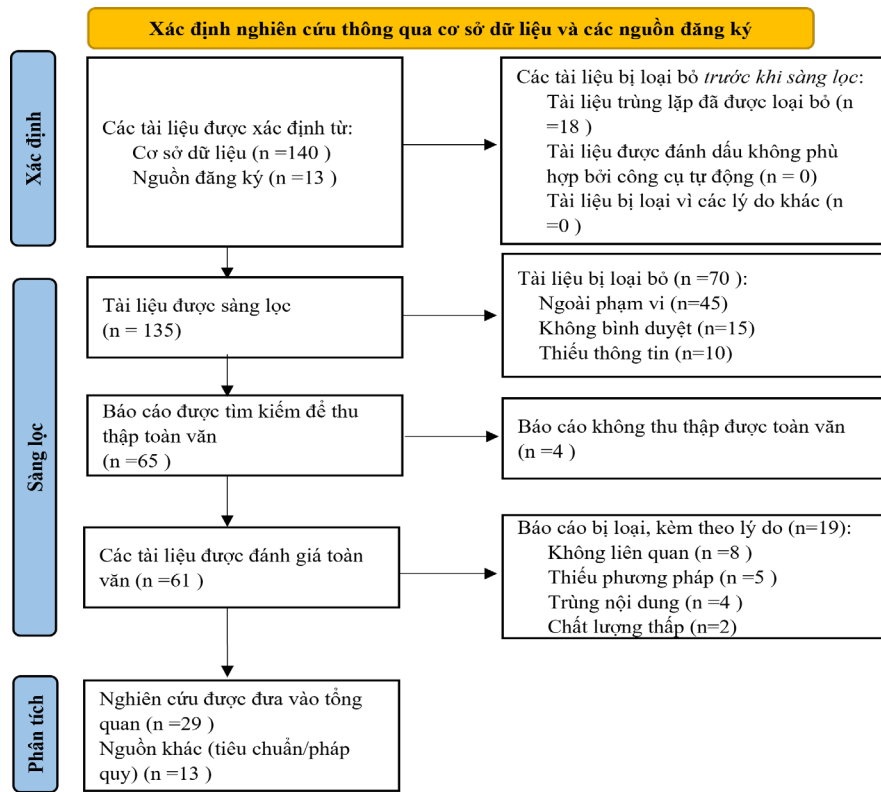
2.4. Quy trình sàng lọc tài liệu

Quy trình sàng lọc được thực hiện theo ba giai đoạn chính theo mô hình PRISMA 2020 (Page et al., 2021), được minh họa trong Hình 1.

Giai đoạn 1 - xác định: 140 bản ghi đã được thu thông qua việc tìm kiếm từ các cơ sở dữ liệu, kết hợp với 13 tài liệu từ các nguồn đăng ký bổ sung (tiêu chuẩn kỹ thuật, quy chuẩn, văn bản pháp quy và tài liệu phương pháp luận tổng quan), tổng cộng 153 bản ghi. Trước khi sàng lọc, 18 bản ghi trùng lặp đã được loại bỏ; không có bản ghi nào bị loại bởi công cụ tự động hoặc các lý do khác, còn lại 135 bản ghi được đưa vào sàng lọc.

Giai đoạn 2 - sàng lọc: Trong số 135 bản ghi, 70 bản ghi bị loại bỏ sau khi đánh giá tiêu đề và tóm tắt do không đáp ứng tiêu chí liên quan, còn lại 65 bản ghi được tìm kiếm để thu thập toàn văn. Trong số này, 4 bản ghi không thu thập được toàn văn và bị loại, còn 61 bản ghi được tiến hành đánh giá toàn văn. Sau đánh giá toàn văn, 19 bản ghi bị loại với các lý do cụ thể: không liên quan (n = 8), thiếu phương pháp (n = 5), trùng nội dung (n = 4) và chất lượng thấp (n = 2).

Giai đoạn 3 - phân tích: Tổng cộng 42 tài liệu được đưa vào tổng quan, bao gồm 29 nghiên cứu từ cơ sở dữ liệu và 13 tài liệu từ nguồn tiêu chuẩn/pháp quy/phương pháp luận.



Hình 1. Sơ đồ PRISMA minh họa quy trình thu thập, sàng lọc và lựa chọn tài liệu trong nghiên cứu tổng quan có hệ thống.

2.5. Phương pháp phân loại và tổng hợp

Sau khi lựa chọn, các tài liệu được phân loại theo bốn nhóm phương pháp bảo dưỡng đã xác định tại mục 2.1. Mỗi nhóm được phân tích theo các tiêu chí thống nhất gồm: nguyên lý hoạt động, ưu điểm, hạn chế, chi phí triển khai và khả năng ứng dụng thực tế.

Việc đánh giá được thực hiện theo phương pháp định tính có cấu trúc: các mức thấp, trung bình và cao phản ánh xu hướng chung được tổng hợp từ các nghiên cứu đã công bố, không phải các ngưỡng số tuyệt đối. Định nghĩa cụ thể của từng mức được trình bày trong chú thích Bảng 2 tại mục 5. Trên cơ sở phân tích từng nhóm, việc tổng hợp phê bình đã được tiến hành nhằm làm rõ sự khác biệt giữa các phương pháp, xu hướng tích hợp UAV-AI và các khoảng trống nghiên cứu còn tồn tại trong lĩnh vực bảo dưỡng trụ viễn thông cũng đã được xác định.

3. ĐẶC ĐIỂM CỦA TRỤ THU PHÁT SÓNG THÔNG TIN DI ĐỘNG

Trụ thu phát sóng thông tin di động là một dạng kết cấu đặc thù, có nhiều khác biệt so với các công trình hạ tầng dân dụng như cầu, nhà cao tầng hoặc đường dây truyền tải điện. Những đặc điểm này ảnh

hưởng trực tiếp đến phương pháp kiểm tra, bảo dưỡng cũng như khả năng ứng dụng các công nghệ hiện đại trong thực tế. Hình 2 minh họa một trụ thu phát sóng điển hình trong điều kiện vận hành thực tế tại Đồng Tháp.



Hình 2. Toàn cảnh vị trí trụ phát sóng và khu vực xung quanh (VNPT Đồng Tháp, 2024)

3.1. Đặc điểm kết cấu và vận hành

Trụ viễn thông thường có chiều cao lớn, dao động từ 30 m đến 80 m hoặc hơn, với hai dạng kết cấu phổ biến là khung thép dạng dầm (lattice tower) và cột đơn (monopole), được thiết kế theo tiêu chuẩn ANSI/TIA-222 (Telecommunications Industry Association, 2022) hoặc các tiêu chuẩn khu vực tương đương. Khác với trụ điện truyền tải (thường cao 20 – 50 m, không mang thiết bị phát sóng tích hợp) hay các kết cấu dân dụng như cầu và nhà cao tầng (có hình học ngang hoặc phức hợp, thường được phép ngừng khai thác tạm thời trong quá trình kiểm tra), trụ viễn thông có hình học dạng dầm thép thẳng đứng với mật độ mối nối cao, phải duy trì hoạt động liên tục và không thể ngừng phát sóng trong suốt quá trình kiểm tra bảo dưỡng — tạo ra các yêu cầu kỹ thuật và vận hành đặc thù mà các phương pháp phát triển cho hạ tầng dân dụng không thể áp dụng trực tiếp (Al-Khateeb et al., 2022; Pomarnacki et al., 2025). Chiều cao lớn làm gia tăng tải trọng do gió và tác động môi trường, đồng thời khiến công tác kiểm tra thủ công trở nên khó khăn và tiềm ẩn rủi ro an toàn lao động nghiêm trọng.

Trụ viễn thông hoạt động trong môi trường có cường độ bức xạ điện từ cao do sự hiện diện của các thiết bị phát sóng. Mức phơi nhiễm trường điện từ xung quanh khu vực anten thường được kiểm soát theo hướng dẫn của Ủy ban Quốc tế về Bảo vệ Bức xạ Không ion hóa (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2020). Cường độ trường cao có thể ảnh hưởng đến các thiết bị đo lường, cảm biến và hệ thống thu thập dữ liệu, đặc biệt trong các hệ thống SHM, đồng thời tạo ra nhiễu tín hiệu điều khiển UAV trong quá trình kiểm tra trực quan, đòi hỏi các giải pháp kỹ thuật phù hợp để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu (Farrar & Worden, 2007; Spencer et al., 2019; Farrar et al., 2025).

3.2. Phân bố địa lý và điều kiện tiếp cận

Các trạm viễn thông thường phân bố rộng trên phạm vi địa lý lớn, bao gồm cả khu vực đô thị, nông thôn và vùng sâu, vùng xa. Sự phân tán này làm tăng chi phí và độ phức tạp trong công tác bảo dưỡng, đặc biệt khi áp dụng các phương pháp kiểm tra truyền thống đòi hỏi nhân viên kỹ thuật có mặt trực tiếp tại hiện trường. Trong bối cảnh đó, các giải pháp sử dụng UAV được xem là có tiềm năng nhằm giảm chi phí di chuyển và tăng khả năng tiếp cận (Rakha & Gorodetsky, 2018; Shakhatreh et al., 2019; Mendu & Mbuli, 2025).

3.3. Các dạng hư hỏng điển hình và điều kiện môi trường

Các trụ viễn thông thường gặp các dạng suy giảm kết cấu như ăn mòn kim loại, bong tróc lớp sơn phủ bảo vệ, nứt hoặc biến dạng cấu kiện do tác động lâu dài của tải trọng và thời tiết. Các dạng hư hỏng này thường phân bố không đồng đều và khó phát hiện bằng quan sát trực tiếp, đặc biệt ở các vị trí cao hoặc khuất (Yeum & Dyke, 2015; Zhao et al., 2019; Sun et al., 2020; Dong & Catbas, 2021).

Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của Việt Nam, phần lớn các khu vực triển khai trạm viễn thông thuộc phân loại môi trường C3–C5 theo ISO (International Organization for Standardization) 9223 (ISO, 2012), tức là mức ăn mòn từ trung bình đến rất cao đối với thép. Lớp phủ bảo vệ và hệ mạ kẽm của trụ do đó cần được lựa chọn và duy trì theo hướng dẫn ISO 12944 (ISO, 2017) nhằm kéo dài tuổi thọ kết cấu. Đây cũng là một trong những lý do chính khiến việc phát hiện sớm ăn mòn và bong tróc lớp phủ trở thành ưu tiên hàng đầu trong công tác bảo dưỡng trụ viễn thông tại Việt Nam.

3.4. Khung pháp lý và ràng buộc vận hành tại Việt Nam

Tại Việt Nam, công tác thiết kế, lắp đặt và kiểm định trạm thu phát sóng thông tin di động được điều chỉnh bởi nhiều văn bản quy phạm, trong đó có QCVN 08:2021/BXD về công trình viễn thông (Bộ Xây dựng, 2021) và QCVN 32:2020/BTTTT về chống sét cho trạm viễn thông (Bộ Thông tin và Truyền thông, 2020). Các văn bản này chủ yếu quy định về thiết kế, lắp đặt, chống sét và nghiệm thu công trình.

Đối với việc sử dụng UAV trong kiểm tra hạ tầng, hoạt động bay được điều chỉnh bởi Luật Phòng không nhân dân số 49/2024/QH15 (Quốc hội Việt Nam, 2024) và Nghị định 288/2025/NĐ-CP (Chính phủ Việt Nam, 2025) - văn bản thay thế Nghị định 36/2008/NĐ-CP, có hiệu lực từ ngày 05/11/2025. Theo Nghị định mới, việc triển khai UAV được phân cấp cụ thể theo độ cao bay: Bộ Chỉ huy quân sự cấp tỉnh cấp phép bay ở độ cao dưới 50 m, cấp Quân khu cấp phép bay đến 120 m và Cục Tác chiến cấp phép bay trong toàn vùng trời Việt Nam. Các trạm viễn thông gần sân bay, khu vực quốc phòng hoặc đông dân cư vẫn thuộc vùng hạn chế bay theo Quyết định số 18/2020/QĐ-TTg về thiết lập khu vực cấm bay, khu vực hạn chế bay đối với tàu bay không người lái (Thủ tướng Chính phủ, 2020), đòi hỏi xin phép theo từng trường hợp cụ thể. Trong khi đó, các hướng dẫn chuyên biệt về kiểm tra định kỳ bằng

UAV hoặc ứng dụng AI cho hạ tầng viễn thông chưa được ban hành đầy đủ, tạo ra khoảng trống pháp lý sẽ được phân tích chi tiết tại mục 7.

Những đặc điểm nêu trên cho thấy việc áp dụng các phương pháp bảo dưỡng cho trụ viễn thông cần

được xem xét trong một bối cảnh riêng biệt, thay vì áp dụng trực tiếp các giải pháp từ các lĩnh vực công trình khác. Đây cũng là cơ sở để phân loại, đánh giá và so sánh các phương pháp bảo dưỡng tại các mục tiếp theo.



Hình 3. Các dạng hư hỏng điển hình trên trụ thu phát sóng thông tin di động (VNPT Đồng Tháp, 2023-2024)

Ghi chú: (a) bong tróc lớp phủ bảo vệ, (b) rỉ sét, (c) bị thủng lỗ

4. PHÂN LOẠI CÁC PHƯƠNG PHÁP BẢO DƯỠNG

Dựa trên kết quả tổng hợp tài liệu, các phương pháp bảo dưỡng trụ thu phát sóng thông tin di động được phân loại thành bốn nhóm chính: (i) kiểm tra thủ công, (ii) giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring - SHM), (iii) kiểm tra bằng thiết bị bay không người lái (UAV) và (iv) các phương pháp dựa trên AI, đặc biệt là học sâu. Mỗi nhóm được phân tích trong các mục 4.1 – 4.4 theo khung tiêu chí thống nhất đã trình bày tại mục 2.5, gồm nguyên lý hoạt động, ưu điểm, hạn chế, mức độ tự động hóa và khả năng ứng dụng thực tế cho trụ viễn thông.

4.1. Phương pháp kiểm tra thủ công

Kiểm tra thủ công là phương pháp truyền thống và vẫn được sử dụng rộng rãi trong thực tế vận hành tại nhiều quốc gia, trong đó có Việt Nam. Phương pháp này chủ yếu dựa vào việc nhân viên kỹ thuật trực tiếp leo trụ hoặc quan sát từ mặt đất để kiểm tra các thành phần kết cấu bằng mắt thường và các công cụ đo lường cơ bản. Ưu điểm của phương pháp là tính linh hoạt, không phụ thuộc vào hạ tầng công nghệ và khả năng đánh giá trực tiếp hiện trạng công trình. Tuy nhiên, việc kiểm tra thủ công có nhiều hạn chế đáng kể. Chi phí nhân công cao, kết quả phụ thuộc vào kinh nghiệm và chủ quan của người thực hiện, khó đảm bảo tính nhất quán giữa các lần kiểm

tra, và tiềm ẩn rủi ro an toàn lao động nghiêm trọng, đặc biệt trong các điều kiện làm việc trên cao hoặc môi trường khắc nghiệt (Al-Khateeb et al., 2022; Pomarnacki et al., 2025). Pomarnacki et al. (2025) ghi nhận rằng quy trình kiểm tra thủ công trụ viễn thông điển hình đòi hỏi ít nhất hai kỹ thuật viên có chứng chỉ leo cao, với thời gian kiểm tra trung bình từ 4 đến 8 giờ mỗi trụ tùy theo chiều cao và mức độ phức tạp. Ngoài ra, phương pháp này khó mở rộng khi số lượng trạm viễn thông ngày càng tăng, đặc biệt trong giai đoạn triển khai mạng 5G.



Hình 4. Bảo dưỡng nhân công (VNPT Đồng Tháp, 2025)

4.2. Giám sát sức khỏe kết cấu (SHM)

Hệ thống cảm biến lắp đặt cố định trên công trình được sử dụng trong việc giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring – SHM) để theo dõi liên tục các thông số trạng thái kết cấu theo thời gian thực. Các thông số thường được giám sát bao gồm rung động, biến dạng, nghiêng lệch, nhiệt độ và độ ẩm, từ đó phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm kết cấu (Farrar & Worden, 2007; Spencer et al., 2019; Farrar et al., 2025). Mardanshahi et al. (2025) tổng hợp các thể hệ cảm biến SHM hiện đại, bao gồm cảm biến quang sợi (FBG), cảm biến gia tốc MEMS và hệ thống truyền dữ liệu không dây, cho thấy khả năng giám sát liên tục với độ chính xác cao trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt.

Ưu điểm nổi bật của SHM là khả năng giám sát liên tục 24/7, phát hiện hư hỏng theo thời gian thực và giảm thiểu sự phụ thuộc vào con người trong quá trình kiểm tra định kỳ. Tuy nhiên, việc triển khai hệ thống SHM trên trụ viễn thông gặp nhiều thách thức đặc thù, bao gồm chi phí lắp đặt và bảo trì hệ thống cảm biến cao, ảnh hưởng của nhiễu điện từ từ thiết bị phát sóng đến độ chính xác của dữ liệu và khó khăn trong việc quản lý khối lượng dữ liệu lớn từ nhiều trạm phân tán (Sun et al., 2020; Spencer et al., 2019).

4.3. Kiểm tra bằng thiết bị bay không người lái (UAV)

Việc sử dụng UAV trong kiểm tra trụ viễn thông đã trở thành một hướng tiếp cận được quan tâm ngày càng nhiều trong những năm gần đây. UAV cho phép thu thập dữ liệu hình ảnh và video độ phân giải cao từ các vị trí khó tiếp cận mà không cần tiếp xúc trực tiếp với công trình, từ đó giảm thiểu rủi ro cho con người, rút ngắn thời gian kiểm tra và tăng khả năng bao phủ (Rakha & Gorodetsky, 2018; Shakhathreh et al., 2019; Mendu & Mbuli, 2025).

Đối với các kết cấu dạng trụ và dàn thép, Nguyen et al. (2018) đề xuất hệ thống UAV tự hành kết hợp thị giác máy tính có khả năng bay theo quỹ đạo định sẵn quanh cột điện và phát hiện bất thường trên bề mặt kết cấu mà không cần can thiệp của người vận hành. Maitre et al. (2024) phát triển thuật toán điều khiển dựa trên học sâu cho UAV được dẫn hướng bằng thị giác trong nhiệm vụ kiểm tra cột điện cao thế, cho thấy tiềm năng tự động hóa toàn diện cho các kết cấu dạng dàn thép có hình học tương tự trụ viễn thông. Pomarnacki et al. (2025) đánh giá tính khả thi của UAV trong kiểm tra trụ viễn thông tại điều kiện thực tế, ghi nhận khả năng rút ngắn thời gian kiểm tra xuống còn 30 – 60 phút mỗi trụ so với

4 – 8 giờ khi kiểm tra thủ công. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn phụ thuộc vào điều kiện thời tiết, thời lượng pin, chất lượng tín hiệu điều khiển và các quy định pháp lý liên quan đến hoạt động bay (Shakhathreh et al., 2019; Mendu & Mbuli, 2025).



Hình 5. UAV với độ phân giải 4K

4.4. Phương pháp dựa trên AI

Các phương pháp dựa trên AI, đặc biệt là học sâu, được sử dụng để tự động phát hiện và phân loại hư hỏng từ dữ liệu hình ảnh thu thập bởi UAV hoặc camera cố định (LeCun et al., 2015). Các kiến trúc học sâu phổ biến được ứng dụng trong lĩnh vực này bao gồm mạng nơ-ron tích chập (CNN) cho phân loại hư hỏng, họ mô hình YOLO (Redmon et al., 2016) cho phát hiện đối tượng theo thời gian thực, và mạng phân đoạn U-Net (Ronneberger et al., 2015) cho phân đoạn vùng hư hỏng.

Về kết quả định lượng, Ameli et al. (2024) đạt mAP 87,3% với Mask R-CNN và 91,2% với YOLOv8 trong bài toán phát hiện và phân đoạn ăn mòn trên kết cấu thép cầu, cho thấy tiềm năng ứng dụng trực tiếp cho trụ viễn thông. Savino and Tondolo (2025) ứng dụng mạng CNN kết hợp ảnh UAV để định lượng diện tích bề mặt ăn mòn trên trụ thép truyền tải điện, đạt độ chính xác phân đoạn IoU trên 85% trong điều kiện thực địa. Dorafshan et al. (2018) so sánh hiệu quả giữa học sâu và các phương pháp phát hiện cạnh truyền thống trong nhận diện vết nứt bê tông, kết luận rằng CNN vượt trội đáng kể về độ chính xác và khả năng tổng quát hóa (Koch et al., 2015; Zhao et al., 2019). Trong cùng hướng tiếp cận, Ali et al. (2022) phát triển mạng tích chập sâu chuyên dụng cho phát hiện vết nứt kết cấu trên ảnh thực địa, ghi nhận hiệu quả cao và khẳng định tính chuyển giao của các kiến trúc CNN sang các bài toán đánh giá tình trạng kết cấu thép phơi nhiễm môi trường ăn mòn.

Gần đây, xu hướng ứng dụng các mô hình nền tảng (foundation models) như Segment Anything Model (SAM) (Kirillov et al., 2023) và SAM 2 (Ravi et al., 2024) đang mở ra hướng tiếp cận mới cho kiểm tra hạ tầng trong điều kiện dữ liệu gần nhân hạn chế - một trong những rào cản lớn nhất của ứng dụng AI cho trụ viễn thông. Tuy nhiên, hiệu quả thực tế của các mô hình này trên dữ liệu trụ viễn thông vẫn cần được đánh giá thêm (Tang & Yang, 2025; Mardanshahi et al., 2025).

Nhìn chung, mỗi nhóm phương pháp đều có những ưu điểm và hạn chế riêng biệt và chưa có phương pháp đơn lẻ nào có thể đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về chi phí, độ chính xác và khả năng triển khai trong mọi bối cảnh. Điều này đặt ra nhu cầu so

sánh và đánh giá toàn diện các phương pháp trong một khung thống nhất, được trình bày tại mục 5.

5. SO SÁNH VÀ ĐÁNH GIÁ CÁC PHƯƠNG PHÁP BẢO DƯỠNG

Dựa trên các phương pháp đã phân loại tại mục 4, việc so sánh và đánh giá theo các tiêu chí thống nhất là cần thiết nhằm làm rõ ưu điểm, hạn chế và khả năng ứng dụng thực tế của từng nhóm. Trong nghiên cứu này, phương pháp đánh giá định tính có cấu trúc đã được sử dụng, tổng hợp từ các tài liệu đã công bố. Các tiêu chí đánh giá gồm: chi phí triển khai, độ chính xác, mức độ tự động hóa, khả năng mở rộng và tính khả thi trong điều kiện thực tế. Định nghĩa các mức đánh giá được trình bày trong chú thích Bảng 2.

Bảng 2. So sánh các phương pháp bảo dưỡng

Phương pháp	Chi phí triển khai	Độ chính xác	Mức độ tự động hoá	Khả năng mở rộng	Tính khả thi thực tế	Cơ sở tài liệu
Kiểm tra thủ công	Thấp ban đầu; cao dài hạn	Phụ thuộc kinh nghiệm	Thấp	Thấp	Cao	Al-Khateeb et al. (2022), Pomarnacki et al. (2025)
SHM	Cao do cảm biến và hệ thống giám sát	Cao (liên tục theo thời gian thực)	Trung bình	Trung bình	Hạn chế do chi phí và bảo trì	Farrar and Worden (2007), Farrar et al. (2025), Mardanshahi et al. (2025)
UAV	Trung bình; phụ thuộc thiết bị và vận hành	Cao đối với kiểm tra trực quan	Trung bình	Cao	Phụ thuộc điều kiện bay và pháp lý	Rakha and Gorodetsky (2018), Pomarnacki et al. (2025), Mendu and Mbuli (2025)
AI (học sâu)	Trung bình; phụ thuộc dữ liệu và hạ tầng tính toán	Cao trong điều kiện dữ liệu phù hợp	Cao	Cao	Phụ thuộc dữ liệu huấn luyện và triển khai	Koch et al. (2015), Ameli et al. (2024), Lyu et al. (2025), Tang and Yang (2025)

Các mức đánh giá được định nghĩa như sau. Chi phí triển khai: thấp - chi phí đầu tư ban đầu nhỏ hơn đáng kể so với chi phí vận hành hằng năm, trung bình - tương đương, cao - lớn hơn đáng kể. Độ chính xác: phản ánh khả năng phát hiện đúng các dạng hư hỏng so với kết quả khảo sát đối chứng hoặc chỉ số đánh giá phổ biến (mAP, IoU) được ghi nhận trong các nghiên cứu tổng hợp. Mức độ tự động hóa: thấp - chủ yếu thủ công, trung bình - có tự động hóa từng bước, cao - quy trình tự động từ thu thập đến phân tích. Khả năng mở rộng: khả năng triển khai ở quy mô lớn mà không tăng chi phí tuyến tính. Tính khả thi thực tế: mức độ sẵn sàng triển khai trong điều kiện hạ tầng và pháp lý hiện hành. Các mức phân

ánh xu hướng chung được tổng hợp từ tài liệu, không phải ngưỡng số tuyệt đối.

Việc phân tích so sánh cho thấy mỗi phương pháp có lợi thế rõ rệt ở các tiêu chí khác nhau, phù hợp với các bối cảnh triển khai cụ thể.

Phương pháp kiểm tra thủ công có ưu điểm về tính khả thi cao và không phụ thuộc vào hạ tầng công nghệ, tuy nhiên mức độ tự động hoá thấp và khả năng mở rộng kém làm hạn chế hiệu quả khi quy mô hệ thống tăng lên. Chi phí nhân công tích lũy trong dài hạn có xu hướng vượt các phương pháp sử dụng công nghệ (Al-Khateeb et al., 2022).

Phương pháp SHM cho phép giám sát liên tục và phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm kết cấu theo

thời gian thực, đây là ưu điểm nổi bật không có ở các phương pháp còn lại. Tuy nhiên, chi phí đầu tư ban đầu cao, yêu cầu bảo trì hệ thống cảm biến và ảnh hưởng của nhiễu điện từ là những rào cản lớn trong triển khai thực tế trên trụ viễn thông (Farrar et al., 2025; Mardanshahi et al., 2025).

Phương pháp UAV mang lại khả năng tiếp cận cao nhất trong số các phương pháp được xem xét, với khả năng thu thập dữ liệu trực quan ở các vị trí nguy hiểm mà không cần nhân viên tiếp xúc trực tiếp. Pomarnacki et al. (2025) cho thấy UAV có thể rút ngắn thời gian kiểm tra xuống còn 30 – 60 phút mỗi trụ so với 4 – 8 giờ khi kiểm tra thủ công. Tuy nhiên, tính khả thi phụ thuộc chặt chẽ vào điều kiện thời tiết, thời lượng pin và khung pháp lý tại từng khu vực triển khai (Rakha & Gorodetsky, 2018).

Các phương pháp AI cho thấy mức độ tự động hoá và khả năng mở rộng cao nhất trong số bốn nhóm, với tiềm năng xử lý dữ liệu hình ảnh quy mô lớn từ nhiều trạm viễn thông song song. Ameli et al. (2024) ghi nhận mAP 91,2% với YOLOv8 trong phát hiện ăn mòn thép, trong khi Savino and Tondolo (2025) đạt IoU trên 85% trong phân đoạn vùng ăn mòn trên trụ thép truyền tải điện. Tuy nhiên, hiệu quả của các mô hình phụ thuộc nhiều vào chất lượng dữ liệu huấn luyện chuyên biệt cho trụ viễn thông - hiện còn rất hạn chế (Tang & Yang, 2025).

Nhìn chung, không có phương pháp đơn lẻ nào có thể đáp ứng đầy đủ tất cả các yêu cầu về chi phí, độ chính xác và khả năng triển khai. Kết quả so sánh cho thấy xu hướng kết hợp UAV và AI là hướng tiếp cận có tiềm năng nhất để bù đắp hạn chế của từng phương pháp riêng lẻ, được phân tích chi tiết tại mục 6.

6. XU HƯỚNG TÍCH HỢP UAV VÀ AI

Kết quả tổng hợp tài liệu cho thấy xu hướng tích hợp UAV và trí tuệ nhân tạo trong kiểm tra kết cấu đã phát triển rõ rệt trong giai đoạn 2018 – 2025, từ các hệ thống thu thập ảnh đơn thuần sang các pipeline tự động hóa toàn diện kết hợp phân tích học sâu theo thời gian thực (Mendu & Mbuli, 2025; Lyu et al., 2025; Tang & Yang, 2025).

6.1. Sự tiến triển của hướng tiếp cận tích hợp

Việc phân tích các tài liệu được tổng hợp cho thấy ba giai đoạn phát triển rõ rệt. Ở giai đoạn đầu (trước 2018), UAV được sử dụng chủ yếu như công cụ thu thập ảnh thụ động, kết quả phân tích vẫn phụ thuộc vào chuyên gia con người (Rakha & Gorodetsky, 2018). Ở giai đoạn thứ hai (2018–2022), sự tích hợp các mô hình CNN và YOLO vào

quy trình xử lý ảnh UAV được ghi nhận cho phép phát hiện tự động các dạng hư hỏng như vết nứt và ăn mòn trên các kết cấu dân dụng (Nguyen et al., 2018; Zhu et al., 2020; Dong & Catbas, 2021). Ở giai đoạn thứ ba (2022 đến nay), sự chuyển dịch được đánh dấu sang các kiến trúc phân đoạn instance và các mô hình nền tảng, với khả năng xử lý dữ liệu đa dạng hơn và yêu cầu dữ liệu gán nhãn thấp hơn (Ameli et al., 2024; Savino & Tondolo, 2025; Kirillov et al., 2023; Ravi et al., 2024).

6.2. Các dạng hư hỏng được tập trung nghiên cứu

Việc tổng hợp tài liệu cho thấy phần lớn các nghiên cứu tích hợp UAV–AI tập trung vào ba dạng hư hỏng chính: ăn mòn kim loại, vết nứt bề mặt và bong tróc lớp phủ. Đây cũng là những dạng hư hỏng phổ biến nhất trên trụ viễn thông thép trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm như Việt Nam (Yeum & Dyke, 2015; Ameli et al., 2024; Savino & Tondolo, 2025). Trong khi phát hiện vết nứt bề tông đã được nghiên cứu tương đối toàn diện, phát hiện ăn mòn và biến dạng kết cấu thép - đặc biệt trên trụ dạng dàn - vẫn còn ít được nghiên cứu chuyên biệt (Dong & Catbas, 2021; Tang & Yang, 2025).

6.3. Mức độ trưởng thành và khoảng cách giữa nghiên cứu và thực tiễn

Mặc dù các kết quả thực nghiệm trong phòng thí nghiệm và thử nghiệm quy mô nhỏ cho thấy tiềm năng đáng kể, phần lớn các nghiên cứu được tổng hợp vẫn dừng ở mức thử nghiệm kiểm soát hoặc demo kỹ thuật. Rất ít nghiên cứu báo cáo kết quả triển khai thực tế trên hệ thống trụ viễn thông vận hành, với dữ liệu thu thập trong điều kiện thực địa đầy đủ (Lyu et al., 2025; Mardanshahi et al., 2025). Khoảng cách giữa kết quả nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn này được xác định là một trong những khoảng trống nghiên cứu quan trọng nhất trong lĩnh vực, sẽ được phân tích chi tiết tại mục 7.

6.4. Xu hướng mới - Mô hình nền tảng và học tự giám sát

Từ năm 2023, xu hướng ứng dụng các mô hình nền tảng như SAM (Kirillov et al., 2023) và SAM 2 (Ravi et al., 2024) đang được khảo sát cho bài toán phân đoạn khuyết tật trong điều kiện dữ liệu gán nhãn hạn chế. Đây là xu hướng có ý nghĩa đặc biệt với bối cảnh trụ viễn thông, nơi việc xây dựng tập dữ liệu gán nhãn chuyên biệt đòi hỏi chi phí và chuyên môn cao. Tuy nhiên, các đánh giá thử nghiệm về hiệu quả của các mô hình này trên dữ liệu trụ viễn thông chưa được công bố, cho thấy đây là một hướng nghiên cứu mới cần được tiếp tục khai

thác (Tang & Yang, 2025; Mardanshahi et al., 2025).

Nhìn chung, việc tổng hợp tài liệu xác nhận xu hướng tích hợp UAV-AI là hướng phát triển chủ đạo trong kiểm tra bảo dưỡng hạ tầng, với tiềm năng ứng dụng rõ ràng cho trụ viễn thông. Tuy nhiên, các thách thức về dữ liệu, pháp lý và triển khai thực tế vẫn là những rào cản chính cần được giải quyết trong các nghiên cứu tiếp theo.

7. THÁCH THỨC VÀ KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

Mặc dù các phương pháp bảo dưỡng trụ viễn thông đã có nhiều tiến bộ, đặc biệt với sự hỗ trợ của UAV và AI, kết quả tổng hợp tài liệu cho thấy vẫn tồn tại nhiều thách thức trong triển khai thực tế và các khoảng trống nghiên cứu quan trọng cần được tiếp tục khai thác.

7.1. Thách thức trong triển khai thực tế

Thách thức về dữ liệu là rào cản lớn nhất được ghi nhận nhất quán trong các tài liệu được tổng hợp. Các mô hình học sâu phụ thuộc mạnh vào dữ liệu huấn luyện chất lượng cao và đa dạng, trong khi các tập dữ liệu chuyên biệt cho trụ viễn thông hầu như chưa tồn tại dưới dạng công khai. Phần lớn trong các nghiên cứu hiện tại, dữ liệu từ các kết cấu dân dụng đã được sử dụng như cầu và nhà cao tầng để huấn luyện mô hình, dẫn đến hạn chế đáng kể về khả năng tổng quát hoá khi áp dụng cho đặc thù hình học và vật liệu của trụ viễn thông thép (Tang & Yang, 2025; Mardanshahi et al., 2025).

Thách thức về pháp lý và vận hành UAV tại Việt Nam phát sinh trực tiếp từ khung pháp lý đã trình bày tại mục 3.4. Thứ nhất, quy trình xin phép bay đa cấp - phụ thuộc vào độ cao kiểm tra và vị trí địa lý của trạm - có thể kéo dài thời gian chuẩn bị mỗi đợt kiểm tra định kỳ, làm giảm lợi thế về tốc độ vốn là ưu điểm chính của UAV. Thứ hai, một bộ phận đáng kể trạm viễn thông nằm trong hoặc gần các vùng hạn chế bay (sân bay, khu quốc phòng, khu đông dân cư), khiến phương án kiểm tra bằng UAV không thể áp dụng đồng đều cho toàn bộ mạng lưới. Thứ ba, đề đặt vấn đề này trong bối cảnh đúng hơn, cần lưu ý rằng UAV đã bắt đầu có hành lang pháp lý ứng dụng thực tế tại Việt Nam trong một số lĩnh vực. Cụ thể, hoạt động phun thuốc bảo vệ thực vật bằng UAV trong nông nghiệp đã được hướng dẫn thực hiện từ năm 2020 và UAV cũng được triển khai trong quan trắc môi trường, quản lý đô thị ở tầng bay thấp dưới 50 m. Tuy nhiên, các ứng dụng này chủ yếu vận hành ở độ cao thấp (dưới 50 m), trên địa hình thoáng, không có thiết bị bức xạ điện từ và

không yêu cầu bay sát kết cấu thép thẳng đứng. Trong khi đó, việc kiểm tra trụ viễn thông bằng UAV đòi hỏi bay ở độ cao 30 – 80 m, trong môi trường có bức xạ điện từ cao, bay vòng quanh kết cấu dạng dàn thép phức tạp và thường nằm gần khu dân cư, điều này tạo ra nhóm rủi ro và yêu cầu kỹ thuật khác biệt hoàn toàn so với các ứng dụng UAV đã có hướng dẫn. Chính sự khác biệt này lý giải tại sao hành lang pháp lý hiện hành chưa đủ để các đơn vị khai thác mạng áp dụng UAV vào quy trình bảo dưỡng chính thức. Thứ tư, các hướng dẫn kỹ thuật chuyên biệt cho UAV và AI trong kiểm tra hạ tầng viễn thông chưa được ban hành, dẫn đến thiếu tiêu chuẩn về độ phân giải ảnh, quỹ đạo bay, định dạng dữ liệu và quy trình nghiệm thu kết quả phân tích AI.

Thách thức về tích hợp hệ thống liên quan đến việc kết nối các giải pháp công nghệ mới với quy trình vận hành hiện hành. Các hệ thống quản lý bảo dưỡng truyền thống thường chưa được thiết kế để tiếp nhận dữ liệu từ UAV hoặc kết quả phân tích AI, dẫn đến khó khăn trong chuẩn hóa quy trình và mở rộng quy mô triển khai (Lyu et al., 2025). Ngoài ra, chi phí đầu tư ban đầu cho thiết bị UAV, hạ tầng tính toán và đào tạo nhân lực vẫn là rào cản đáng kể, đặc biệt đối với các đơn vị vận hành mạng quy mô vừa và nhỏ.

Thách thức về điều kiện môi trường cũng được nhiều nghiên cứu ghi nhận. Hiệu quả của hệ thống UAV-AI có thể bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như ánh sáng thay đổi, thời tiết xấu, gió mạnh và nhiễu điện từ từ thiết bị phát sóng trên trụ (Shakhateh et al., 2019; Mendu & Mbuli, 2025). Đây là những yếu tố đặc thù của môi trường vận hành trụ viễn thông mà các nghiên cứu trên hạ tầng dân dụng thường không đề cập đầy đủ.

7.2. Khoảng trống nghiên cứu

Từ việc tổng hợp tài liệu, năm khoảng trống nghiên cứu chính trong lĩnh vực bảo dưỡng trụ viễn thông đã được xác định.

Khoảng trống 1 - thiếu dữ liệu chuẩn hoá chuyên biệt: Hiện chưa có bộ dữ liệu ảnh công khai nào được xây dựng đặc thù cho trụ viễn thông thép, bao gồm các dạng hư hỏng điển hình như ăn mòn, bong tróc lớp phủ và biến dạng cấu kiện. Sự thiếu hụt này cản trở việc huấn luyện, so sánh và đánh giá các mô hình AI một cách khách quan, đồng thời hạn chế khả năng áp dụng kỹ thuật học chuyên giao từ các lĩnh vực liên quan (Tang & Yang, 2025; Lyu et al., 2025).

Khoảng trống 2 - thiếu nghiên cứu triển khai thực địa: Phần lớn các nghiên cứu được tổng hợp dùng ở mức thử nghiệm trong môi trường kiểm soát hoặc quy mô nhỏ. Rất ít nghiên cứu được tiến hành nhằm báo cáo kết quả đánh giá hiệu quả trong điều kiện vận hành thực tế trên hệ thống trụ viễn thông đang hoạt động, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới (Mardanshahi et al., 2025; Pomarnacki et al., 2025).

Khoảng trống 3 - thiếu so sánh trực tiếp giữa các phương pháp: Chưa có nghiên cứu nào được thực hiện nhằm so sánh đối chứng trực tiếp giữa các phương pháp bảo dưỡng khác nhau - kiểm tra thủ công, SHM, UAV và AI - trong cùng một điều kiện và trên cùng một đối tượng trụ viễn thông. Sự thiếu hụt này làm cho việc lựa chọn giải pháp tối ưu cho từng bối cảnh cụ thể còn mang tính kinh nghiệm hơn là dựa trên bằng chứng định lượng (Snyder, 2019; Page et al., 2021).

Khoảng trống 4 - chưa đánh giá đầy đủ các mô hình nền tảng: Các mô hình như SAM và SAM 2 chưa được đánh giá thực nghiệm trên dữ liệu trụ viễn thông. Tiềm năng của học tự giám sát và học chuyên giao từ các mô hình nền tảng trong việc giảm phụ thuộc vào dữ liệu gán nhãn chuyên biệt vẫn là câu hỏi mở (Kirillov et al., 2023; Ravi et al., 2024; ITU, 2021).

Khoảng trống 5 - thiếu khung pháp lý và hướng dẫn chuyên biệt tại Việt Nam: Mặc dù Nghị định 288/2025/NĐ-CP đã tạo nền tảng pháp lý toàn diện hơn cho hoạt động UAV, các hướng dẫn chuyên biệt về ứng dụng UAV và AI trong kiểm tra định kỳ hạ tầng viễn thông vẫn chưa được ban hành. Việc thực hiện các nghiên cứu phối hợp giữa đơn vị khai thác mạng, cơ quan quản lý nhà nước và tổ chức nghiên cứu để đề xuất quy trình vận hành phù hợp với Nghị định 288/2025 còn rất hạn chế (ITU, 2021; ISO, 2019; Chính phủ Việt Nam, 2025).

7.3. Giới hạn của nghiên cứu

Bài báo có một số giới hạn cần lưu ý khi diễn giải kết quả. Thứ nhất, quá trình sàng lọc và phân loại dựa trên đánh giá định tính, không thực hiện phân tích gộp (meta-analysis) do sự không đồng nhất về tập dữ liệu, chỉ số đánh giá và điều kiện thử nghiệm giữa các nghiên cứu. Thứ hai, các mức đánh giá định tính (thấp / trung bình / cao) trong Bảng 2 phản ánh xu hướng chung được tổng hợp từ tài liệu, không phải các ngưỡng số tuyệt đối có thể kiểm chứng độc lập. Thứ ba, phạm vi tìm kiếm tập trung vào bốn cơ sở dữ liệu chính với ngôn ngữ tiếng Anh, có thể chưa bao gồm đầy đủ các nghiên cứu nội địa

hoặc công bố tại các hội nghị không có chỉ mục quốc tế. Những giới hạn này cần được xem xét trong các nghiên cứu tổng quan kế tiếp với phạm vi rộng hơn.

8. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một tổng quan có hệ thống về các phương pháp bảo dưỡng trụ thu phát sóng thông tin di động đã được trình bày, thực hiện theo hướng dẫn PRISMA 2020 với tổng cộng [N = 42] tài liệu được chọn từ bốn cơ sở dữ liệu khoa học uy tín trong giai đoạn 2015 – 2025. Thông qua việc phân loại, phân tích và so sánh bốn nhóm phương pháp - kiểm tra thủ công, giám sát sức khỏe kết cấu, kiểm tra bằng UAV và phát hiện hư hỏng dựa trên AI, kết quả nghiên cứu đã làm rõ đặc điểm, ưu điểm và hạn chế của từng nhóm trong bối cảnh đặc thù của trụ viễn thông.

Kết quả so sánh tại Bảng 2 cho thấy các phương pháp truyền thống, đặc biệt là kiểm tra thủ công, có tính khả thi cao nhưng bị hạn chế bởi mức độ tự động hóa thấp và khả năng mở rộng kém. Phương pháp SHM cho phép giám sát liên tục theo thời gian thực nhưng chi phí đầu tư và yêu cầu bảo trì cao là rào cản lớn trong triển khai thực tế. Phương pháp UAV có khả năng mở rộng cao và giảm thiểu rủi ro an toàn lao động, trong khi các phương pháp AI cho thấy mức độ tự động hóa và khả năng mở rộng cao nhất trong số bốn nhóm được xem xét. Việc tổng hợp tài liệu xác nhận không có phương pháp đơn lẻ nào đáp ứng đầy đủ tất cả các yêu cầu và xu hướng tích hợp UAV-AI là hướng phát triển có tiềm năng nhất để bù đắp hạn chế của từng phương pháp riêng lẻ.

Kết quả phân tích xu hướng tại mục 6 cho thấy lĩnh vực này đã trải qua ba giai đoạn phát triển rõ rệt từ 2018 đến nay, từ UAV thu thập ảnh thụ động sang tích hợp CNN/YOLO cho phát hiện tự động, và đang tiến đến ứng dụng các mô hình nền tảng như SAM và SAM 2 trong điều kiện dữ liệu gán nhãn hạn chế. Tuy nhiên, khoảng cách giữa kết quả thử nghiệm và triển khai thực tế vẫn còn lớn, đặc biệt đối với bối cảnh trụ viễn thông thép trong điều kiện khí hậu nhiệt đới.

Đồng thời, năm khoảng trống nghiên cứu quan trọng cũng đã được xác định: (i) thiếu bộ dữ liệu chuẩn hoá chuyên biệt cho trụ viễn thông, (ii) thiếu nghiên cứu triển khai và đánh giá trong điều kiện thực địa, (iii) thiếu so sánh trực tiếp giữa các phương pháp trong cùng điều kiện, (iv) chưa có đánh giá thực nghiệm về hiệu quả của các mô hình nền tảng trên dữ liệu trụ viễn thông và (v) thiếu khung pháp

lý và hướng dẫn chuyên biệt cho ứng dụng UAV và AI trong bảo dưỡng hạ tầng viễn thông tại Việt Nam.

Dựa trên các kết quả tổng hợp, ba hướng ưu tiên đã được đề xuất cho các nghiên cứu tiếp theo. Hướng thứ nhất là xây dựng bộ dữ liệu ảnh chuẩn hoá và công khai cho trụ viễn thông thép, bao gồm các dạng hư hỏng điển hình được gán nhãn theo chuẩn thống nhất, nhằm tạo nền tảng cho việc huấn luyện và so sánh các mô hình AI một cách khách

quan. Hướng thứ hai là thực hiện các nghiên cứu thực địa đánh giá hiệu quả của hệ thống UAV-AI trong điều kiện vận hành thực tế tại Việt Nam, với sự phối hợp giữa đơn vị khai thác mạng và tổ chức nghiên cứu. Hướng thứ ba là phối hợp với cơ quan quản lý nhà nước đề xuất khung pháp lý và hướng dẫn kỹ thuật chuyên biệt cho ứng dụng UAV và AI trong kiểm tra định kỳ hạ tầng viễn thông, phù hợp với điều kiện pháp lý và hạ tầng của Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al-Khateeb, H., Al-Khateeb, A., & Al-Khateeb, M. (2022). Structural assessment of telecommunication towers under environmental loading. *Journal of Structural Engineering*, 148(3), 04022012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003265](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003265)
- Ali, R., Chuah, J. H., Abu Talip, M. S., Mokhtar, N., & Shoaib, M. A. (2022). Structural crack detection using deep convolutional neural networks. *Automation in Construction*, 133, Article 103989. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103989>
- Ameli, Z., Nesheli, S. J., & Landis, E. N. (2024). Deep learning-based steel bridge corrosion segmentation and condition rating using Mask R-CNN and YOLOv8. *Infrastructures*, 9(1), Article 3. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010003>
- Bộ Thông tin và Truyền thông. (2020). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chống sét cho trạm viễn thông và mạng cáp ngoại vi viễn thông (QCVN 32:2020/BTTTT)*.
- Bộ Xây dựng. (2021). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về công trình viễn thông (QCVN 08:2021/BXD)*.
- Chính phủ Việt Nam. (2025). *Quy định về quản lý tàu bay không người lái và các phương tiện bay khác* (Nghị định số 288/2025/NĐ-CP).
- Dorafshan, S., Thomas, R. J., & Maguire, M. (2018). Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 1031–1045. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.011>
- Dong, C. Z., & Catbas, F. N. (2021). A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. *Structural Health Monitoring*, 20(2), 692–743. <https://doi.org/10.1177/1475921720935293>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>
- Farrar, C. R., Dervilis, N., & Worden, K. (2025). The past, present and future of structural health monitoring: An overview of three ages. *Strain*, 61(1), Article e12495. <https://doi.org/10.1111/str.12495>
- Greenwood, W. W., Lynch, J. P., & Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2), 04019002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464)
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- International Organization for Standardization. (2012). *Corrosion of metals and alloys: Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation (ISO 9223:2012)*.
- International Organization for Standardization. (2017). *Paints and varnishes: Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Part 2: Classification of environments (ISO 12944-2:2017)*.
- International Organization for Standardization. (2019). *Asset management: Overview, principles and terminology (ISO 55000:2019)*.
- International Telecommunication Union. (2021). *Guidelines for telecommunication infrastructure resilience*.
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A. C., Lo, W.-Y., Dollár, P., & Girshick, R. (2023). Segment anything. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)* (pp. 4015–4026). <https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.00371>
- Koch, C., Georgieva, K., Kasireddy, V., Akinci, B., & Fieguth, P. (2015). A review on computer vision based defect detection and condition assessment of civil infrastructure. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.008>

- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Lyu, C., Lin, S., Lynch, A., Zou, Y., & Liarakapis, M. (2025). UAV-based deep learning applications for automated inspection of civil infrastructure. *Automation in Construction*, 177, Article 106285. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106285>
- Maitre, G., Martinot, D., & Tuci, E. (2024). On the design of deep learning-based control algorithms for visually guided UAVs engaged in power tower inspection tasks. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, Article 1378149. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1378149>
- Mardanshahi, A., Sreekumar, A., Yang, X., Barman, S. K., & Chronopoulos, D. (2025). Sensing techniques for structural health monitoring: A state-of-the-art review on performance criteria and new-generation technologies. *Sensors*, 25(5), Article 1424. <https://doi.org/10.3390/s25051424>
- Mendu, B., & Mbuli, N. (2025). State-of-the-art review on the application of unmanned aerial vehicles (UAVs) in power line inspections: Current innovations, trends, and future prospects. *Drones*, 9(4), Article 265. <https://doi.org/10.3390/drones9040265>
- Nguyen, V. N., Jenssen, R., & Roverso, D. (2018). Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pomarnacki, R., Bručas, D., Jačionis, T., & Plonis, D. (2025). Unmanned aerial vehicles for the monitoring of telecommunication towers from the engineering approach. *Drones*, 9(4), Article 308. <https://doi.org/10.3390/drones9040308>
- Quốc hội Việt Nam. (2024). *Luật Phòng không nhân dân* (Luật số 49/2024/QH15).
- Rakha, T., & Gorodetsky, A. (2018). Review of unmanned aerial system (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. *Automation in Construction*, 93, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.028>
- Ravi, N., Gabeur, V., Hu, Y.-T., Hu, R., Ryali, C., Ma, T., Khedr, H., Rädle, R., Rolland, C., Gustafson, L., Mintun, E., Pan, J., Alwala, K. V., Carion, N., Wu, C.-Y., Girshick, R., Dollár, P., & Feichtenhofer, C. (2024). *SAM 2: Segment anything in images and videos* (arXiv:2408.00714). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.00714>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015)* (pp. 234–241). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- Savino, P., & Tondolo, F. (2025). Automated corrosion surface quantification in steel transmission towers using UAV photogrammetry and deep convolutional neural networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 40(13), 2050–2070. <https://doi.org/10.1111/mice.13434>
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Spencer, B. F., Jr., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection. *Journal of Structural Engineering*, 146(5), Article 04020073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535)

- Tang, Y., & Yang, W. (2025). A review: Research progress in bridge structural health monitoring from the perspective of AI development. *Structural Control and Health Monitoring*, 1, Article 8870840. <https://doi.org/10.1155/stc/8870840>
- Telecommunications Industry Association. (2022). *Structural standard for antenna supporting structures, antennas and small wind turbine support structures* (ANSI/TIA-222-1).
- Thủ tướng Chính phủ. (2020). *Quyết định về việc thiết lập khu vực cấm bay, khu vực hạn chế bay đối với tàu bay không người lái và các phương tiện bay siêu nhẹ* (Quyết định số 18/2020/QĐ-TTg).
- VNPT Đồng Tháp. (2023-2025). *Hồ sơ ảnh và tài liệu nội bộ về hệ thống trụ thu phát sóng thông tin di động trên địa bàn tỉnh Đồng Tháp* [Tài liệu nội bộ chưa xuất bản]. Viễn thông Đồng Tháp.
- Yeum, C. M., & Dyke, S. J. (2015). Vision-based automated crack detection for bridge inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(10), 759–770. <https://doi.org/10.1111/mice.12141>
- Zhao, Z.-Q., Zheng, P., Xu, S.-T., & Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 30(11), 3212–3232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865>
- Zhu, J., Zhang, C., Qi, H., & Lu, Z. (2020). Vision-based defects detection for bridges using transfer learning and convolutional neural networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(7), 1037–1049. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1680709>