

Phát triển thiết bị SHM sử dụng công nghệ SMT và tối ưu truyền dữ liệu dao động

Vũ Ngọc Quý, Lê Đăng Nam, Lại Liên Quân, Lê Xuân Lư, Nguyễn Thúy Bình, Đào Thanh Toàn*

Trường Đại học Giao thông Vận tải, 3 Cầu Giấy, phường Láng, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 13/1/2026; ngày chuyển phản biện 15/1/2026; ngày nhận phản biện 22/1/2026; ngày chấp nhận đăng 4/3/2026

Tóm tắt:

Bài báo này trình bày quá trình phát triển một thiết bị quan trắc sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring - SHM) sử dụng công nghệ hàn dán bề mặt (Surface Mount Technology - SMT) nhằm nâng cao độ ổn định, tính nhỏ gọn và khả năng ứng dụng thực tế của hệ đo. Thiết bị được thiết kế tích hợp cảm biến gia tốc, vi điều khiển và mô-đun truyền thông không dây, cho phép thu thập và truyền dữ liệu dao động của công trình về trạm trung tâm phục vụ giám sát và phân tích trạng thái kết cấu. Trên cơ sở đặc thù dữ liệu dao động và các ràng buộc của truyền thông không dây công suất thấp, bài báo tập trung nghiên cứu và tối ưu hóa cấu trúc gói truyền dữ liệu, đặc biệt là mối quan hệ giữa số lượng mẫu đo trong mỗi gói, số gói cần truyền và độ tin cậy truyền dẫn. Các thử nghiệm được thực hiện với nhiều kịch bản số lượng mẫu khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng của chiến lược đóng gói dữ liệu đến khả năng truyền nhận và tính toàn vẹn của dữ liệu đo. Kết quả cho thấy, việc tối ưu hóa gói truyền giúp cải thiện đáng kể hiệu quả truyền thông, giảm rủi ro mất dữ liệu và đáp ứng yêu cầu giám sát dao động trong các ứng dụng SHM không dây chi phí thấp.

Từ khóa: đo dao động kết cấu, sử dụng công nghệ hàn dán, thiết bị LoRa.

Chỉ số phân loại: 2.1, 2.11

Development of an SMT-based SHM device and optimisation of vibration data transmission packets

Ngoc Quy Vu, Dang Nam Le, Lien Quan Lai, Xuan Luu Le, Thuy Binh Nguyen, Thanh Toan Dao*

University of Transport and Communications, 3 Cau Giay Street, Lang Ward, Hanoi, Vietnam

Received 13 January 2026; revised 22 January 2026; accepted 4 March 2026

Abstract:

This article presents the development of a Structural Health Monitoring (SHM) device based on Surface Mount Technology (SMT) with the aim of improving system stability, compactness, and practical applicability. The device integrates an accelerometer sensor, a microcontroller, and a wireless communication module, enabling the acquisition and transmission of structural vibration data to a central station for structural monitoring and condition analysis. Considering the characteristics of vibration data and the constraints of low-power wireless communication, this study focuses on investigating and optimising the data packet structure, particularly the relationship between the number of measurement samples per packet, the number of transmitted packets, and transmission reliability. Experimental investigations were conducted under multiple sampling configurations to evaluate the impact of different data packetisation strategies on transmission performance and measurement data integrity. The results demonstrate that optimising the data packet structure significantly improves communication efficiency, reduces the risk of data loss, and meets the requirements for vibration monitoring in low-cost wireless SHM applications.

Keywords: LoRa-based device, structural vibration measurement, Surface Mount Technology.

Classification numbers: 2.1, 2.11

*Tác giả liên hệ: Email: daotoan@utc.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Trên thế giới, nghiên cứu và phát triển các hệ thống giám sát sức khỏe công trình (Structural Health Monitoring - SHM) đã và đang thu hút sự quan tâm lớn của cộng đồng khoa học. Nhiều phương pháp đã được đề xuất nhằm đánh giá tình trạng làm việc và mức độ suy giảm của công trình cầu, bao gồm các phương pháp truyền thống dựa trên thử nghiệm phá hủy để phân tích vết nứt, cũng như các phương pháp không phá hủy tiên tiến cho phép thu thập thông tin kết cấu mà không làm ảnh hưởng đến khả năng khai thác công trình [1, 2]. Các hệ thống SHM lần đầu tiên được nghiên cứu và triển khai từ đầu những năm 2000, với mục tiêu thu thập dữ liệu định lượng về đặc tính kết cấu và phát hiện sớm các dấu hiệu xuống cấp. Tuy nhiên, những hệ thống này vẫn đối mặt với nhiều thách thức, đặc biệt là khả năng duy trì hoạt động lâu dài và xử lý khối lượng dữ liệu lớn thu thập từ mạng cảm biến phân tán [3]. Trong số các phương pháp SHM không phá hủy, kỹ thuật xử lý ảnh [4] và đo sóng ứng suất [5] được sử dụng tương đối phổ biến nhằm nâng cao hiệu quả giám sát mà không gây gián đoạn giao thông. Dẫu vậy, phương pháp đo sóng ứng suất đòi hỏi phải lựa chọn thời điểm tiếp xúc phù hợp, gây hạn chế trong các ứng dụng quan trắc thường xuyên. Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ chip IoT cùng với sự phổ biến của các hệ thống Internet of Things đã mở ra hướng tiếp cận mới cho lĩnh vực quan trắc và giám sát sức khỏe công trình giao thông. Các hệ thống SHM dựa trên IoT cho phép triển khai các nút cảm biến nhỏ gọn, tiêu thụ năng lượng thấp và có khả năng kết nối linh hoạt trên phạm vi rộng [6]. Tuy nhiên, việc ứng dụng IoT trong quan trắc công trình vẫn gặp nhiều khó khăn liên quan đến thiết kế phần cứng, truyền thông không dây, nguồn cung cấp năng lượng, cũng như an toàn và bảo mật dữ liệu [7].

Tại Việt Nam, công tác quan trắc kết cấu công trình cầu mới chỉ được quan tâm trong những năm gần đây. Năm 2012, Bộ Giao thông Vận tải ban hành công văn số 2727/BGTVT-KCHT yêu cầu lắp đặt hệ thống quan trắc đối với cầu treo. Đến năm 2016, Bộ Xây dựng tiếp tục ban hành Thông tư 26/2016/TT-BXD, quy định các công trình cầu từ cấp I trở lên phải thực hiện quan trắc kết cấu trong quá trình khai thác. Mặc dù vậy, các nội dung liên quan đến thiết kế, lắp đặt, đo đạc, xử lý và phân tích dữ liệu vẫn chưa được quy định đồng bộ, dẫn đến những hạn chế trong triển khai thực tế. Trong bối cảnh đó, hệ thống quan trắc cầu không dừng đang nổi lên như một xu hướng phù hợp cho giám sát công trình giao thông hiện đại. Các hệ thống này cho phép thu thập dữ liệu kết cấu thông qua mạng cảm biến không dây mà không làm gián

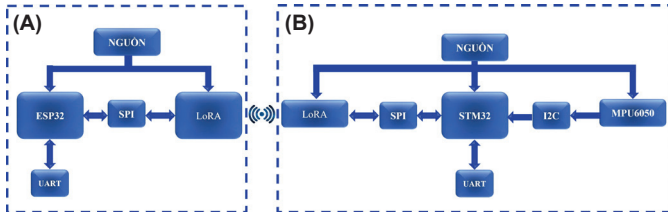
đoạn lưu thông, giảm nhân lực vận hành và tạo điều kiện cho việc xử lý dữ liệu tập trung. Kết hợp với các thuật toán trí tuệ nhân tạo, dữ liệu thu thập được có thể phục vụ đánh giá hiện trạng kết cấu, phát hiện bất thường và dự báo xu hướng hư hỏng trong tương lai. Trong những năm gần đây, một số nghiên cứu trong nước đã bước đầu triển khai các hệ thống quan trắc cầu không dây. Năm 2017, nhóm nghiên cứu tại Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh đã giới thiệu hệ thống quan trắc cho các cầu nhịp lớn như cầu Thuận Phước, cầu Bãi Cháy và cầu Rạch Miễu [1]. Năm 2020, nhóm nghiên cứu tại Trường Đại học Giao thông Vận tải đã đề xuất một hệ thống đo dao động cầu sử dụng cảm biến áp điện kết hợp truyền thông không dây Bluetooth [2]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo và IoT trong giám sát sức khỏe công trình cầu [8, 9]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình này mới chỉ dừng lại ở mức thử nghiệm các thành phần riêng lẻ hoặc triển khai các hệ thống có quy mô nhỏ, chưa hình thành được một giải pháp tích hợp hoàn chỉnh, từ cảm biến, phần cứng thu thập dữ liệu, truyền thông không dây đến xử lý và quản lý dữ liệu. Đặc biệt, tại Việt Nam, hiện còn rất ít nghiên cứu công bố về việc ứng dụng công nghệ truyền thông LoRa trong các hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu cầu, trong khi các giải pháp sử dụng Bluetooth, WiFi hoặc mạng di động 4G đã được đề cập tương đối phổ biến. Đồng thời, số lượng nghiên cứu đề cập đến việc áp dụng kỹ thuật hàn dán bề mặt (SMT) [10, 11] trong thiết kế, chế tạo bo mạch LoRa chuyên dụng cho SHM, cũng như thử nghiệm và tối ưu hóa gói truyền dữ liệu, vẫn còn hạn chế và chưa được hệ thống hóa một cách đầy đủ.

Xuất phát từ thực tiễn trên, bài báo này tập trung nghiên cứu thiết kế bộ thu phát dữ liệu không dây tiết kiệm năng lượng phục vụ ứng dụng giám sát sức khỏe công trình giao thông. Hệ thống được xây dựng dựa trên cảm biến gia tốc chi phí thấp kết hợp với mô-đun truyền thông không dây tầm xa, hướng tới thu thập hiệu quả dữ liệu dao động kết cấu. Khả năng đo lường của hệ thống được đánh giá thông qua thử nghiệm trên mô hình dầm công-xôn, trong đó, kết quả đo từ nút đo đề xuất được so sánh với cảm biến tham chiếu nhằm làm rõ độ tin cậy và tiềm năng ứng dụng trong thực tế.

2. Thiết kế hệ thống đo và thu phát dữ liệu không dây

Xuất phát từ các yêu cầu của hệ thống giám sát sức khỏe công trình giao thông, đặc biệt là quan trắc không dừng, tiêu thụ năng lượng thấp và khả năng triển khai linh hoạt, bài báo nghiên cứu và thiết kế một hệ thống thu thập và truyền dữ liệu dao động kết cấu không dây. Hệ

thống được xây dựng theo mô hình nút đo tích hợp, bao gồm các khối cảm biến, xử lý và truyền thông, nhằm đảm bảo hoạt động ổn định lâu dài với chi phí triển khai hợp lý. Phần này trình bày kiến trúc tổng thể và nguyên lý thiết kế các thành phần phần cứng chính, làm cơ sở cho các phân tích và kiểm chứng thực nghiệm ở các phần tiếp theo.



Hình 1. Sơ đồ khối phần cứng: (A) nút trung tâm, (B) nút cảm biến.

Sơ đồ khối ở hình 1 minh họa kiến trúc phần cứng của hệ thống, gồm hai phân hệ chính: nút cảm biến và nút trung tâm. Tại nút cảm biến, cảm biến gia tốc MPU6050 được sử dụng để thu thập tín hiệu dao động, dữ liệu được truyền đến vi điều khiển STM32 thông qua giao tiếp I2C. Vi điều khiển STM32 thực hiện cấu hình cảm biến, xử lý và đóng gói dữ liệu trước khi truyền không dây qua mô-đun LoRa bằng giao tiếp SPI. Ở nút trung tâm, mô-đun LoRa tiếp nhận dữ liệu và chuyển tới vi điều khiển ESP32, nơi dữ liệu được tiền xử lý và truyền lên máy tính thông qua cổng UART. Hai phân hệ được cấp nguồn độc lập, cho phép hệ thống mở rộng linh hoạt nhiều nút đo, phù hợp cho các ứng dụng quan trắc rung động kết cấu từ xa.

2.1. Mạch nút cảm biến

Cấu tạo chính của nút cảm biến được thể hiện trong hình 2. Mạch tại nút cảm biến được thiết kế nhằm thu thập dữ liệu gia tốc tại vị trí đo và truyền dữ liệu không dây về nút trung tâm.



Hình 2. Cấu tạo chính của nút cảm biến.

Cảm biến MPU6050 là cảm biến MEMS tích hợp gia tốc kế ba trục với một số thông số được thể hiện trong bảng 1. Nhờ kích thước nhỏ gọn, tiêu thụ năng lượng thấp và khả năng giao tiếp thông qua chuẩn I2C, MPU6050 đáp ứng tốt yêu cầu thu thập tín hiệu dao động trong các hệ thống đo và quan trắc rung động chi phí thấp. Ngoài ra, cảm biến cho phép cấu hình bộ lọc số thông thấp (DLPF), góp phần giảm nhiễu cao tần trong tín hiệu đo.

Bảng 1. Một số thông số chính của MPU6050.

STT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp hoạt động	3-5 V
2	Số bậc tự do	6 DOF
3	Dải đo gia tốc	$\pm 2 \text{ g}$, $\pm 4 \text{ g}$, $\pm 8 \text{ g}$, $\pm 16 \text{ g}$
4	Độ phân giải	16 bit
5	Tần số lấy mẫu tối đa	1 kHz
6	Giao tiếp	I2C
7	Dòng tiêu thụ	3,9 mA

Vi điều khiển STM32F101C6T6 được lựa chọn làm bộ xử lý trung tâm cho nút đo nhờ sử dụng nhân ARM Cortex-M3 32-bit, tần số hoạt động đạt đến 72 MHz và tích hợp đầy đủ các giao tiếp ngoại vi như I2C, SPI và UART. STM32F101C6T6 có khả năng xử lý dữ liệu cảm biến theo thời gian thực với mức tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp cho các nút đo phân tán. Việc kết hợp MPU6050 và STM32F101C6T6 thể hiện sự tương thích cao cả về mặt điện áp, giao thức truyền thông lẫn yêu cầu xử lý, cho phép xây dựng một nút thu thập dữ liệu nhỏ gọn và ổn định. Sau khi thu thập và xử lý sơ bộ dữ liệu gia tốc, vi điều khiển STM32 truyền dữ liệu tới mô-đun truyền thông không dây SX1278 thông qua giao tiếp SPI. SX1278 sử dụng công nghệ LoRa, cho phép truyền dữ liệu với khoảng cách xa và tiêu thụ công suất thấp, phù hợp cho các hệ thống thu thập dữ liệu không dây. Một số thông số cơ bản của LoRa được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số cơ bản của LoRa.

STT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp hoạt động	1,8-3,7V
2	Dải tần hoạt động	433 MHz (410-441 MHz)
3	Băng thông	7,8 kHz-500 kHz
4	Giao tiếp	SPI
5	Dòng tiêu thụ (khi thu)	10-12 mA
6	Dòng tiêu thụ (khi phát)	120 mA

Việc sử dụng giao tiếp SPI giúp đảm bảo tốc độ truyền ổn định và độ tin cậy cao giữa vi điều khiển và mô-đun truyền thông. Cấu trúc này cho phép tách biệt rõ ràng giữa khối thu nhận tín hiệu, khối xử lý và khối truyền thông, góp phần nâng cao khả năng mở rộng và tính linh hoạt của toàn bộ hệ thống.



Hình 3. Thiết kế 3D và mạch phần cứng nút cảm biến: (1) MPU6050, (2) STM32, (3) LoRa.

Hình 3 trình bày sản phẩm nút cảm biến được thiết kế và chế tạo trong nghiên cứu, bao gồm bản vẽ thiết kế 3D và mạch in thực tế sau khi lắp ráp hoàn chỉnh. Trong thiết kế bo mạch đề xuất, kỹ thuật hàn dán bề mặt không chỉ được sử dụng nhằm giảm kích thước và tăng mức độ tích hợp, mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát các tham số ký sinh, từ đó cải thiện chất lượng truyền dữ liệu của hệ thống LoRa.

Về mặt lý thuyết, điện dung ký sinh [12] giữa hai đường mạch song song có thể được xấp xỉ theo công thức (1):

$$C_m \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_r l w}{s} \quad (1)$$

trong đó: C_m là điện dung ký sinh giữa 2 đường mạch (F), $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m, ϵ_r là hằng số điện môi FR-4 ($\approx 4,2$), l là chiều dài đoạn song song (m), w là bề rộng đường mạch (m), s là khoảng cách giữa 2 đường mạch (m).

Từ biểu thức (2) cho thấy, điện dung ký sinh tỷ lệ thuận với chiều dài và độ rộng đường mạch, đồng thời tỷ lệ nghịch với khoảng cách giữa các đường mạch. Trên bo mạch STM32-LoRa được thiết kế, vi điều khiển STM32 và mô-đun LoRa được bố trí gần nhau, giúp rút ngắn đáng kể chiều dài các đường giao tiếp (SPI/UART). Đồng thời, các đường tín hiệu được bố trí với khoảng cách đủ lớn, nhờ đó làm giảm điện dung ký sinh và hạn chế nhiễu xuyên kênh do ghép điện dung.

Bên cạnh đó, điện cảm ký sinh [13] của đường mạch phụ thuộc chủ yếu vào chiều dài đường dây dẫn, có thể được ước lượng theo công thức (2):

$$L \approx 2 \times 10^{-7} l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + 0,5 \right] \quad (2)$$

trong đó: L là điện cảm ký sinh (H), l là chiều dài đường mạch (m), w là bề rộng đường mạch (m), t là độ dày đường mạch (m).

Do bo mạch sử dụng đồng chuẩn ($t \approx 35 \mu\text{m}$), tham số t gần như không thay đổi, trong khi chiều dài đường mạch l trở thành yếu tố chi phối.

Ngoài ra, để hạn chế nhiễu xuyên kênh giữa các đường tín hiệu, thiết kế PCB tuân thủ quy tắc 3W [14], theo đó khoảng cách giữa hai đường mạch liền kề được duy trì lớn hơn hoặc bằng ba lần độ rộng của đường mạch:

$$s \geq 3w \quad (3)$$

trong đó: s là khoảng cách giữa hai đường mạch tín hiệu liền kề, w là độ rộng của đường mạch.

Quy tắc này là một hướng dẫn thiết kế được chấp nhận rộng rãi trong lĩnh vực toàn vẹn tín hiệu, giúp giảm

đáng kể sự ghép điện dung và điện cảm giữa các đường tín hiệu song song. Việc tuân thủ quy tắc 3W được thể hiện trong hình 4 đặc biệt quan trọng đối với các hệ thống LoRa, do các tín hiệu truyền có công suất thấp và rất nhạy với nhiễu nền.



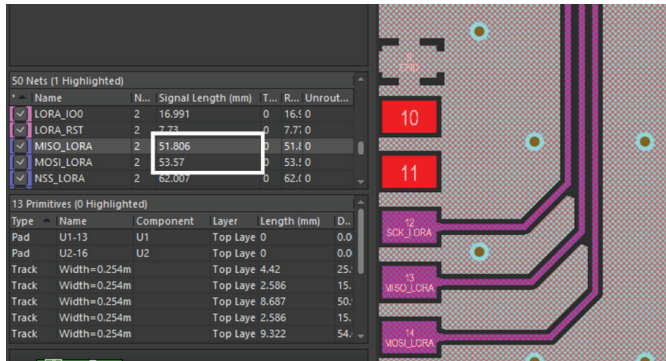
Hình 4. Đi dây dẫn theo nguyên tắc 3W (kích thước đường tín hiệu là 0,254 mm, khoảng cách 2 đường tín hiệu là 1,746 mm).

Trong hệ thống đề xuất, giao tiếp giữa vi điều khiển STM32 và mô-đun LoRa được thực hiện thông qua giao thức SPI, bao gồm các đường tín hiệu chính: SCK, MOSI, MISO và CS. Mặc dù tần số làm việc của SPI trong các ứng dụng LoRa chỉ ở mức vài MHz (1-8 MHz), các tín hiệu này vẫn có cạnh xung tương đối dốc do được điều khiển trực tiếp bởi chân GPIO của vi điều khiển. Do đó, về mặt toàn vẹn tín hiệu, các đường SPI không chỉ chịu ảnh hưởng bởi tần số làm việc mà còn bị chi phối mạnh bởi thời gian sườn lên của xung [15]. Mối liên quan giữa chiều dài của đường mạch và thời gian sườn lên của tín hiệu được thể hiện trong công thức (4):

$$l < \frac{t_r \cdot v}{10} \quad (4)$$

trong đó: l là chiều dài đường mạch, t_r là thời gian sườn lên của tín hiệu, v là vận tốc truyền tín hiệu trên PCB.

Với các vi điều khiển STM32, tín hiệu SPI được điều khiển trực tiếp bởi các chân GPIO CMOS có cạnh xung nhanh, với thời gian sườn lên điển hình nằm trong khoảng vài nanô giây, thường được xem xét trong khoảng 5-10 ns trong các phân tích toàn vẹn tín hiệu. Khi đó, chiều dài giới hạn để có thể bỏ qua hiệu ứng đường truyền là: $l < 7,5-15$ cm và được áp dụng như minh họa trong hình 5.



Hình 5. Chiều dài đi dây dẫn đường dữ liệu giao tiếp SPI.

Ngoài vấn đề tối ưu thiết kế, công suất tiêu thụ cũng là một vấn đề đáng được quan tâm đối với thiết bị phát triển. Công suất tiêu thụ chính của nút cảm biến khi hệ thống hoạt động được trình bày trong bảng 3. Kết quả cho thấy mô-đun truyền thông SX1278 ở chế độ truyền là thành phần tiêu thụ công suất lớn nhất, chiếm phần đáng kể trong tổng công suất của nút đo. Trong khi đó, vi điều khiển STM32F101C6T6 và cảm biến MPU6050 có mức công suất tiêu thụ tương đối thấp, phản ánh đặc tính phù hợp của các linh kiện này cho các ứng dụng quan trắc không dây dài hạn.

Bảng 3. Công suất tiêu thụ của nút cảm biến.

STT	Thành phần	Công suất (W)
1	STM32F101C6T6	0,099
2	MPU6050	0,013
3	SX1278 (chế độ truyền)	0,396
4	Phụ kiện: Led, transistor, điện trở...	~0,033
Tổng		0,54

2.2. Mạch trung tâm

Việc xây dựng nút trung tâm đóng vai trò quan trọng trong toàn bộ hệ thống thu phát dữ liệu không dây. Nút trung tâm có nhiệm vụ tiếp nhận dữ liệu dao động được truyền từ các nút cảm biến thông qua giao thức không dây, thực hiện tiền xử lý và chuyển tiếp dữ liệu lên máy tính phục vụ cho quá trình lưu trữ, phân tích và hiển thị kết quả được thể hiện trong hình 6.



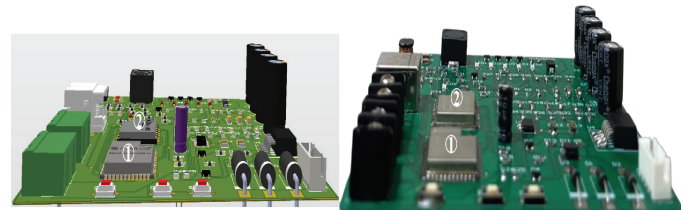
Hình 6. Cấu tạo chính của nút trung tâm.

Mô-đun LoRa tại mạch trung tâm nhận dữ liệu không dây từ các nút cảm biến và chuyển tiếp tới vi điều khiển ESP32 thông qua giao tiếp SPI. ESP32 đảm nhiệm vai trò xử lý cấp cao, cho phép lưu trữ hoặc truyền tiếp dữ liệu thông qua giao diện UART.

Bảng 4. Một số thông số của ESP32.

STT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp hoạt động	3,0-3,6 V
2	Bộ nhớ ROM	448 KB
3	SRAM	520 KB
4	Giao tiếp ngoại vi	SPI, I2C, UART
5	Dòng tiêu thụ	80-240 mA

Vi điều khiển ESP32 được lựa chọn nhờ khả năng xử lý mạnh, bộ nhớ lớn và tính linh hoạt cao, phù hợp cho việc mở rộng kết nối và xử lý dữ liệu ở mức hệ thống. Khối nguồn được thiết kế với hai tầng ổn áp nhằm đảm bảo độ ổn định cho các khối xử lý và truyền thông. Kiến trúc tách rời nút trung tâm - nút cảm biến cho phép hệ thống dễ dàng mở rộng số lượng nút đo mà không cần thay đổi cấu trúc phần cứng trung tâm. Sản phẩm mạch nút trung tâm được trình bày trong hình 7 với bản thiết kế 3D và mạch in sau khi lắp ráp hoàn chỉnh.



Hình 7. Thiết kế 3D và mạch phần cứng nút trung tâm: (1) ESP32, (2) LoRa.

Về cấu trúc phần cứng, mạch nút trung tâm tích hợp vi điều khiển ESP32 làm bộ xử lý chính, đảm nhiệm chức năng điều khiển, xử lý sơ bộ dữ liệu và giao tiếp với mô-đun truyền thông LoRa.

Bảng 5. Công suất tiêu thụ của nút trung tâm.

STT	Thành phần	Công suất (W)
1	ESP32-S3-WROOM	0,66
2	SX1278 (chế độ thu)	~0,04
3	Phụ kiện: Led, transistor, điện trở...	~0,07
Tổng		~0,77

Bảng 5 trình bày công suất tiêu thụ của các thành phần chính trong nút trung tâm khi hệ thống hoạt động ở chế độ thu dữ liệu. Kết quả cho thấy, nút trung tâm phù hợp triển khai trong các hệ thống quan trắc với nguồn cấp cố định hoặc nguồn cấp ngoài, đồng thời không gây ảnh hưởng đáng kể đến tổng năng lượng của toàn hệ thống.

3. Thử nghiệm

3.1. Thử nghiệm đo tần số dao động riêng của dầm công-xôn

Trong nghiên cứu này, thử nghiệm được thiết kế nhằm đánh giá khả năng đo dao động của hệ thống thu thập dữ liệu đề xuất. Cảm biến gia tốc ARF-10A được lựa chọn làm cảm biến tham chiếu với tham số thể hiện trong bảng 6, sử dụng để đo dao động của dầm công-xôn. Trên cùng đối tượng thử nghiệm, cảm biến gia tốc MPU6050 được sử dụng để thu thập dữ liệu dao động nhằm phục vụ mục đích so sánh. Thông qua việc đối chiếu kết quả đo giữa cảm biến tham chiếu và cảm biến MPU6050, nghiên cứu nhằm đánh giá bước đầu khả năng đo dao động và tính phù hợp của cảm biến MPU6050.

Bảng 6. Thông số của cảm biến tham chiếu ARF-10A.

STT	Thông số	Giá trị
1	Điện áp hoạt động	2-5 V
2	Phạm vi đo	10 m/s ²
3	Tần số riêng	100 Hz
4	Sai số phi tuyến	1%R0
5	Trở kháng vào/ra	120 Ω

Hình 8 trình bày bố trí thí nghiệm đo dao động dầm công-xôn và kiểm chứng hệ thống thu thập dữ liệu. Dầm công-xôn được chế tạo từ vật liệu thép có chiều dài 740

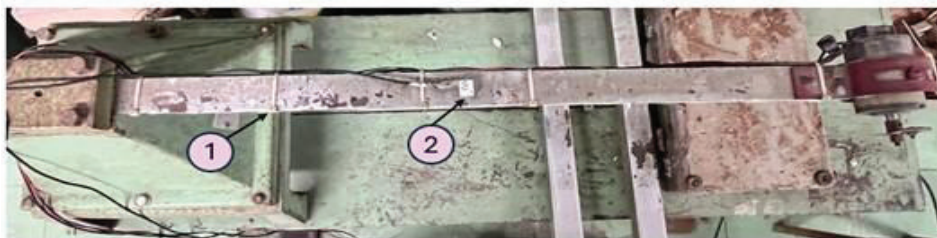
mm, rộng 40 mm, dày 8,24 mm, tải gắn tại đầu tự do của dầm là 1 kg. Theo lý thuyết Euler-Bernoulli [16] tần số dao động riêng bậc n được tính theo công thức (5):

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (5)$$

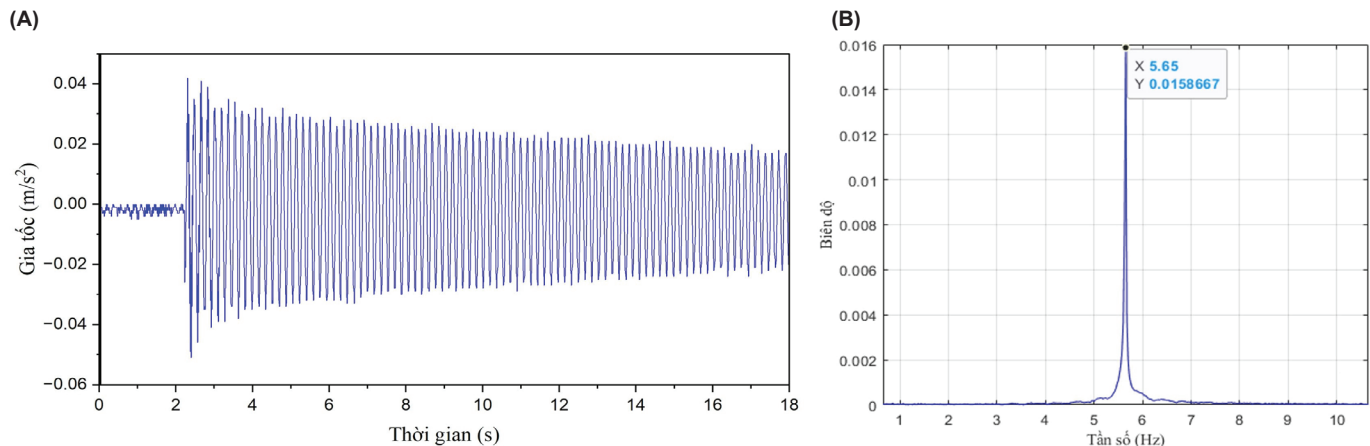
trong đó: E là mô đun đàn hồi của vật liệu (Pa) ($E=2,1 \times 10^{11} \rho A$), $I=\frac{bh^3}{12}$ là mô men quán tính tiết diện, b là độ rộng của dầm, h là độ dày của dầm, $A=b.h$ là diện tích tiết diện (m²), ρ là khối lượng riêng (kg/m³) ($\rho=7850 \text{ kg/m}^3$), L là chiều dài dầm (m), β_n là hệ số phụ thuộc điều kiện biên ($\beta_n=1,875$ với dầm 1 bậc tự do).

Từ công thức (5) và giá trị của các tham số trên, tính toán được tần số dao động riêng của dầm công-xôn là $f_n \approx 7,10 \text{ Hz}$.

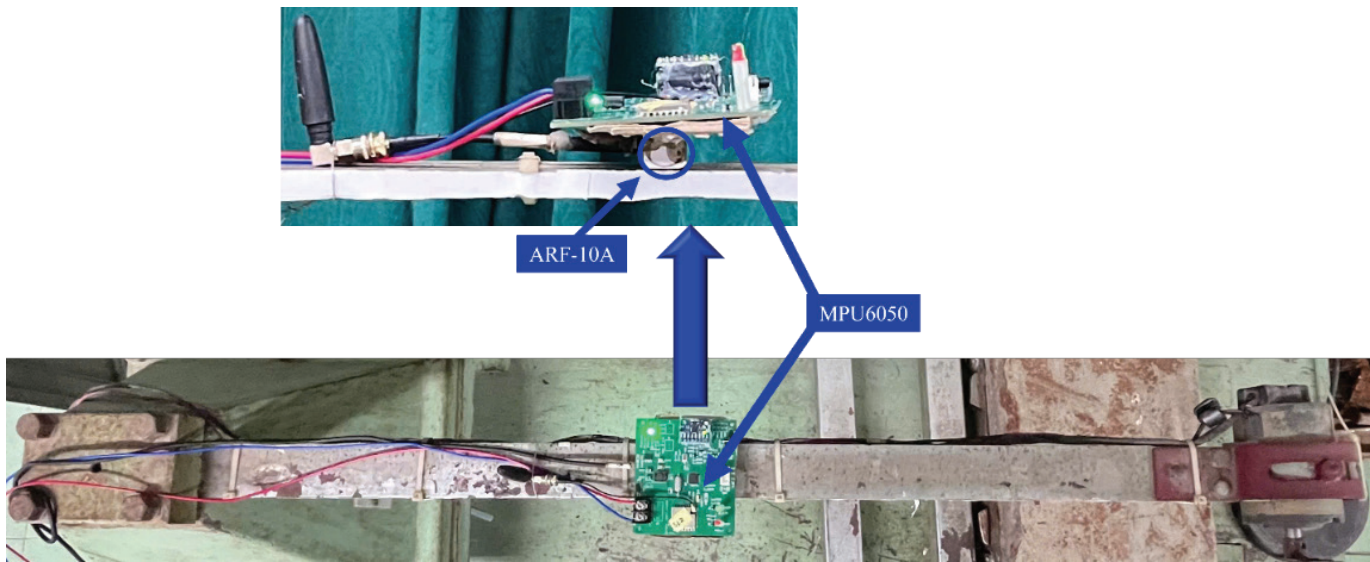
Kết quả đo dao động của dầm công-xôn thu được từ cảm biến gia tốc ARF-10A được thể hiện trong hình 9. Hình 9A cho thấy tín hiệu gia tốc theo miền thời gian sau khi kích thích, trong đó dao động thể hiện dạng dao động tắt dần đặc trưng của hệ kết cấu đàn hồi. Biên độ dao động ban đầu tương đối lớn và giảm dần theo thời gian, phản ánh quá trình tiêu tán năng lượng của hệ. Phổ tần số tương ứng được trình bày trong hình 9B, trong đó xuất hiện một đỉnh phổ nổi trội tại tần số xấp xỉ 5,65 Hz tương ứng với dạng dao động cơ bản.



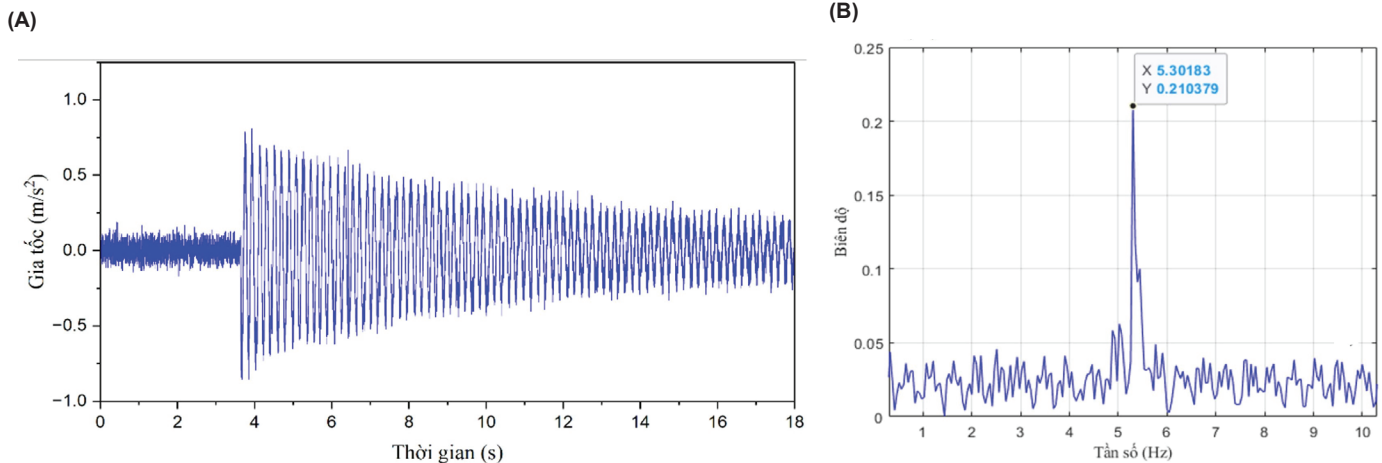
Hình 8. Bố trí thí nghiệm đo dao động sử dụng cảm biến tham chiếu: (1) Dầm công-xôn, (2) Cảm biến gia tốc ARF-10A, (3) Bộ xử lý dữ liệu SDA 830C, (4) Máy tính xử lý và hiển thị kết quả.



Hình 9. Kết quả đo dao động dầm công-xôn sử dụng cảm biến ARF-10A: (A) biểu diễn trên miền thời gian, (B) biểu diễn trên miền tần số.



Hình 10. Bố trí thí nghiệm sử dụng cảm biến MPU6050.



Hình 11. Kết quả đo khi sử dụng cảm biến MPU6050: (A) biểu diễn trên miền thời gian, (B) biểu diễn trên miền tần số.

Hình 10 minh họa bố trí thí nghiệm trong đó cảm biến tham chiếu ARF-10A và cảm biến MPU6050 được lắp đặt đồng vị trí trên dầm công-xôn. Thông qua việc đối chiếu tín hiệu thu được từ hai cảm biến, nghiên cứu đánh giá khả năng đo dao động và xác định tần số dao động riêng sử dụng cảm biến MPU6050 so với cảm biến tham chiếu, làm cơ sở xem xét tính phù hợp của cảm biến chi phí thấp trong các ứng dụng quan trắc dao động kết cấu.

Kết quả đo dao động của dầm công-xôn thu được từ cảm biến gia tốc MPU6050 được tích hợp trên nút đo đề xuất thể hiện trên hình 11. Hình 11A thể hiện tín hiệu gia tốc biểu diễn trên miền thời gian, trong đó dao động sau khi kích thích có dạng dao động tắt dần rõ rệt, tương tự đặc trưng thu được từ cảm biến tham chiếu. Biên độ tín hiệu giảm dần theo thời gian, phản ánh quá trình suy giảm năng lượng dao động của hệ kết cấu. Phổ tín hiệu biểu diễn trên miền tần số được trình bày trong hình

11B, trong đó xuất hiện một đỉnh phổ trội tại tần số xấp xỉ 5,30 Hz. Giá trị này tương đồng với tần số dao động riêng của kết cấu thu được từ cảm biến tham chiếu ARF-10A. Cảm biến ARF-10A do Công ty Tokyo Measuring Instruments Laboratory (Nhật Bản) sản xuất là cảm biến thương mại được sử dụng rộng rãi trong các hệ đo dao động kỹ thuật, đặc biệt là đối với SHM.

Bảng 7. So sánh kết quả tần số dao động riêng.

Phương pháp đo/tính toán	Tần số riêng (f_n) (Hz)	Sai số tương đối so với ARF-10A (%)	Ghi chú
Cảm biến thương mại ARF-10A	5,65		Kết nối có dây
MPU6050	5,30	6,19	Truyền nhận không dây
Lý thuyết Euler-Bernoulli	7,10	25,66	Tính toán theo công thức

Kết quả đạt được trong bảng 7 cho thấy, giá trị tần số dao động riêng thu được từ cảm biến thương mại ARF-10A là 5,65 Hz, được xem là giá trị tham chiếu có độ tin cậy cao. Cảm biến ARF-10A đã được hiệu chuẩn và sử dụng phổ biến trong các hệ đo dao động kỹ thuật. Hệ thống đo đề xuất sử dụng cảm biến MPU6050 cho kết quả 5,30 Hz, tương ứng với sai số tương đối 6,19%, nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với một cảm biến MEMS chi phí thấp kết hợp truyền dữ liệu không dây. Kết quả này cho thấy, thiết bị phát triển có khả năng xác định tần số dao động riêng của kết cấu với độ chính xác chấp nhận được. Trong khi đó, giá trị tần số riêng tính toán theo mô hình dầm Euler-Bernoulli là 7,10 Hz, cao hơn đáng kể so với kết quả thực nghiệm. Sự sai lệch này chủ yếu xuất phát từ các giả thiết lý tưởng của mô hình lý thuyết, bao gồm điều kiện ngàm tuyệt đối, phân bố khối lượng đồng đều và không xét đến ảnh hưởng của khối lượng cảm biến cũng như hệ giá lắp trên dầm. Ngoài ra, các yếu tố như suy giảm năng lượng do ma sát tại ngàm, độ không đồng nhất vật liệu và sai lệch hình học của dầm thực nghiệm cũng góp phần làm giảm tần số dao động đo được so với giá trị tính toán. Do đó, sự chênh lệch giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm là phù hợp với điều kiện thí nghiệm thực tế và thường gặp trong các nghiên cứu dao động kết cấu. Việc so sánh với cảm biến thương mại ARF-10A và kết quả tính toán lý thuyết cho thấy sai khác nằm trong phạm vi phù hợp với điều kiện thí nghiệm thực tế. Các kết quả này khẳng định tính khả thi của giải pháp đề xuất và là cơ sở để xem xét ứng dụng hệ thống trong các bài toán giám sát sức khỏe kết cấu cầu giao thông theo hướng không dây và tiết kiệm năng lượng.

3.2. Thử nghiệm thu phát tín hiệu không dây

Theo khuyến nghị của nhà sản xuất, các tham số truyền của mô-đun LoRa được cấu hình trong dải giá trị sau: hệ số trải phổ (Spreading Factor - SF) trong khoảng từ 7 đến 12; băng thông (Bandwidth - BW) gồm các mức 125 kHz, 250 kHz và 500 kHz; tỷ lệ mã hóa (Coding Rate - CR) có các giá trị từ 4/5 đến 4/8. Trong nghiên cứu này, bộ tham số được lựa chọn nhằm cân bằng giữa tốc độ truyền, thời gian chiếm kênh và độ tin cậy truyền dẫn, phù hợp với đặc thù dữ liệu dao động trong ứng dụng quan trắc sức khỏe kết cấu. Do đó, trong các thí nghiệm mô-đun LoRa được cấu hình với các tham số SF=7, BW=250 kHz, và CR=4/5. Khoảng cách thu phát không dây được thiết lập trong phạm vi phòng thí nghiệm xấp xỉ 5m. Trong hệ thống đề xuất, dữ liệu đo dao động được đóng gói theo từng khối gồm nhiều mẫu liên tiếp nhằm giảm số lượng gói truyền của giao thức LoRa. Mỗi mẫu dữ liệu được mã hóa ở dạng số nguyên 16 bit (2B). Với N mẫu dữ liệu trong mỗi gói, kích thước gói tin của gói LoRa có thể được biểu diễn xấp xỉ là:

$$P \approx 2N+1 \quad (6)$$

trong đó: P: Kích thước gói tin, 1B được sử dụng cho mã định danh gói tin.

Kích thước gói tin ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian chiếm kênh của mỗi lần truyền.

Thời gian chiếm kênh truyền của gói dữ liệu được tính toán theo công thức [15]:

$$T_{ToA} = T_{preamble} + T_{payload} \\ = \frac{2^{SF}}{BW} (n_{preamble} + PLSymb + 4,25) \quad (7)$$

trong đó: T_{ToA} : (Time-on-Air) là thời gian chiếm kênh truyền, $T_{preamble}$ là thời gian truyền chuỗi đồng bộ ở đầu gói tin, $n_{preamble}$ là độ dài chuỗi đồng bộ, $T_{payload}$ là thời gian truyền dữ liệu hữu ích của gói tin, $PLSymb$ là số symbol tương ứng với dữ liệu hữu ích, SF: là hệ số trải phổ, có giá trị từ 7-12, BW: là băng thông có giá trị 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz.

Công thức (7) cho thấy thời gian chiếm kênh truyền phụ thuộc trực tiếp vào hệ số trải phổ SF và băng thông BW trong quá trình truyền. SF càng nhỏ sẽ làm giảm thời gian chiếm kênh truyền, đồng thời BW càng lớn thì thời gian chiếm kênh truyền càng giảm, nhưng điều này lại làm giảm độ nhạy.

Dưới giả thiết các sự kiện gây lỗi xảy ra ngẫu nhiên theo thời gian [15], xác suất lỗi gói có thể được mô hình hóa dựa trên quá trình Poisson. Theo đó, xác suất xảy ra ít nhất một lỗi trong khoảng thời gian truyền của một gói dữ liệu được biểu diễn xấp xỉ bởi:

$$PER = 1 - e^{-\lambda T_{ToA}} \quad (8)$$

trong đó: T_{ToA} là thời gian chiếm kênh truyền, λ là cường độ xuất hiện lỗi gói do kênh truyền, PER là xác suất gói tin bị lỗi, e là hằng số Euler.

Mặc dù công nghệ LoRa cho phép kích thước gói tối đa lên tới 255B, việc sử dụng gói dữ liệu có kích thước lớn không đồng nghĩa với độ tin cậy truyền cao hơn. Trong nghiên cứu này, mỗi gói dữ liệu được thiết kế để chứa 40 mẫu, với mỗi mẫu được mã hóa trên 16 bit, dẫn đến kích thước gói tin khoảng 81B (theo công thức (6)). So với phương án truyền số lượng mẫu lớn hơn, gói 40 mẫu có tổng số bit và thời gian chiếm kênh thấp hơn đáng kể. Bên cạnh đó, trong hệ thống quan trắc dao động cầu, dữ liệu không yêu cầu phản hồi thời gian thực nghiêm ngặt mà cần đảm bảo tính liên tục, ổn định và độ tin cậy dài hạn. Với gói dữ liệu 40 mẫu, hệ thống đạt được sự cân bằng hợp lý giữa kích thước gói, độ trễ truyền và xác suất lỗi, trong khi vẫn duy trì tốc độ cập nhật dữ liệu phù hợp

cho phân tích dao động. Do vậy, lựa chọn 40 mẫu trong mỗi gói dữ liệu được xem là phương án tối ưu, giúp nâng cao độ tin cậy truyền thông LoRa và đảm bảo hiệu quả tổng thể của hệ thống quan trắc dao động cầu. Tổng thời gian truyền nhận dữ liệu cho một gói tin xấp xỉ 100 ms (bao gồm thời gian chiếm kênh truyền, thời gian xử lý dữ liệu của vi điều khiển và thời gian truyền số liệu lên máy tính).

Bảng 8. Một số kịch bản thí nghiệm truyền gói dữ liệu.

STT	Số lượng mẫu	Số lượng gói	Kích thước dữ liệu (B)	Thời gian trễ (ms)	Thời gian chiếm kênh truyền (ms)	Tổng thời gian truyền nhận dữ liệu (ms)
1	1800	45	3645	90	4050	4500
2	1200	30	2430	60	2700	3000
3	800	20	1620	40	1800	2000
4	400	10	810	20	900	1000
5	200	5	405	10	450	500

Bảng 8 trình bày một số kịch bản thí nghiệm tương ứng với các cấu hình số lượng mẫu và số lượng gói dữ liệu được truyền qua LoRa. Các kịch bản này cho phép đánh giá ảnh hưởng của số lượng gói truyền đến tổng thời gian truyền - nhận dữ liệu, độ trễ và hiệu quả giám sát trong hệ thống quan trắc sức khỏe công trình. Tuy nhiên, việc tiếp tục giảm số mẫu xuống 200 tuy giúp rút ngắn thời gian truyền nhưng làm giảm đáng kể lượng thông tin dao động thu được cho mỗi phiên đo. Phương án truyền 400 mẫu đạt được sự cân bằng hợp lý giữa độ tin cậy truyền dẫn, độ trễ và chất lượng dữ liệu đo.

Độ tin cậy truyền gói tin được tính toán theo công thức [17]:

$$R = 1 - PER = e^{-\lambda T_{ToA}} \quad (9)$$

Với các kịch bản truyền dữ liệu được thực hiện trong cùng điều kiện môi trường và cấu hình LoRa, giá trị tham số λ thu được là xấp xỉ nhau. Do đó, trong phạm vi nghiên cứu này, xác suất phát sinh lỗi gói tin chủ yếu phụ thuộc vào thời gian chiếm kênh truyền của gói dữ liệu và cũng là yếu tố ảnh hưởng chính đến độ tin cậy truyền tin. Từ công thức (9) cho thấy thời gian chiếm kênh truyền càng lớn thì độ tin cậy càng giảm. Dưới góc độ giám sát sức khỏe công trình cầu, số lượng 400 mẫu dao động trong một chu kỳ đo là hoàn toàn đủ để trích xuất các tham số động lực học đặc trưng như biên độ dao động, tần số riêng và xu hướng biến đổi theo thời gian. Đồng thời, việc giới hạn số lượng gói ở mức 10 giúp hệ thống duy trì độ trễ thấp, thời gian truyền ngắn và mức độ ổn định cao hơn, đặc biệt là tăng độ tin cậy truyền dữ liệu.

3.3. So sánh hệ thống đề xuất với các nghiên cứu gần đây về SHM

Bảng 9. So sánh kết quả đạt được của hệ thống đề xuất với một số nghiên cứu trong và ngoài nước.

Bài báo	Năm	Đối tượng đo	Phương thức truyền dữ liệu	Tần số dao động riêng (Hz)	Sai số tương đối (%)
[2]	2020	Cầu Lam Kinh	Không dây (Bluetooth)	5,43	<5
[18]	2022	Cầu đường sắt	Có dây	2,48	3,13
[19]	2023	Mô hình dầm gỗ kê 2 gối	Có dây (Ethernet)	4,70	-
[20]	2024	Thanh dầm nhôm	Có dây	5,24	11,8
[21]	2025	Cầu Swarnamukhi	Không dây (WiFi)	3,40-4,73	-
Hệ thống đề xuất		Dầm công-xôn	Không dây (LoRa)	5,30	6,19

Bảng 9 tổng hợp các nghiên cứu gần đây về đo tần số dao động riêng của kết cấu, cho thấy các đối tượng đo từ mô hình dầm thí nghiệm đến cầu thực tế, với tần số đặc trưng chủ yếu trong khoảng 2,48-5,43 Hz. Các hệ đo có dây và không dây tầm ngắn cho sai số tương đối nhỏ trong điều kiện thí nghiệm, trong khi các nghiên cứu sử dụng truyền không dây trên công trình thực vẫn còn hạn chế về đánh giá sai số định lượng. Nói chung, các hệ đo sử dụng cảm biến chi phí thấp có thể ước lượng tần số dao động riêng (f_n) của rung động kết cấu với sai số trong giới hạn cho phép, tạo cơ sở cho việc phát triển các hệ quan trắc không dây trong SHM.

4. Kết luận và khuyến nghị

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện trên mô hình dầm công-xôn nhằm kiểm chứng bước đầu khả năng thu thập dao động và truyền dữ liệu không dây của hệ thống đề xuất. Hướng tiếp cận này cho phép đánh giá các đặc tính cơ bản của phần cứng và cách tiếp cận đóng gói dữ liệu trong môi trường có kiểm soát. Trên cơ sở đó, đánh giá được hiệu quả của hệ thống đề xuất trong giám sát sức khỏe kết cấu công trình. Tuy nhiên, điều kiện thí nghiệm chưa phản ánh đầy đủ các yếu tố phức tạp của môi trường khai thác thực tế, tải trọng giao thông ngẫu nhiên, nhiễu môi trường và suy hao truyền thông. Đây cũng là một hướng tiếp cận mà nhóm nghiên cứu dự kiến triển khai trong các nghiên cứu tiếp theo.

Kết quả nghiên cứu cho thấy, hệ thống quan trắc sức khỏe kết cấu không dây được đề xuất bước đầu đáp ứng yêu cầu thu thập và truyền dữ liệu dao động trong điều kiện quan trắc không dừng, đồng thời đảm bảo mức tiêu

thụ năng lượng và chi phí triển khai phù hợp. Việc áp dụng công nghệ hàn dán SMT trong thiết kế mạch góp phần giảm các tham số ký sinh, hạn chế nhiễu giữa các khối chức năng và nâng cao độ ổn định của hệ thống. Kiến trúc phân tách giữa nút cảm biến và nút trung tâm giúp tối ưu chức năng từng phân hệ, tạo điều kiện thuận lợi cho triển khai và mở rộng hệ thống. Bên cạnh thiết kế phần cứng, nghiên cứu đã đề xuất giải pháp tối ưu hóa cấu trúc gói truyền dữ liệu dao động nhằm cân bằng giữa số lượng mẫu đo, số gói truyền và độ tin cậy truyền thông. Kết quả cho thấy việc lựa chọn gói truyền hợp lý giúp giảm thời gian chiếm kênh và nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu trong các hệ SHM không dây công suất thấp. Trong thời gian tới, nghiên cứu sẽ được mở rộng theo hướng triển khai thử nghiệm trên công trình thực tế, kết hợp với các chiến lược quản lý năng lượng và phân tích dữ liệu nâng cao nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng của hệ thống.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2026-TTKHCN-003TĐ. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D.T. Nguyen, T.H. Ho, N.N.N. Tran (2017), "Structural health monitoring system for long-span bridge", *Thu Dau Mot University Journal of Science*, **1(32)**, pp.38-48 (in Vietnamese).
- [2] T.T. Dao (2020), "Wireless Daq using piezoelectric sensor for vibration measurement of bridge structure", *Transport and Communications Science Journal*, **71(2)**, pp.135-144 (in Vietnamese).
- [3] A.K. Roopa, A.M. Hunashyal (2022), "Development and implementation of cement-based nanocomposite sensors for structural health monitoring applications: Laboratory investigations and way forward", *Sustainability*, **14(19)**, DOI: 10.3390/su15118932.
- [4] H. Taheri, M.G. Bocanegra, M. Taheri (2022), "Artificial intelligence, machine learning and smart technologies for nondestructive evaluation", *Sensors*, **22(11)**, pp.853-881, DOI: 10.3390/s22114055.
- [5] P.K. Geetha (2018), "Thickness estimation and crack detection in concrete using impact-echo technique", *Int. Res. J. Eng. Technol.*, **5(2018)**, pp.2345-2348.
- [6] M. Mishra, P.B. Lourenço, G.V. Ramana (2022), "Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review", *Journal of Building Engineering*, **48**, DOI: 10.1016/j.jobte.2021.103954.
- [7] S. Bhatta, J. Dang (2024), "Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: A state-of-the-art review", *Bhatta and Dang Urban Lifeline*, **2**, DOI: 10.1007/s44285-024-00031-2.
- [8] A.M. Khan, K.A. Alrasheed, A. Waqar, et al. (2024), "Internet of things (IoT) for safety and efficiency in construction building site operations", *Scientific reports*, **14(1)**, DOI: 10.1038/s41598-024-78931-0.
- [9] N.Q. Vu, V.H. Nguyen, D.T. Tran (2023), "Combination of gnss, accelerometer sensor, and IoT solution in bridge realtime monitoring", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, **17(4V)**, pp.139-151.
- [10] S. Gopal, J.M. Rohani, Z.A. Bakar (2005), "Optimization of solder paste printing parameters using design of experiments (DOE)", *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, **43(A)**, pp.11-20.
- [11] M.T. Le, T.C.D. Doan (2025), "MCDM Solutions for complex SMT process optimization: A comprehensive approach", *Journal of Technical Education Science*, **20(04SI)**, pp.172-182.
- [12] D.M. Pozar (2011), "Transmission line theory", *Microwave Engineering (4th Ed.)*, Wiley, 603pp.
- [13] F.W. Grover (2013), *Inductance Calculations*, Dover Publications, USA, 304pp.
- [14] Eric Bogatin (2018), *Signal and Power Integrity - Simplified*, Prentice Hall, 958pp.
- [15] U. Noreen, A. Bounceur, L. Clavier (2017), "A study of LoRa low power and wide area network technology", *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, IEEE, pp.1-6.
- [16] H. Bilge, Ö.K. Morgül (2023), "Analytical and experimental investigation of the rotary inertia effects of unequal end masses on transverse vibration of beams", *Applied Sciences*, **13(4)**, DOI: 10.3390/app13042518.
- [17] C.E. Ebeling (2019), "Constant failure rate model", *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering (3rd Ed.)*, Waveland Press, 658pp.
- [18] M. Venglár, K. Lamperová, M. Sokol (2022), "Performance assessment of steel truss railway bridge with curved track", *Acta Polytechnica*, **62(5)**, pp.558-566.
- [19] M. Sakr, A. Sadhu (2023), "Visualization of structural health monitoring information using Internet-of-Things integrated with building information modeling", *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, **2(3)**, DOI:10.1016/j.iintel.2023.100053.
- [20] T.J. Saravanan, M. Mishra, A.D. Aherwar, et al. (2024), "Internet of things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures", *Innovative Infrastructure Solutions*, **9(4)**, DOI: 10.1007/s41062-024-01413-9.
- [21] K.A. Latha, K. Narasimhulu (2025), "MEMs-enabled vibration monitoring and diagnostic evaluation for long-term health assessment of Swarnamukhi and Bhakta kannappa sethu bridges in srikalahasti", *Archives for Technical Sciences/ Arhiv za Tehnicke Nauke*, **33**, pp.135-153, DOI: 10.70102/afts.2025.1833.135.