



## WIRELESS DAQ USING PIEZOELECTRIC SENSOR FOR VIBRATION MEASUREMENT OF BRIDGE STRUCTURE

Dao Thanh Toan

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

### ARTICLE INFO

TYPE: Research article

Received: 04/02/2020

Revised: 25/02/2020

Accepted: 28/02/2020

Published online: 29/02/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.2.8>

\* *Corresponding author*

Email: daotoan@utc.edu.vn

**Abstract.** Determination of the vibration of structure is one of the important operations in the health examination of a bridge. In particular, wireless DAQ equipment has many advantages including tiny size, simple installation, and low inspection cost. However, such equipment system has been relatively expensive and mainly imported. The main content of this paper is to focus on the study and manufacturing a low-cost wireless DAQ device with a piezoelectrics sensor of PVDF material in order to sense the vibration of bridge structure. Additionally, the measured vibration results at small bridge of Lam Kinh, Vietnam from the wireless DAQ are analytically compared with those obtained from the wired based-device.

**Keywords:** Piezoelectric sensor, wireless DAQ, bridge vibration structure measurement

© 2020 University of Transport and Communications



## THIẾT BỊ THU THẬP DỮ LIỆU KHÔNG DÂY SỬ DỤNG CẢM BIẾN ÁP ĐIỆN ỨNG DỤNG TRONG ĐO DAO ĐỘNG KẾT CẤU CẦU

Đào Thanh Toán

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 04/02/2020

Ngày nhận bài sửa: 25/02/2020

Ngày chấp nhận đăng: 28/02/2020

Ngày xuất bản Online: 29/02/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.2.8>

\* Tác giả liên hệ

Email: daotoan@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Đo dao động của kết cấu nhịp là một trong những khâu quan trọng trong kiểm định cầu. Thiết bị đo không dây có nhiều ưu điểm như kích thước nhỏ gọn, thiết lập và thao tác đơn giản, và chi phí quá trình kiểm định thấp hơn. Tuy nhiên, hiện nay giá thành thiết bị còn khá cao và đa số nhập ngoại. Nội dung chính của bài báo tập trung nghiên cứu chế tạo thiết bị DAQ không dây và chương trình sử dụng cảm biến áp điện PVDF phục vụ việc đo dao động của kết cấu cầu. Bên cạnh đó, kết quả đo dao động tại cầu Lam Kinh, Thanh Hóa với thiết bị không dây cũng được phân tích và so sánh với giá trị thu được từ thiết bị tiêu chuẩn sử dụng cáp kết nối.

**Từ khóa:** Cảm biến áp điện, DAQ vô tuyến, đo dao động kết cấu

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đo đạc, quan trắc dao động kết cấu là một yêu cầu thiết yếu nhằm xác định tình trạng sức khỏe của công trình giao thông, qua đó giúp cho công tác bảo trì, bảo dưỡng công trình giao thông được thực hiện kịp thời, thường xuyên và hiệu quả [1-6]. Cụ thể, trong cầu đường ô tô, Bộ Giao thông Vận tải đặc biệt quan tâm đến công tác kiểm định và thử nghiệm kết cấu cho các công trình cầu được xây dựng trong hệ thống quốc lộ với việc ban hành quy trình kiểm định cầu trên đường ô tô 22TCN 243-98. Cũng có nhiều công bố khoa học gần đây về quan trắc sức khỏe cầu trên cơ sở phương pháp đo dao động trên các công trình cầu Mỹ Thuận [2], Nam Ô [5], Cà Nôn [6]. Nhìn chung, đa số các phép đo thực hiện trong kiểm định hay trong

ngiên cứu khoa học đều sử dụng dây cáp đồng trục kết nối bộ thu thập dữ liệu DAQ của các hãng Kyowa, Keithley, National Instrument,... tại trạm và cảm biến gắn trên các kết cấu cầu cần đo [1-6]. Hệ đo này có một số tồn tại như:

- Công tác lắp dựng hệ dàn giáo cho toàn bộ không gian bên dưới nhịp cầu hệ đo kiểm dẫn tới chi phí nhân công, cơ sở vật chất cao và cũng làm cho thời gian đo kiểm khá lâu.
- Xét về góc độ kỹ thuật, khi số lượng điểm đo càng nhiều, lượng dây cáp tổng là rất lớn dẫn tới nhiều tác động vào hệ thống qua dây cáp là rất đáng kể, điều này dẫn tới khâu xử lý dữ liệu hậu đo phức tạp.

Liên quan đến công nghệ cảm biến, các đầu đo gia tốc được sử dụng nhiều trong kiểm định cầu như A2272, PCB352C68, 622B01 [2-4] có cấu tạo từ vật liệu gốm áp điện vô cơ PZT. Cảm biến hoạt động dựa trên nguyên lý áp điện (piezoelectric effect), nghĩa là khi lực tạo ra từ rung động hoặc thay đổi về chuyển động (gia tốc) tác dụng lên lớp màng mỏng PZT sẽ sinh ra một tín hiệu điện tích tỉ lệ với lực tác động và gia tốc. Khi tích hợp cảm biến với mạch chuyển điện tích sang điện áp (còn gọi là bộ transducer Q-V) sẽ tạo thành đầu đo gia tốc. Những năm gần đây, các đặc tính mới của hệ vật liệu áp điện polyme như PVDF, PDMS,... đang được nhiều nhà khoa học, công ty nước ngoài quan tâm nghiên cứu sử dụng để chế tạo cảm biến [7-14]. Các nghiên cứu này đã chỉ ra cảm biến loại này có một số ưu điểm như: chi phí chế tạo thấp hơn, diện tích bề mặt đo lớn hơn, độ linh động (mobility) của vật liệu nhỏ nên ít chịu tác động của nhiệt độ và thích hợp với đối tượng đo tần số thấp từ mHz đến vài chục Hz trong lĩnh vực đo dao động của kết cấu công trình.

Mặt khác, theo xu hướng kỷ nguyên kết nối vạn vật IoT toàn cầu hiện nay, kết hợp truyền dẫn không dây và công nghệ cảm biến kiểu mới mang lại ý nghĩa rất lớn và quan trọng để ứng dụng trong công tác kiểm định theo dõi sức khỏe công trình cầu ở Việt Nam. Bài báo trình bày nghiên cứu chế tạo thiết bị thu thập dữ liệu không dây sử dụng cảm biến áp điện ứng dụng trong đo dao động kết cấu. Cảm biến sử dụng vật liệu polyme PVDF được chế tạo bằng phương pháp ép nhiệt. Bộ thu thập dữ liệu DAQ được phát triển trên cơ sở chip ARM công suất thấp. Dữ liệu đo được truyền về máy tính bảng tại trạm thông qua Bluetooth. Hệ đo được thử nghiệm tại cầu Lam Kinh, Thanh Hóa cho kết quả phân tích dao động kết cấu nhịp khá gần với giá trị đo từ hệ đo truyền thống sử dụng trong kiểm định cầu.

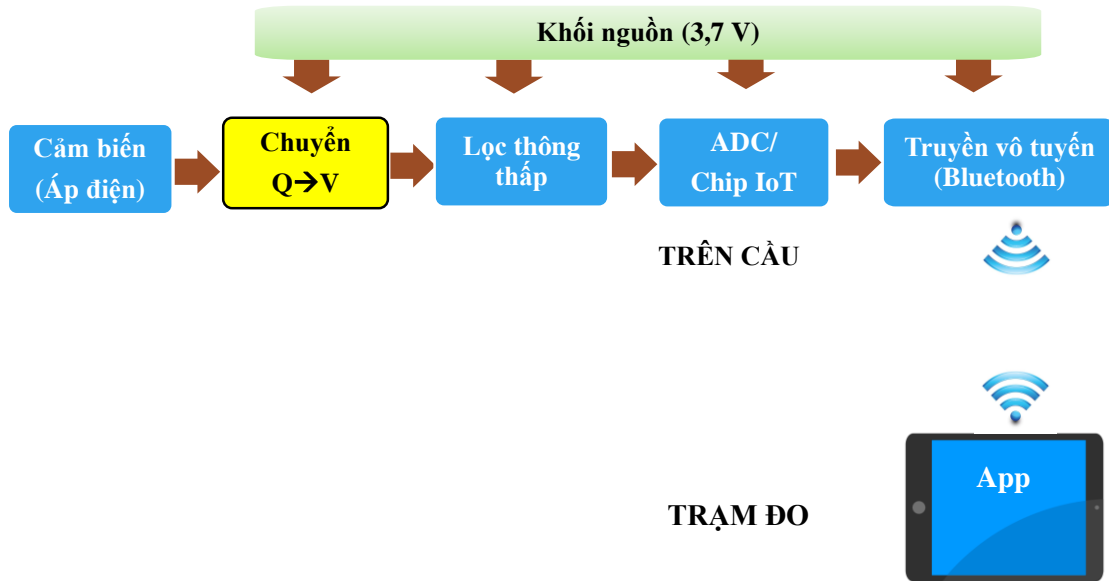
## 2. BỘ DAQ KHÔNG DÂY

Sơ đồ khối thiết kế của hệ đo bao trình bày ở hình 1. Trong đó cảm biến áp điện, mạch chuyển đổi, các chip xử lý tín hiệu, module không dây là các thành phần quan trọng.

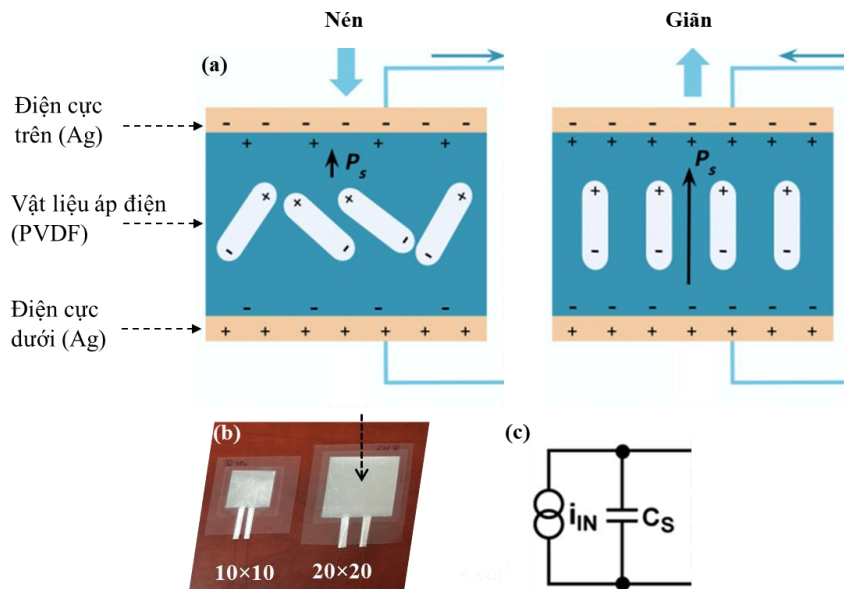
### 2.1 Cảm biến áp điện

Cảm biến với cấu tạo kiểu “tụ điện hai bản cực song song” được hình họa ở hình 2a. Cảm biến được chế tạo bằng cách đặt lớp màng mỏng áp điện polyme PVDF (dày ~30  $\mu\text{m}$ ) xen giữa 2 lớp điện cực nhôm, và được ép với lớp đế polyester (0,15 mm) tại nhiệt độ 80  $^{\circ}\text{C}$  [15]. Tiếp theo, 2 dây cáp đồng bọc nhiều được gắn để nối với 2 điện cực bạc Ag của cảm biến với mạch đọc. Cảm biến cũng có nguyên tắc làm việc trên cơ sở hiệu ứng áp điện tương tự cảm biến PZT nêu trên. Khi ngoại lực ( $F=m \times a$ ) tác động theo hướng thẳng đứng tức là vuông góc với bản điện cực (hình 2b), sẽ làm cảm biến bị biến dạng. Hướng phân cực của các ion dương và âm bên trong lớp PVDF bị thay đổi theo, dẫn đến sự tích tụ của điện tích bề mặt tại lớp tiếp

xúc giữa PVDF và điện cực. Tổng lượng điện tích lũy tỷ lệ thuận với gia tốc của ngoại lực. Mạch điện tương đương của cảm biến gồm nguồn dòng  $I_{IN}$  song song với tụ  $C_S$  vẽ tại hình 2c. Trong đó nguồn dòng đặc trưng cho sự thay đổi nồng độ electron, tụ  $C_S$  đặc trưng cho thành phần điện dung nên do cảm biến có cấu tạo kiểu bản cực song song. Tham số của cảm biến được tổng hợp ở bảng 1.



Hình 1. Sơ đồ khối thiết kế cho hệ đo dao động kết cấu nhịp cầu không dây.



Hình 2. (a) Cấu tạo, nguyên lý hoạt động, (b) hình ảnh và (c) sơ đồ tương đương của cảm biến áp điện sử dụng vật liệu polyme PVDF và điện cực Ag.

## 2.2 Mạch chuyển đổi Q-V

Vì đầu ra của cảm biến PVDF là điện tích, cho nên cần có mạch chuyển đổi điện tích thành điện áp, đây là một khâu quan trọng góp phần đảm bảo hệ thống đo được và đúng tín

hiệu dao động. Sơ đồ của mạch chuyển đổi được thiết kế trên cơ sở tham khảo mạch chuyển đổi Q-V của Analog được vẽ ở hình 3, Quan hệ điện áp ra  $V_O$  và các linh kiện  $C$ ,  $R_F$ ,  $R_{IN}$  theo công thức [16]:

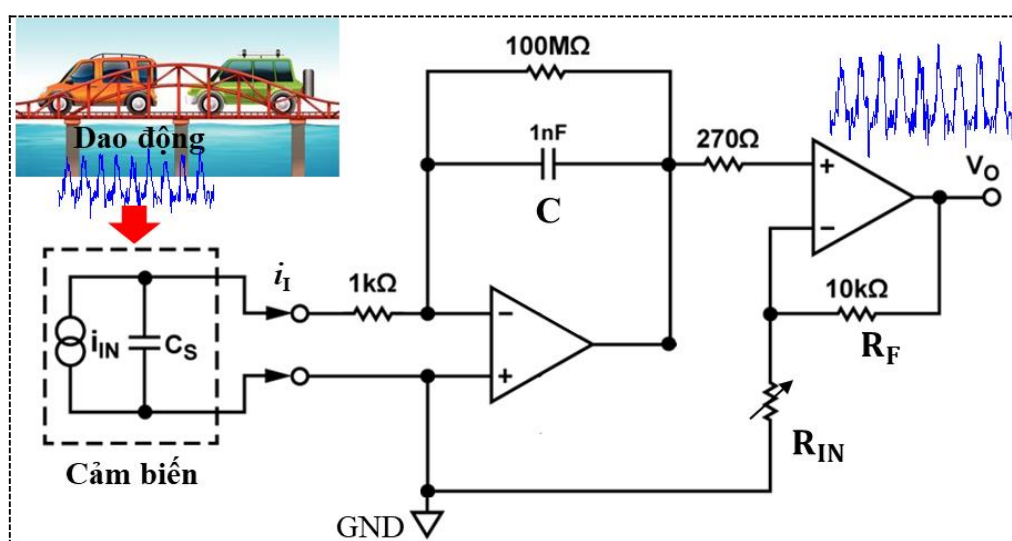
$$V_O = a \frac{S}{C} \left(1 + \frac{R_F}{R_{IN}}\right) \quad (1)$$

Trong đó  $S$  là độ nhạy của cảm biến áp điện và  $a$  là gia tốc cần đo.

Mặt khác, hệ số khuếch đại tín hiệu  $K$  của mạch được tính toán từ mạch điện là:

$$K = \frac{1}{C} \left(1 + \frac{R_F}{R_{IN}}\right) \quad (2)$$

Với  $C = 1 \text{ nF}$ ,  $R_F = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $S = 50 \text{ mV/a}$  và  $R_{IN}$  khi được chỉnh về một giá trị nhất định khi sử dụng, thì từ công thức (1), điện áp ra  $V_O$  tỉ lệ tuyến tính với gia tốc cần đo  $a$ . Mặt khác, vì tín hiệu sau khi chuyển đổi là rất nhỏ, thiết kế mạch điện hình 2b với  $R_{IN}$  là biến trở tinh chỉnh, cho phép điều chỉnh độ nhạy phù hợp với từng trường hợp cụ thể theo công thức (2).



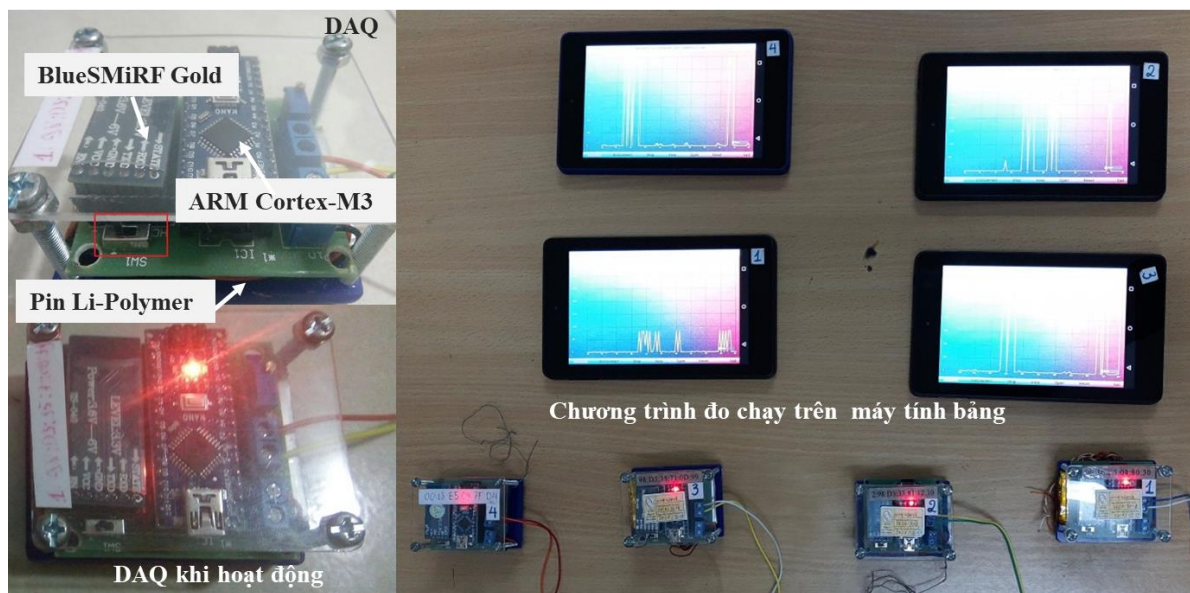
Hình 3. Sơ đồ mạch nguyên lý của bộ chuyển đổi Q-V.

### 2.3 Các thành phần chính khác

Tín hiệu điện áp đo sau khi được khuếch đại, cần được đưa qua mạch lọc để lọc bớt các dải tần số nhiễu. Vì dao động của kết cấu cầu là rất thấp từ Hz đến chục Hz, mạch lọc thông thấp được thiết kế với tần số cắt 20 Hz, giá trị này tương tự với tần số cắt sử dụng trong các nghiên cứu công bố gần đây [2-4]. Bộ chuyển đổi tương tự/số ADC sử dụng họ AD7091R 12-bit. Chip IoT sử dụng ARM Cortex-M3 MCU tích hợp trong Kit phát triển STM32F103C8T6.

Liên quan tới truyền dữ liệu, trong các công nghệ không dây phổ biến gồm Wifi, 4G, Bluetooth, thì Bluetooth là thích hợp hơn vì không phải trả phí thuê báo như 4G, tốn rất ít năng lượng hơn so với cả 4G hay Wifi. Cụ lý truyền dữ liệu ngắn của công nghệ Bluetooth cũng phù hợp với khoảng cách từ dầm đến vị trí trạm đo thường vào khoảng 5-100 m. Ngoài ra, các thiết bị thu như máy tính bảng hay smartphone cũng tích hợp sẵn đầu thu Bluetooth, nên không phải thiết kế thêm phần cứng cho trạm. Module Bluetooth BlueSMiRF Gold với ăng

ten chìm và khoảng cách truyền tối đa lên tới 100 m được chọn và sử dụng trong bộ DAQ không dây này. Cơ bản các chip điện tử từ ADC, IoT, đến Bluetooth ở đây đều là dòng linh kiện có sẵn tại thị trường Việt Nam và dễ lập trình thông qua công cụ hỗ trợ của nhà sản xuất, công suất tiêu thụ rất thấp phù hợp với môi trường không dây chạy pin. Hình ảnh về bộ DAQ sau khi chế tạo được thể hiện ở hình 4. Các tham số cơ bản/tính năng của cảm biến, DAQ, chương trình đo được tổng hợp ở bảng 1.



Hình 4. Hình ảnh về DAQ sau khi chế tạo và máy tính bảng chạy chương trình đo.

Bảng 1. tổng hợp các tham số hệ thống đo.

Thiết bị	Tham số/tính năng
Cảm biến	+ Tần số đo: 0,1-10 Hz + Độ nhạy: 50 mV/g + Độ chính xác: $\pm 0,05 \%$ + Độ phi tuyến: $\pm 0,01 \%$ + Diện tích bề mặt: 1-25 cm <sup>2</sup> + Độ cong tối đa khi làm việc: 30°
DAQ không dây	+ Nguồn cấp: 3,7 V (Pin sạc Li-Polymer) + ADC: 12 bit + Kích thước hộp: 150×100×50 + Độ chính xác: 0,5 % + Phạm vi truyền dữ liệu giữa DAQ và trạm: 50-100 m + Tần số truyền: 2,400~2,524 GHz
Chương trình đo	+ Chạy trên môi trường Android + Hiển thị trực tiếp kết quả đo dưới dạng số và biểu đồ + Thống kê dữ liệu đo + Có thể kết nối cơ sở dữ liệu điện toán đám mây Google



### 3. THỬ NGHIỆM TẠI CẦU LAM KINH-THANH HÓA

Cầu Lam Kinh nằm trên đường Hồ Chí Minh, thuộc tỉnh Thanh Hóa, với một số đặc điểm cơ bản:

- Tổng chiều dài  $L_c = 276,45$  m
- Khổ cầu  $B = 11 + 2 \times 0,5 = 12$  m
- Số nhịp: 08;      Sơ đồ nhịp  $L_n = 8 \times 33$  m
- Dạng kết cấu nhịp chính: dầm bê tông cốt thép dự ứng lực, nhịp giản đơn

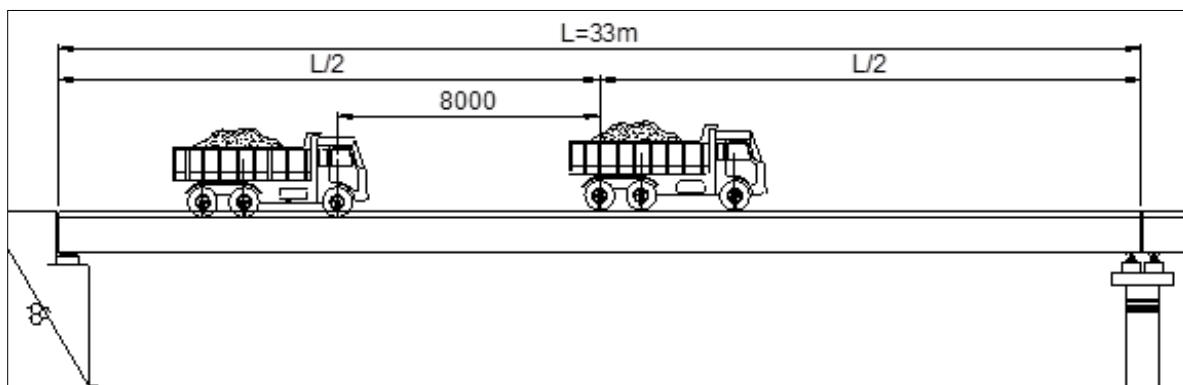
Việc thử nghiệm thiết bị đo tuân theo quy trình đo dao động kết cấu nhịp của tiêu chuẩn kiểm định cầu trên đường ô tô 22TCN 243-98. Theo tiêu chuẩn này, cần thực hiện đo dao động theo ba phương: thẳng đứng, nằm ngang cầu và nằm dọc cầu. Tuy nhiên, do giới hạn về kinh phí thử nghiệm, nghiên cứu tại bước này, tác giả chỉ việc được phép đo theo phương thẳng đứng và được thực hiện cùng với thời điểm kiểm định cầu Lam Kinh. Các hướng khác sẽ được tác giả thử nghiệm và báo cáo trong tương lai.



Hình 4. Bố trí thiết bị đo nhận dạng dao động tại cầu Lam Kinh.

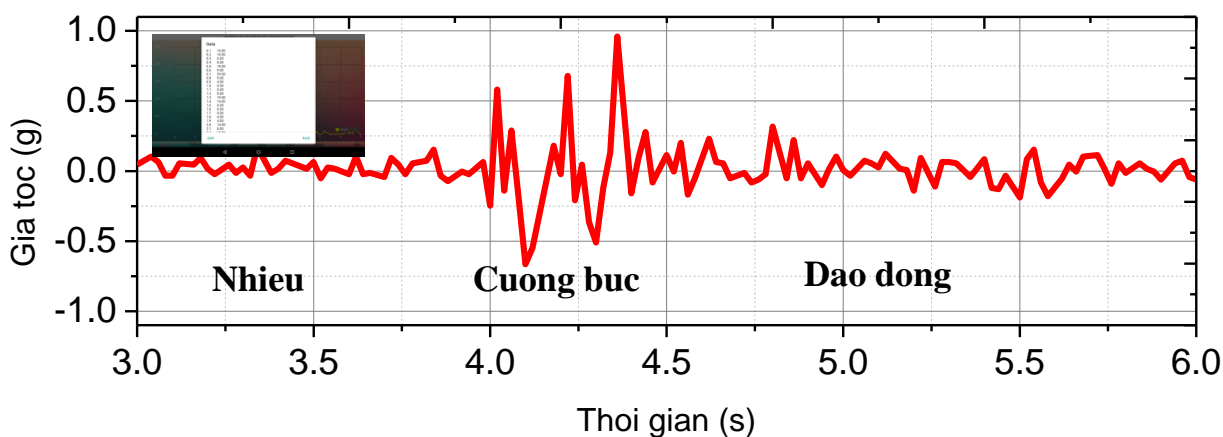
Trước tiên hệ đo được triển khai lắp đặt như sau: vị trí gắn cảm biến tại mặt cắt giữa nhịp được làm sạch và đánh giấy ráp để tăng độ phẳng, sau đó cảm biến được gắn vào dầm bằng keo con voi và được phủ bằng băng dính; bộ DAQ được cố định vào móc bằng dây đai và sau đó nối với cảm biến áp điện PVDF. Trạm đo với máy tính bảng kết nối Bluetooth được đặt tại khu vực chân cầu cách DAQ khoảng ~10 m. Nhằm so sánh kết quả, thiết bị đo kiểm định tiêu

chuẩn bao gồm cảm biến gia tốc PCB352C68 của PCB kết nối cáp đồng trục (có chiều dài giống khi thực hiện kiểm định ~8 m) với DAQ NI SCXI-1000DC của National Instruments cũng được triển khai lắp. Một số hình ảnh về bố trí thiết bị đo nhận dạng dao động tại cầu Lam Kinh được thể hiện trên hình 4. Tải trọng đo động sinh ra từ xe tải chạy qua cầu với tốc độ (30-35 km/h) từ nền đường đầu cầu bên mô  $M_1$  đến nền đường phía sau mô  $M_2$  và quay trở lại như minh họa ở hình 5.



Hình 5. Minh họa nguồn tải trọng động khi đo dao động cầu Lam Kinh.

Hình 6 thể hiện một đoạn tín hiệu gia tốc theo thời gian từ bộ đo không dây. Có thể thấy tín hiệu thu được khá điển hình trong đo kết cấu cầu [1-6] bao gồm bao gồm các thành phần tín hiệu nhiễu, dao động cưỡng bức và dao động tự do. Điều này chứng minh rằng hệ đo không dây được thiết kế và chế tạo đúng và phù hợp. Do độ phức tạp của tín hiệu thu được, chương trình máy tính tác giả xây dựng tại phiên bản này chưa thể tự động lọc ra được tín hiệu dao động tự do cũng như tính toán các tham số yêu cầu khác như ứng suất, chuyển vị. Trên cơ sở tín hiệu gia tốc theo thời gian hiển thị trên máy tính bảng tại trạm, kỹ thuật viên sẽ tiến hành phân tích, và xác định chu kỳ dao động tự do  $T$  của nhịp, sau đó tần số  $F$  được tính ( $F=1/T$ ). Bảng 2 thống kê chu kỳ và tần số dao động kết cấu của 8 nhịp cầu Lam Kinh ( $N_1, N_2, \dots, N_8$ ). Số liệu từ bảng cho thấy giá trị đo từ thiết bị không dây rất gần với từ thiết bị kiểm định với sai số tương đối nhỏ hơn 5%. Qua đó cho thấy thiết bị đo được nghiên cứu chế tạo ở đây hoàn toàn có thể sử dụng để xác định dao động kết cấu nhịp cầu trong công tác kiểm định cũng như quan trắc thường xuyên sức khỏe cầu.



Hình 6. Mẫu tín hiệu đo gia tốc theo phương thẳng đứng sau khi chuẩn hóa biên độ.



Bảng 2. Kết quả ước lượng dao động kết cấu nhịp theo phương thẳng đứng tại cầu Lam Kinh.

Bộ phận đo	T (s)		F (Hz)		Δ %
	Thiết bị kiểm định tiêu chuẩn*	Thiết bị không dây trong bài báo	Thiết bị kiểm định tiêu chuẩn*	Thiết bị không dây trong bài báo	
N <sub>1</sub>	0,182	0,184	5,448	5,435	-1,087
N <sub>2</sub>	0,238	0,234	4,203	4,274	1,709
N <sub>3</sub>	0,0683	0,066	14,65	15,152	3,485
N <sub>4</sub>	0,337	0,338	2,966	2,959	-0,296
N <sub>5</sub>	0,242	0,242	4,136	4,132	0,000
N <sub>6</sub>	0,141	0,148	7,092	6,757	-4,730
N <sub>7</sub>	0,232	0,236	4,320	4,237	-1,695
N <sub>8</sub>	0,228	0,224	4,389	4,464	1,786

\*Thiết bị kiểm định tiêu chuẩn: *Cảm biến gia tốc PCB352C68 của PCB kết nối cáp tín hiệu với DAQ NI SCXI-1000DC của National Instruments*

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm chế tạo hệ thiết bị thu thập dữ liệu không dây trên cơ sở công nghệ Bluetooth và cảm biến áp điện PVDF để đo dao động kết cấu. Hệ đo không dây được thử nghiệm đo dao động kết cấu nhịp theo phương thẳng đứng tại cầu Lam Kinh, Thanh Hóa. Sai số tương đối của tần số dao động kết cấu thu được từ hệ không dây so với thiết bị kiểm định tiêu chuẩn đang sử dụng phổ biến trong kiểm định cầu nhỏ hơn 5 %. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm này cho thấy tiềm năng rất lớn và khả năng ứng dụng công nghệ không dây và cảm biến polymer áp điện trong kiểm định hay quan trắc thường xuyên kết cấu cầu tại Việt Nam với ưu điểm là lắp đặt triển khai hệ đo nhanh chóng, sử dụng đơn giản, và giá thành thấp. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào việc hoàn thiện dữ liệu đo theo các phương nằm ngang cầu và nằm dọc cầu; mở rộng đo thử nghiệm tại các cầu khác tại Việt Nam; hoàn thiện phần mềm để có thể tự động tính toán tần số dao động riêng, chuyển vị của kết cấu, và áp dụng trí tuệ nhân tạo vào việc tự động nhận dạng mẫu tín hiệu đo.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2019-ĐT-09TĐ. Tác giả trân trọng cảm ơn Công ty đầu tư công nghệ toàn cầu DHL đã giúp đỡ thực hiện thí nghiệm đo tại hiện trường.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tien Thanh Bui, Nguyen Ngoc Long, Guido De Roeck, Design of a permanent structural health monitoring system on the Guadalquivir rail bridge based on baseline ambient vibration testing and optimal sensor placement, In Proceedings of International Conference on Advances in Computational Mechanics, 2012, 967-981. <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-a-permanent-structural-health-monitoring-Bui-Roeck/4fd75ae6d8189f35d2a1138f701732a21c1336f5>
- [2] Bùi Tiến Thành, Lê Thanh Tùng, Lựa chọn vị trí tối ưu đặt điểm đo dao động phục vụ công tác đo đạc dao động cầu treo dây văng, Tạp chí Giao thông vận tải, 2016.

<http://www.tapchigiaothong.vn/lua-chon-vi-tri-toi-uu-dat-diem-do-dao-dong-phuc-vu-cong-tac-do-dac-dao-dong-cau-treo-day-vang-d32276.html>

[3] 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. [http://ibst.vn/upload/documents/file\\_upload/1493370443TaDucTuan.pdf](http://ibst.vn/upload/documents/file_upload/1493370443TaDucTuan.pdf)

[4] 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. <https://vcgate.vnu.edu.vn/articles/khao-sat-thong-so-chuyen-vi-tu-tin-hieu-cam-bien-do-gia-toc-ket-cau-dam-nhip-gian-don>

[5] H. Tran, S. Khatir, G. De Roeck, T. Bui-Tien, L. Nguyen-Ngoc, M. Abdel Wahab, Model updating for nam o bridge using particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm, Sensors, 18 (2018) 4131. <https://doi.org/10.3390/s18124131>

[6] Duong H. Nguyen, Thanh T. Bui, Guido De Roeck, Magd Abdel Waha, Damage detection in Ca-Non Bridge using transmissibility and artificial neural networks, Structural Engineering and Mechanics, 71 (2019) 175-183. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.71.2.175>

[7] B.Glisic, Ya. Yao, S.-T. E. Tung, S. Wagner, J. C Sturm, N. Verma, Strain sensing sheets for structural health monitoring based on large-area electronics and integrated circuits, Proceedings of the IEEE, 104 (2016) 1513-1528.

[8] A. Meoni et al., An experimental study on static and dynamic strain sensitivity of smart concrete sensors doped with carbon nanotubes for SHM of large structures, Sensors, 18 (2018) 831. <https://doi.org/10.3390/s18030831>

[9] S. Laflamme, F. Ubertini, H. Saleem, A. D. Alessandro, A. Downey, H. Ceylan, A. L. Materazzi, Dynamic characterization of a soft elastomeric capacitor for structural health monitoring, J. Struct. Eng., 141 (2015) 04014186.

[10] R. Zhang et al., Strain sensing behaviour of elastomeric composite films containing carbon nanotubes under cyclic loading, Composites Science and Technology, 74 (2013) 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.09.016>

[11] Y. Zhang et al., Monitoring of compression and bending process of reactive powder concrete using MWCNTs/PDMS composite sensors, IEEE Sensors Journal, 17 (2017) 6153-6159. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2740325>

[12] S. Takamatsu, T. Yamashita, T. Itoh, Meter-scale large-area capacitive pressure sensors with fabric with stripe electrodes of conductive polymer-coated fibers, Microsyst. Technol., 22 (2016) 451. <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2498-3>

[13] S. Yan et al., Development and application of a structural health monitoring system based on wireless smart aggregates, Sensors, 17 (2017) 1641. <https://doi.org/10.3390/s17071641>

[14] Hung Cao at al., Development and characterization of a novel interdigitated capacitive strain sensor for structural health monitoring, IEEE Sensors journal, 15 (2015) 6542-6548. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2461591>

[15] Đào Thanh Toàn, Sử dụng polyme chế tạo cảm biến áp lực mềm ứng dụng trong đo đạc, quan trắc công trình, Tạp chí khoa học giao thông vận tải, 62 (2018) 50-55.

[16] <https://www.analog.com/en/design-center/reference-designs/circuits-from-the-lab/cn0350.html>.

Truy cập ngày 24 tháng 2 năm 2020