



## DEVELOPMENT OF SHM DEVICE USING ESP32 SEMICONDUCTOR CHIP AND 4G-LTE TECHNOLOGY

Pham Van Hai<sup>1,2</sup>, Nguyen Duy Anh<sup>1</sup>, Dao Thanh Toan<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Hanoi Open University, Building B101, Nguyen Hien Street, Bach Khoa Ward, Hai Ba Trung District, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/05/2025

Revised: 09/06/2025

Accepted: 10/06/2025

Published online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.1>

\* *Corresponding author*

Email: daotoan@utc.edu.vn

**Abstract.** Structural Health Monitoring (SHM) plays a key role in long-term maintenance of infrastructure. With the aim of contributing to the construction of an economical alternative to the high-cost commercial SHM systems. Based on the analysis of feasible hardware structures, in this paper, the authors present a process of designing and fabricating a low-cost, wireless structural vibration monitoring system using the MEMS MPU-6050 accelerometer, ESP32 chip integrated with 4G mobile communication module SIM7600CE. The device is aimed to measure the acceleration of the structure in the Z direction, processing the preliminary data on ESP32 and transmitting the data in real time via 4G connection. Tests taken on laboratory were conducted on steel beams to evaluate the performance of data collection. Comparison with commercial measurement systems was also conducted. The results show that, although this low-cost system still has some limitations compared to dedicated systems in terms of data accuracy, long-term reliability, the SHM device can be used for research, education or in cases where high accuracy is not required.

**Keywords:** Structural Health Monitoring (SHM), Vibration Monitoring, MPU-6050, ESP32 Chip, SIM7600CE, IoT in Construction, 4G.



## PHÁT TRIỂN THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ SHM SỬ DỤNG CHIP BÁN DẪN ESP32 VÀ CÔNG NGHỆ 4G-LTE

Phạm Văn Hải<sup>1,2</sup>, Nguyễn Duy Anh<sup>1</sup>, Đào Thanh Toán<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Bộ môn Kỹ thuật điện tử, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Mở Hà Nội, Nhà B101, phố Nguyễn Hiền, phường Bách Khoa, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/05/2025

Ngày nhận bài sửa: 09/06/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/06/2025

Ngày xuất bản Online: 15/06/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.5.1>

\* Tác giả liên hệ

Email: daotoan@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Giám sát sức khỏe kết cấu (SHM) đóng vai trò then chốt trong bảo trì công trình hạ tầng dài hạn. Với mục tiêu góp phần xây dựng một giải pháp thay thế kinh tế cho các hệ thống SHM thương mại có giá thành cao. Trên cơ sở phân tích cấu tạo phần cứng khả thi, trong bài báo này, tác giả trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế và chế tạo một hệ thống giám sát dao động kết cấu xây dựng không dây, chi phí thấp, sử dụng cảm biến gia tốc MEMS MPU-6050, chip ESP32 tích hợp module truyền thông di động 4G SIM7600CE. Thiết bị được thiết kế để đo lường gia tốc dao động của kết cấu theo phương Z, xử lý dữ liệu sơ bộ trên ESP32 và truyền dữ liệu theo thời gian thực thông qua kết nối 4G. Các thử nghiệm được thực hiện trên dầm thép trong phòng thí nghiệm để đánh giá hiệu năng thu thập dữ liệu đo. Đối sánh với hệ đo thương mại cũng được tiến hành và so sánh. Kết quả chỉ ra rằng, mặc dù hệ thống chi phí thấp này còn tồn tại những hạn chế so với hệ thống chuyên dụng về độ chính xác dữ liệu, độ tin cậy dài hạn, thiết bị SHM có tiềm năng ứng dụng trong các trường hợp không yêu cầu độ chính xác cao hoặc làm công cụ nghiên cứu, giáo dục.

**Từ khóa:** Giám sát sức khỏe kết cấu (SHM), giám sát dao động, MPU-6050, chip ESP32, SIM7600CE, IoT trong xây dựng, 4G

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự an toàn và hiệu suất hoạt động của các kết cấu xây dựng cầu, tòa nhà cao tầng, đập, đường hầm... là mối quan tâm hàng đầu trong kỹ thuật xây dựng công trình [1,2]. Trải qua thời gian sử dụng, các kết cấu này chịu tác động của tải trọng tĩnh và động như gió, giao thông, địa chấn, dẫn đến sự suy giảm về chất lượng và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn. Giám sát sức khỏe kết cấu SHM (Structural Health Monitoring) là lĩnh vực ứng dụng các kỹ thuật đo lường và phân tích dữ liệu để đánh giá tình trạng hiện tại của kết cấu, phát hiện sớm các hư hỏng, dự báo khả năng chịu lực còn lại và đưa ra cảnh báo khi cần thiết [3-8]. Dưới tác động của tải trọng kích thích vào kết cấu, tín hiệu dao động cơ được chuyển đổi thành tín hiệu điện tử tương tự thông qua cảm biến gia tốc. Từ tín hiệu dao động này, các đặc trưng dao động như tần số riêng, dạng dao động và hệ số tắt dần có mối liên hệ chặt chẽ với các đặc tính vật lý của kết cấu: độ cứng, khối lượng, hệ số tắt dần. Sự thay đổi của các đặc trưng này theo thời gian hoặc dưới tác động của tải trọng có thể là dấu hiệu của sự xuống cấp hoặc hư hỏng. Tại Việt Nam, SHM đã được sử dụng gần đây trong một số công trình trọng điểm như [3-6]:

- Tại nhà cao tầng và tòa nhà quan trọng: Một số công trình cao tầng ở TP.HCM và Hà Nội như Landmark 81, Keangnam Tower đã áp dụng hệ thống SHM do yêu cầu kiểm định an toàn động đất và gió;

- Cho công trình thủy lợi và đập lớn: Một số đập thủy điện lớn như Hòa Bình, Sơn La, Lai Châu đã lắp đặt cảm biến đo áp lực nước, biến dạng thân đập và rung địa chấn;

- Cho đường sắt đô thị và metro: Tuyến Metro số 1 TP.HCM (Bến Thành – Suối Tiên) có sử dụng hệ thống cảm biến để giám sát rung động và lún tại các đoạn hầm và cầu cạn trong giai đoạn thử nghiệm;

- Cho các cầu lớn: Cầu Mỹ Thuận, Cầu Cần Thơ, Cầu Rạch Miễu và Cầu Nhật Tân đã được nghiên cứu hoặc triển khai hệ thống SHM với các cảm biến đo dao động, biến dạng, nhiệt độ và chuyển vị...

Những năm gần đây các Trường Đại học cũng bắt đầu đầu tư mạnh vào nghiên cứu về lĩnh vực này [3-9]: điển hình nhóm Trường Đại học GTVT thực hiện việc đo đạc phân tích dữ liệu tại các cầu Nam Ô, Cà Nôn bằng học máy, trí tuệ nhân tạo; nhóm Trường ĐH Xây Dựng, hay nhóm Trường Đại học Thủy lợi thực hiện đo và phân tích các dao động thường gặp cho cầu dây văng. Nhìn chung, các nghiên cứu này sử dụng các thiết bị SHM thương mại từ Trung Quốc, Châu Âu, Nhật Bản, Hoa Kỳ như hệ thống thiết bị A2272, PCB352C68, 622B01, TDS303 của Kyowa, Keithley, National Instrument, Tokyo Measuring Instruments Lab... [3-8]. Mặc dù cho kết quả chất lượng cao, chi phí đầu tư và vận hành của các hệ thống này thường rất lớn, gây khó khăn cho việc triển khai rộng rãi, đặc biệt là ở các nước đang phát triển hoặc cho các công trình quy mô nhỏ. Chủ động nghiên cứu thiết kế và chế tạo thiết bị SHM là một trong các nhiệm vụ quan trọng trong lĩnh vực giao thông hiện nay.

Trong bài báo này, các yêu cầu kỹ thuật và lựa chọn phần cứng phù hợp được phân tích và tối ưu. Tiếp theo, bài báo này trình bày quá trình thiết kế và chế tạo một thiết bị giám sát dao động kết cấu sử dụng cảm biến MPU-6050, ESP32 và SIM7600CE. Thiết bị được xây dựng với mục tiêu thu thập dữ liệu gia tốc và truyền về máy chủ qua 4G. Các thử nghiệm được thực hiện để đánh giá khả năng hoạt động của hệ thống. Đặc biệt, bài báo sẽ phân tích đối sánh chi tiết hiệu năng của hệ thống đề xuất với các hệ thống SHM thương mại. Nghiên cứu này góp phần chủ động phát triển thiết bị SHM cung cấp cho ngành xây dựng công trình, cũng như cho nghiên cứu và giáo dục.

## 2. PHÂN TÍCH CÁC KHỐI CHÍNH TRONG THIẾT BỊ SHM

Thiết bị SHM điển hình bao gồm: cảm biến gia tốc chuyên dụng, chip xử lý dữ liệu, và module truyền dẫn tín hiệu [1,11].

### 2.1. Cảm biến

Khi giám sát các kết cấu như cầu nhịp hay tòa nhà cao tầng, mục đích là phát hiện các thay đổi trong độ cứng, tần số riêng, biến dạng, hoặc dao động bất thường. Điều này đặt ra các yêu cầu khá nghiêm ngặt đối với các cảm biến đo, với yêu cầu kỹ thuật chính [11,12]:

- Dải đo: Từ  $\pm 0,05$  g đến  $\pm 2$  g, đủ để đo hết các dao động tự nhiên;
- Dải tần: 0,1 Hz – 100 Hz, vì tần số dao động chính của các kết cấu thường <30 Hz;
- Độ nhạy: Cao hơn 0,1 mV/g để có thể phát hiện rung nhỏ;
- Độ phân giải: Càng nhỏ càng tốt, < 1  $\mu$ g để đo đê rung từ nhiều góc;
- Ảnh hưởng nhiệt độ, độ ẩm: Phải ổn định để làm việc ngoài trời, trong môi trường nhiệt đới.

Các cảm biến gia tốc phổ biến được sử dụng trong SHM hiện nay được chế tạo trên cơ sở áp điện (piezoelectric), điện dung (capacitive), và vi cơ điện (MEMS). Các cảm biến MEMS với chi phí thấp, độ nhạy cao, đáp ứng các yêu cầu về dải tần, độ phân giải và độ ổn định nhiệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới của Việt Nam. Vì vậy cảm biến kiểu MEMS như ADXL355/356, SCA3300, WT901BLEC,... là lựa chọn phù hợp...

### 2.2. Chip xử lý tín hiệu

Bảng 1. So sánh các công nghệ xử lý.

Công nghệ	Tốc độ xử lý	Tiêu thụ năng lượng	Đặc điểm	Ưu điểm	Nhược điểm
MCU	Thấp (10 MHz - 1 GHz)	Thấp	Phổ biến, dễ sử dụng	Tiết kiệm năng lượng, giá thành thấp	Hạn chế trong khả năng xử lý dữ liệu lớn
FPGA	Rất cao (100 MHz - vài GHz)	Cao	Phản ứng có thể lập trình	Tốc độ xử lý cao, có thể tối ưu hóa cho ứng dụng cụ thể	Tiêu thụ năng lượng cao, phức tạp trong lập trình
SoC nhúng	Trung bình (1 GHz - vài GHz)	Trung bình	Tích hợp nhiều chức năng	Tích hợp cao, tiết kiệm không gian, hiệu suất tốt, giá thành thấp	Phải tùy chỉnh phần cứng cho ứng dụng cụ thể

Hệ thống xử lý tín hiệu đo trong SHM đóng vai trò quan trọng trong việc thu thập, phân tích và lưu trữ dữ liệu từ cảm biến, đồng thời điều khiển việc truyền dữ liệu. Yêu cầu kỹ thuật đối với hệ thống xử lý:

- Tốc độ xử lý: Cần xử lý tín hiệu đầu vào từ cảm biến nhanh chóng và hiệu quả, đặc biệt trong các ứng dụng thời gian thực như SHM. Tốc độ xử lý có thể dao động từ vài MHz đến vài GHz, Khả năng xử lý song song
- Tiêu thụ năng lượng: Do hệ thống SHM thường sử dụng năng lượng từ pin hoặc năng lượng mặt trời, các yêu cầu về tiết kiệm năng lượng là rất quan trọng, đặc biệt đối với các hệ thống không dây.
- Khả năng mở rộng: Cần thiết kế để mở rộng với số lượng cảm biến lớn và có thể tích hợp

các chức năng mới.

- Khả năng kết nối: Hệ thống xử lý cần có khả năng giao tiếp với các thiết bị truyền dẫn và kết nối với các phần mềm phân tích từ xa.

Các công nghệ chip phổ biến hiện nay bao gồm vi điều khiển (MCU: Micro-Controller Unit), FPGA (Field Programmable Gate Array) và Hệ thống trên chip nhúng (SoC: System on Chip). Mỗi công nghệ này có những ưu điểm và hạn chế riêng được tổng hợp tại bảng 1 [13-15].

Có thể thấy từ bảng 1: các vi điều khiển MCU phù hợp cho các ứng dụng có yêu cầu xử lý tín hiệu ở mức độ cơ bản và tiết kiệm năng lượng. Trong khi đó, các hệ thống FPGA có thể được xem xét cho các ứng dụng có yêu cầu xử lý tín hiệu tốc độ cao hoặc các công trình đòi hỏi độ chính xác cao. Các SoC nhúng sẽ là sự lựa chọn lý tưởng khi yêu cầu tính toán cao với chi phí thấp.

### 2.3. Công nghệ truyền dẫn không dây

Hệ thống SHM cần truyền dữ liệu đến trung tâm, trạm đo một cách tin cậy, thời gian thực [16]. Các công nghệ truyền dẫn vô tuyến phổ biến hiện nay được tổng hợp ở bảng 2. Tính tới đầu năm 2025, 5G chưa cho phép phát triển các ứng dụng riêng, vì vậy bảng 2 tổng hợp đến công nghệ 4G.

Bảng 2. So sánh các công nghệ truyền dẫn phổ biến.

Công nghệ	Băng thông	Phạm vi truyền dẫn	Tiêu thụ điện	Độ tin cậy	Khả năng ứng dụng
Wi-Fi	Cao (11–100 Mbps)	~50–100 m	Cao (~500 mW–1W)	Trung bình	Phù hợp với hệ thống cố định, có điện lưới như tòa nhà cao tầng ở trung tâm thành phố
Zigbee	Thấp (~250 kbps)	~10–100 m	Rất thấp (~30 mW)	Trung bình	Phù hợp mạng cảm biến nhỏ, tần suất thấp như tòa nhà cao tầng ở trung tâm thành phố
LoRaWAN	Rất thấp (~0.3–50 kbps)	1–10 km	Rất thấp (~10–50 mW)	Tốt	Phù hợp mạng diện rộng, giám sát không thời gian thực như cầu vượt nông thôn, không có điện lưới, khó bảo trì
NB-IoT	Trung bình (~20–200 kbps)	1–10 km	Trung bình (~200 mW)	Cao	Phù hợp giám sát liên tục, mạng hạ tầng sẵn có như cầu vượt nông thôn, không có điện lưới, khó bảo trì
4G/LTE	Cao (~10 Mbps)	Rộng (>5 km)	Cao (~1–2W)	Rất cao	Phù hợp hệ thống lớn, dữ liệu cao, truyền về đám mây như cầu dây văng tại khu đô thị lớn, có hạ tầng mạng viễn thông

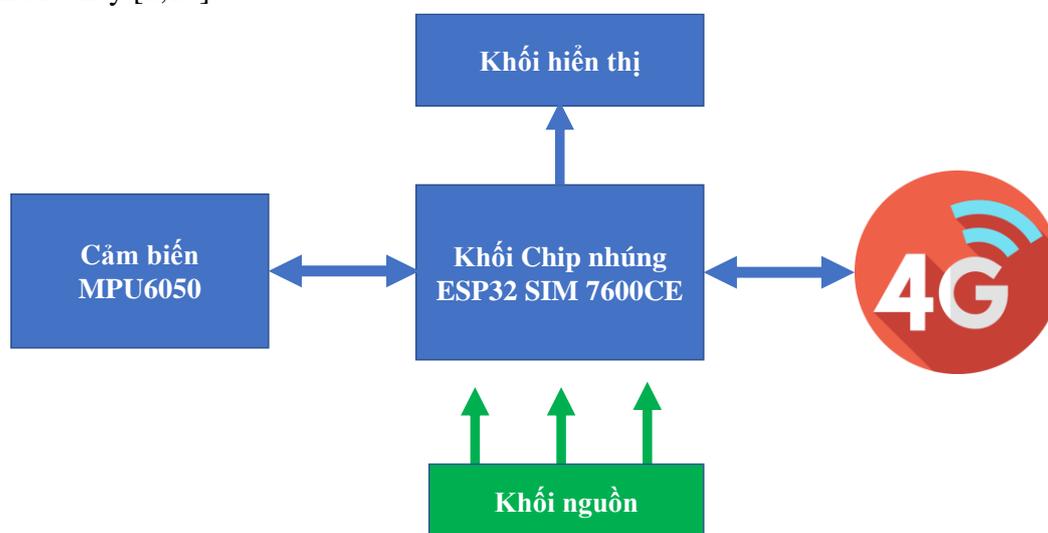
Các cơ sở trình bày tại mục 2, có thể nhận thấy, các giải pháp SHM có chi phí thấp và dễ

triển khai như sử dụng cảm biến MEMS, kết hợp với các công nghệ truyền dẫn không dây và vi điều khiển, sẽ giúp nâng cao hiệu quả giám sát và bảo trì các công trình giao thông trọng yếu với chi phí thấp.

### 3- PHÁT TRIỂN THIẾT BỊ SHM DAO ĐỘNG KẾT CẤU QUA MẠNG 4G

#### 3.1. Thiết kế và lựa chọn linh kiện

Hình 1 trình bày sơ đồ khối của thiết bị SHM phát triển tại Trường Đại học GTVT cho nghiên cứu này [1,17].



Hình 1. Sơ đồ khối thiết kế bộ DAQ KIT WIFI ESP32 4G SIM7600CE.

Bảng 3. So sánh phân cứng cho SHM.

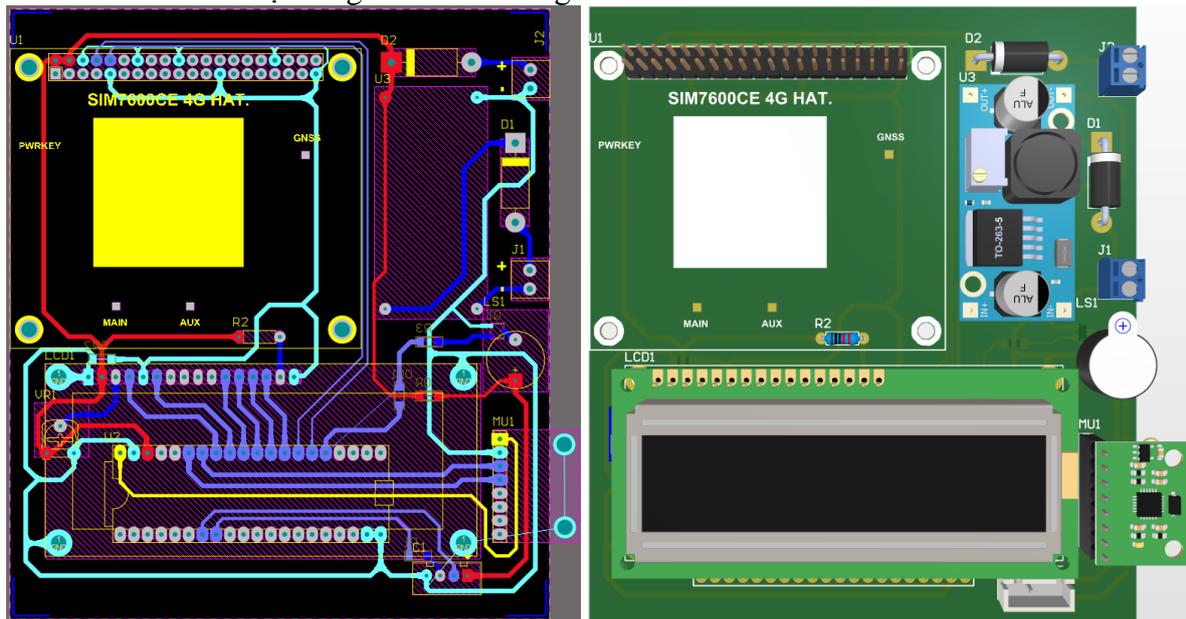
Tiêu chí	MCU STM32H7	FPGA Xilinx Artix-7	ESP32 + SIM7600CE
<b>Kiến trúc CPU</b>	ARM Cortex-M7, 32-bit	Không có CPU cố định; lập trình logic tùy chỉnh	Xtensa LX6, dual-core, 32-bit
<b>Tốc độ xung nhịp</b>	Lên đến 480 MHz	Lên đến 300 MHz	Lên đến 240 MHz
<b>Bộ nhớ Flash</b>	Lên đến 2 MB	Không có Flash tích hợp; cần bộ nhớ ngoài	448 KB
<b>Tích hợp không dây</b>	Không (cần module ngoài)	Không (cần module ngoài)	WiFi, Bluetooth; kết nối 4G thông qua SIM7600CE
<b>Tiêu thụ năng lượng</b>	2.95 $\mu$ A (Standby) – 100 mA (hoạt động)	50 mW – >10 W, tùy thuộc vào thiết kế và tần số	5 $\mu$ A (Deep Sleep) – 240 mA (WiFi hoạt động)
<b>Khả năng xử lý song song</b>	Hạn chế	Rất cao; hỗ trợ xử lý song song mạnh mẽ	Hạn chế
<b>Độ linh hoạt phần cứng</b>	Trung bình	Rất cao; có thể tùy chỉnh theo nhu cầu	Thấp
<b>Chi phí</b>	Trung bình	Cao	Thấp

- Cảm biến MPU-6050: là một mô-đun cảm biến tích hợp bao gồm gia tốc kế 3 trục và con quay hồi chuyển 3 trục, được sử dụng phổ biến trong các ứng dụng đo lường chuyển động

và định hướng. MPU-6050 bao gồm: gia tốc kế 3 trục (Accelerometer): Đo gia tốc tuyến tính theo ba trục X, Y, Z (bao gồm cả trọng lực), con quay hồi chuyển 3 trục (Gyroscope): Đo tốc độ góc (tốc độ quay) theo ba trục X, Y, Z (ứng dụng này không sử dụng đến tính năng đo tốc độ góc); chuyển đổi ADC 16-bit: chuyển đổi tín hiệu tương tự từ cảm biến thành tín hiệu số; bộ lọc kỹ thuật số và FIFO buffer: lọc và lưu trữ dữ liệu tạm thời; và giao tiếp I2C: Truyền dữ liệu đến chip nhúng.

- Khối chip nhúng và truyền dẫn 4G: Là khối quan trọng nhất vì nó sẽ nhận và xử lý các tín hiệu rồi truyền tín hiệu lên cloud. Việc lựa chọn phần cứng phù hợp cho hệ thống Giám sát Sức khỏe Kết cấu (SHM) tại Việt Nam đòi hỏi sự cân nhắc kỹ lưỡng giữa hiệu năng xử lý, tài nguyên bộ nhớ, tiêu thụ năng lượng và chi phí. Bảng 2 so sánh chi tiết giữa ba loại phần cứng phổ biến: ESP32 kết hợp với module 4G SIM7600CE, vi điều khiển STM32 và FPGA.

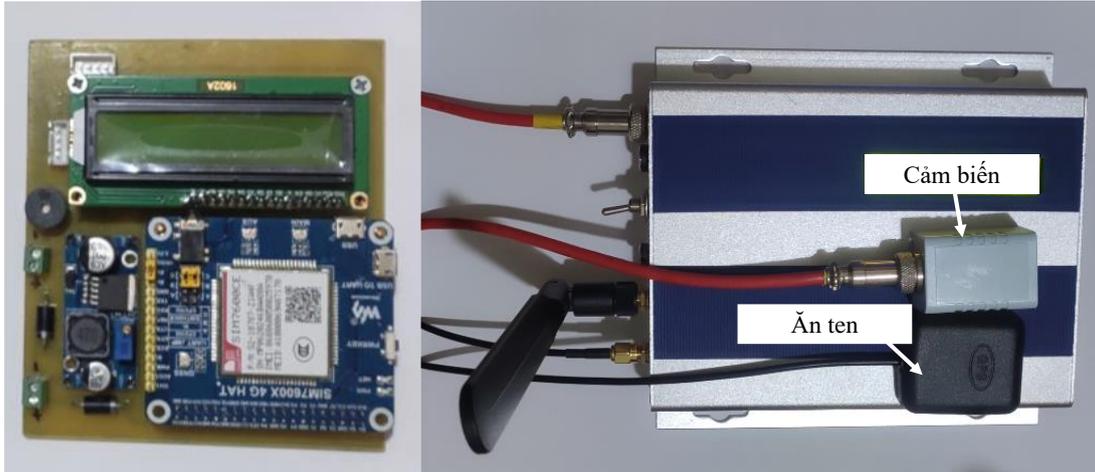
Qua bảng 2 có thể thấy, giải pháp sử dụng ESP32 kết hợp với SIM7600CE là một lựa chọn khá tối ưu cho hệ thống SHM tại Việt Nam, đáp ứng các yêu cầu về kết nối, định vị, tiết kiệm năng lượng và chi phí. Với khả năng lập trình linh hoạt và cộng đồng hỗ trợ rộng rãi, việc triển khai và bảo trì hệ thống trở nên dễ dàng hơn.



Hình 2. Thiết kế (layout) bản mạch in PCB của thiết bị.

### 3.2. Thiết kế và thi công mạch PCB

Mạch in PCB được thiết kế lạ mạch bằng phần mềm Altium Designer 18 như thể hiện ở các hình 2. Mạch in sau khi được kiểm tra kỹ, được làm thử tại phòng thí nghiệm sau đó tiếp tục được đặt tại nhà máy với công nghệ mạch in 2 lớp. Hình 3 là hình ảnh bo mạch chính và thiết bị sau khi đóng hộp. Bo mạch chính được hàn bằng công nghệ hàn dán bề mặt SMT (Surface Mount Technology) tại phòng thí nghiệm: linh kiện được đặt lên PCB cùng với thiếc hàn, sau đó được đưa vào buồng nhiệt trong 90 s tại nhiệt độ 100 -150°C. Sau đó, các mối hàn được kiểm tra cẩn thận bằng kính hiển vi điện tử. Vỏ bằng vật liệu nhựa và nhôm được sử dụng để giảm thiểu các nhiễu điện từ cũng như đảm bảo tránh nước, đảm bảo độ bền khi sử dụng.



Hình 3. PCB sau khi hàn dán linh kiện và thiết bị sau khi hoàn thành.

### 3.3. Chương trình điều khiển cho chip

Bảng 4 là mã giả chương trình. Chương trình cho chip được viết sử dụng ngôn ngữ C và nạp trực tiếp vào chip qua cổng USB.

Bảng 4. Mã giả chương trình cho chip.

---

#### Mã giả (pseudocode) chương trình cho chip

---

```
BEGIN
  // Khởi tạo hệ thống
  Initialize ESP32
  Initialize SIM7600CE
  Initialize MPU-6050
  Initialize LCD
  // Thiết lập kết nối
  Connect ESP32 to SIM7600CE
  Connect ESP32 to MPU-6050
  Connect ESP32 to LCD
  WHILE true DO
    // Lấy dữ liệu từ MPU-6050
    Read data from MPU-6050
    Z_axis_data = Get Z-axis value from MPU-6050
    // Hiển thị dữ liệu lên LCD
    Display Z_axis_data on LCD
    // Truyền dữ liệu qua mạng 4G
    Transmit Z_axis_data over 4G using SIM7600CE
    Delay (1000)
  END WHILE
END
```

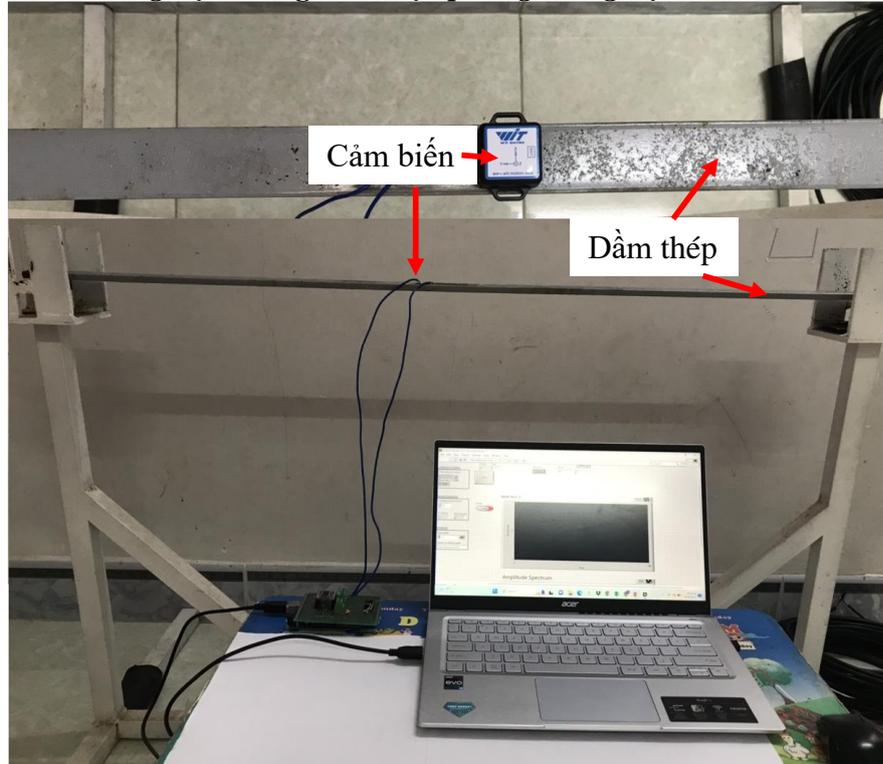
---

Sau khi phần cứng được khởi tạo (initialize), các kết nối từ chip ESP32 với SIM7600CE, cảm biến MPU-6050, màn hình hiển thị LCD được thực hiện. Dữ liệu từ cảm biến MPU-6050 được đọc liên tục và gửi qua 4G sau mỗi ms. Với khoảng thời gian này đảm bảo khôi phục khá tự nhiên tín hiệu dao động, đồng thời đảm bảo lượng dữ liệu

cần xử lý và truyền dẫn không quá lớn. Trong nghiên cứu này, các hàm chuyên dụng được sử dụng: ReadMPU6050(): trả về giá trị gia tốc hoặc góc nghiêng ở các trục X, Y, Z; SendDataOver4G(data): gửi dữ liệu lên server/cloud hoặc qua giao thức HTTP/MQTT thông qua SIM7600CE.

#### 4. THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ HỆ THỐNG

##### 4.1. Mô tả kịch bản thử nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm



Hình 4. Thử nghiệm các thiết bị đo tại phòng thí nghiệm Trường Đại học GTVT.

Thử nghiệm được tiến hành trên thiết bị đo dao động chuẩn WT901BLEC và thiết bị phát triển trong nghiên cứu này được sử dụng để so sánh. Thử nghiệm được tiến hành trên dầm thép đặc với mặt cắt hình chữ nhật có kích thước chiều rộng 40 mm, chiều cao (dày) 8 mm, chiều dài là  $L = 1030$  mm. Điều kiện biên của các dầm là hai đầu tựa đơn. Khoảng cách giữa hai gối là 1000 mm. Dao động của kết cấu nhịp thường chủ yếu theo phương thẳng đứng. Vì vậy, cảm biến thường được đặt sao cho trục Z vuông góc với mặt phẳng kết cấu, tức là theo phương thẳng đứng. ta lấy tín hiệu gia tốc theo trục Z để phân tích dao động (hình 4). Tần số lấy mẫu: 200 Hz - đơn vị gia tốc (g). Đầu đo gia tốc được đặt lần lượt ở các điểm khác nhau trên dầm. Mỗi lượt đo, búa cao su tác động lên dầm, thời gian ghi dữ liệu khoảng 60s cho 1 số liệu. Môi trường thử nghiệm là phòng thí nghiệm tại Trường Đại học GTVT, được kiểm soát nhiệt độ và độ ẩm ổn định để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu.

##### 4.2. Tín hiệu đo và trích xuất tham số dao động

Tín hiệu gia tốc thu được từ cảm biến MPU-6050 thể hiện rõ cụ thể:

Hình 5 là biểu đồ gia tốc theo thời gian thu được từ cảm biến MPU-6050 sau một kích thích. Tín hiệu thu được từ hệ thống đo cơ bản giống với thiết bị chuẩn, và kiểu tín hiệu dao động tắt dần (damped vibration)-điển hình của dao động tự do của kết cấu sau va đập:

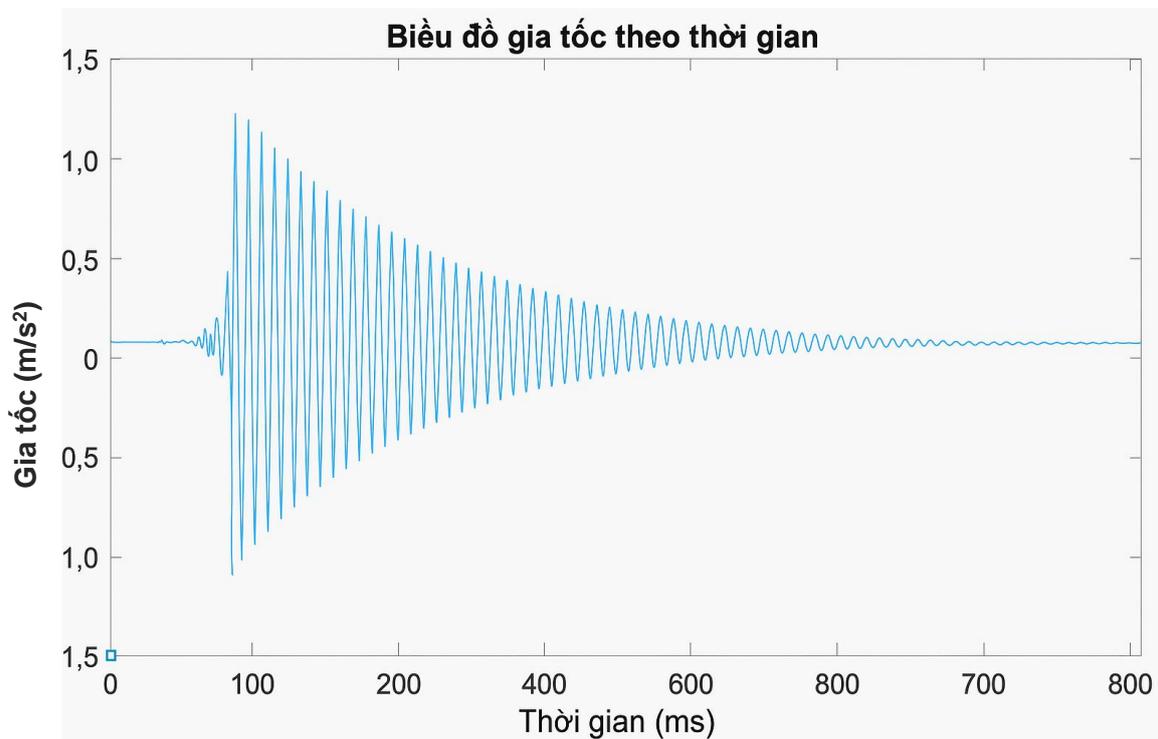
- Pha đầu (0 – ~80ms): gia tốc tăng nhanh, do lực kích thích
- Phần giữa (~80 – ~400ms): dao động tắt dần với biên độ giảm dần, tần số dao động rõ ràng

- Phần sau (~ 400 – 800ms): tín hiệu suy giảm gần bằng 0, kết cấu gần đạt trạng thái tĩnh

Đánh giá sức khỏe kết cấu: Tần số dao động riêng và hệ số tắt dần là những chỉ số quan trọng để theo dõi tình trạng của kết cấu. Sự thay đổi của các tham số này theo thời gian có thể chỉ ra sự thay đổi về độ cứng hoặc sự thay đổi về khả năng tiêu tán năng lượng. Từ biểu đồ gia tốc theo thời gian hình 5, Tần số dao động riêng ( $f_n$ ) tính được, tần số dao động tắt dần ( $f_d$ ), và hệ số tắt dần ( $\zeta$ ) tính được lần lượt là: 11,101 Hz, 11,1003 Hz, và 0,0068. Giá trị  $f_n$  phụ thuộc trực tiếp vào các đặc tính vật lý của dầm: độ cứng và khối lượng, cũng như điều kiện biên: liên kết ở hai đầu dầm: ngàm, khớp, tự do.... Hệ số tắt dần  $\zeta$  rất nhỏ, cho thấy mức độ cản dao động của dầm thép là rất thấp. Điều này khá phù hợp với đặc tính của vật liệu thép và các kết cấu thép nói chung, vốn có độ tắt dần nội tại thấp thường từ 0,2% đến 2% [18,19].

#### 4.3. Phân tích đối sánh với thiết bị chuẩn

Mặt khác, để làm giàu hơn tính khả thi của thiết bị SHM phát triển trong nghiên cứu này, tần số dao động riêng ( $f_n$ ), tần số dao động tắt dần ( $f_d$ ) và hệ số tắt dần ( $\zeta$ ) được tính từ biểu đồ gia tốc theo thời gian thu được so sánh hệ thống đo thương mại trong bảng 5.



Hình 5. Tín hiệu thu từ hệ thống trong nghiên cứu này.

Có thể quan sát thấy từ bảng 5, các tham số thu được bám khá gần với thiết bị chuẩn, sai số ở đây có thể xuất phát từ nhiều tín hiệu tần số thấp do tài nguyên phần cứng của chip ESP 32 chưa cho phép xử lý các chương trình lọc số phức tạp. Vấn đề này sẽ được chúng tôi tập trung nghiên cứu trong thời gian tới, trong đó chú trọng đặc biệt đến tối ưu hóa thuật toán và tối ưu hóa hơn nữa phần cứng cho SHM.

Bảng 5 Tham số trích suất từ 2 hệ thống đo.

Tham số	Thiết bị SHM chuẩn WT901BLEC	Thiết bị SHM trong nghiên cứu này
Cảm biến	WT901BLECL	MPU-6050
Mất tín hiệu	Không	Không
Truyền dẫn	Sử dụng dây	Không dây
Độ tin cậy dài hạn	Trung bình	Thấp
Giá thành	Cao	Thấp
$f_n$ (Hz)	$10,302 \pm 0,015$	$11,1001 \pm 0,012$
$f_d$ (Hz)	$10,018 \pm 0,012$	$11,1003 \pm 0,013$
$\zeta$	$0,0062 \pm 0,0001$	$0,0068 \pm 0,0001$

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, thiết kế giám sát dao động kết cấu xây dựng không dây, chi phí thấp, sử dụng cảm biến gia tốc MEMS MPU-6050, chip ESP32 tích hợp module truyền thông di động 4G SIM7600CE đã được phát triển thành công. Thiết bị được thử nghiệm trong phòng thí nghiệm để đảm bảo độ chính xác. Tần số dao động riêng ( $f_n$ ), tần số dao động tắt dần ( $f_d$ ), và hệ số tắt dần ( $\zeta$ ) tính toán từ tín hiệu đo cho thấy khá phù hợp với các tham số của cảm biến, và tương đồng với với hệ đo nhập khẩu trang bị tại phòng thí nghiệm. Tuy hệ thống này còn tồn tại những hạn chế đáng kể so với hệ thống chuyên dụng về độ chính xác dữ liệu, độ tin cậy dài hạn và khả năng phân tích chuyên sâu, tiềm năng ứng dụng của thiết bị là rất lớn trong các trường hợp không yêu cầu độ chính xác cao hoặc làm công cụ nghiên cứu, giáo dục. Nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào tối ưu hóa tài nguyên phần cứng, tính ổn định tín hiệu của hệ thống thông qua nghiên cứu về thời gian hoạt động, hiệu suất năng lượng, thử nghiệm với các môi trường làm việc khác nhau.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2024-GHA-11. Tác giả xin chân thành cảm ơn các thí nghiệm viên Trung tâm KHCN GTVT, Trường Đại học GTVT đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Yan et al, Structural Health Monitoring: An Advanced Signal Processing Perspective, Kindle Edition, 2017
- [2]. A.C. Rahita, A., Zaki, G. Nugroho, S. Yadi, Internet of Things (IoT) in Structural Health Monitoring: A Decade of Research Trends, Instrumentation, Measures, Metrologies, 23 (2024). <https://doi.org/10.18280/i2m.230205>
- [3]. Hệ thống quan trắc công trình cầu Thuận Phước: <https://www.stic.com.vn/vi/news/du-an-da-thuc-hien/he-thong-quan-trac-cong-trinh-cau-thuan-phuoc-60.html>

- [4]. B-T. Thanh, et al., Enhancing bridge damage assessment: Adaptive cell and deep learning approaches in time-series analysis, *Construction and Building Materials*, 439 (2024) 137240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137240>
- [5]. H. L. Viet, B.T. Thanh, M. A. Wahab, A two-step failure identification approach using a stochastic optimization-based ensemble learning model for beams without pristine data, *Engineering Structures*, 334 (2025) 120253. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120253>
- [6]. Tạ Đức Tuấn, Lê Anh Tuấn, Vũ Đình Hương, Nhận dạng tần số dao động riêng của kết cấu bằng phương pháp kích động cưỡng bức, *Tạp chí KHCN Xây dựng*, 1 (2017) 27-31.
- [7]. Nguyễn Công Đức, Trần Văn Một, Phan Công Bàn, Dương Lê Trường, Khảo sát thông số chuyển vị từ tín hiệu cảm biến đo gia tốc kết cấu dầm nhịp giản đơn, *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ*, 18 (2015) 111-120.
- [8]. Nguyen Van Tien et al., Application of Low-Cost MEMS in Bridge Monitoring in Vietnam, *VJST*, 62 (2023).
- [9]. Đào Thanh Toàn, Thiết bị thu thập dữ liệu không dây sử dụng cảm biến áp điện ứng dụng trong đo dao động kết cấu, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 71 (2020) 135-144. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.2.8>
- [10]. Renda Zhao et al., Review of annual progress of bridge engineering in 2019, *Advances in bridge engineering*, 1 (2020) 11
- [11]. S. Bhatta, J. Dang, Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: a state-of-the-art review, *Urban Lifeline*, 2 (2024) 17. <https://doi.org/10.1007/s44285-024-00031-2>
- [12]. A. Mardanshahi et al., Sensing techniques for structural health monitoring: a state-of-the-art review on performance criteria and new-generation technologies, *Sensors*, 25 (2025) 1424. <https://doi.org/10.3390/s25051424>
- [13]. X. L. Wang et al., Comparative Study of MCU, FPGA, and SoC for Embedded Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68 (2021).
- [14]. B. P. Chen et al., Embedded System for Structural Health Monitoring: A Review, *Journal of Structural Engineering*, 147 (2020).
- [15]. P.M. Ferreira et al., Embedded sensors for structural health monitoring: methodologies and applications review, *Sensors*, 22 (2022) 8320. <https://doi.org/10.3390/s22218320>
- [16]. O.S. Sonbul, M. Rashid, Towards the structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks: a systematic study, *Sensors*, 23 (2023) 8468. <https://doi.org/10.3390/s23208468>
- [17]. Espressif Systems, ESP32 Technical Reference Manual, 2020.
- [18]. T. M. Murray, D. E. Allen, E. E. Ungar, D. B Davis, *AISC Design Guide 11: Floor Vibrations Due to Human Activity (Second Edition)*, American Institute of Steel Construction, 2016.
- [19]. K. Anil, *Chopra Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1995.