



Xác định tần số dao động của dầm thép dạng công xon bằng cảm biến sợi quang FBG

Measurement of vibration of a cantilever beam using Fiber Bragg Grating sensors

Bùi Thị Hồng¹, Đỗ Anh Tú^{1,*}, Vũ Bá Thành¹, Hoàng Thị Tuyết¹, Trần Tuấn Phương², Bùi Tuấn Anh², Phạm Đức Thuận²

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Sinh viên Khoa Đào tạo Quốc tế, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Từ khóa:

TÓM TẮT

Fiber Bragg Grating (FBG)

Dầm công xon

Dạng dao động

Tần số

Biến đổi Fourier nhanh (FFT)

Phần tử hữu hạn

Hiện nay, các phương pháp đo dao động chủ yếu sử dụng cảm biến truyền thống như cảm biến gia tốc hoặc chuyển vị, tuy nhiên chúng có kích thước lớn, nhạy cảm với các tác động của môi trường dẫn đến nhiều khi thu nhận các tín hiệu, do đó việc xử lý các tín hiệu này thường khó khăn và thiếu chính xác. Trong khi đó, cảm biến sợi quang Fiber Bragg Grating (FBG) có ưu điểm như nhỏ gọn, độ bền cao, khả năng miễn nhiễm điện từ và độ chính xác trong đo đạc. Bài báo này trình bày ứng dụng cảm biến FBG để xác định tần số dao động của dầm thép dạng công xon. Bài báo đưa ra cơ sở lý thuyết về dao động của dầm công xon, xây dựng mô hình số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), và tiến hành thực nghiệm đo dao động bằng cảm biến FBG. Kết quả thực nghiệm so sánh với kết quả mô hình lý thuyết và PTHH, cho thấy sự tương đồng cao, khẳng định tính khả thi và ưu điểm của phương pháp đo dao động bằng cảm biến FBG.

Keywords:

ABSTRACT

Fiber Bragg Grating

Cantilever beam

Mode shape

Frequency

Fast Fourier

Transform (FFT)

Finite Element

Method

Vibration measurement methods for bridges primarily use traditional sensors such as accelerometers. However, these sensors are often large in size and sensitive to environmental factors, leading to signal noise that makes data processing difficult and less accurate. Recently, Fiber Bragg Grating (FBG) sensors have offered advantages such as compact size, high durability, electromagnetic immunity, and high measurement accuracy. This paper presents the application of FBG strain sensors in determining the vibration frequency of a cantilever beam. The study includes the theoretical background on cantilever beam vibrations, the development of a numerical model using the finite element method (FEM), and experimental vibration measurements using FBG sensors. The experimental results are compared with theoretical and FEM-based results, demonstrating a high degree of agreement, thereby confirming the feasibility and advantages of using FBG sensors for vibration measurement.

* Đỗ Anh Tú. Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Email: doanhtu@utc.edu.vn

[https://www.doi.org/10.55228/JTST.14\(3\).83-92](https://www.doi.org/10.55228/JTST.14(3).83-92)

Ngày nhận bài: 27/02/2025; Ngày nhận bài sửa: 16/04/2025; Ngày chấp nhận đăng: 7/05/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/05/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Việc tìm hiểu nguyên nhân và biện pháp khắc phục các hiện tượng hư hỏng công trình trong quá trình xây dựng và khai thác là một trong những vấn đề rất quan trọng để đảm bảo chất lượng và tuổi thọ của công trình. Liên quan tới vấn đề này, một hệ thống theo dõi sức khỏe kết cấu (SHM - Structural Health Monitoring) đã được nghiên cứu và phát triển để đánh giá tình trạng làm việc, xác định các khu vực bất thường và khoanh vùng hư hỏng của kết cấu cũng như cải thiện hiệu suất làm việc của các kết cấu [1].

Các kết cấu công trình thường xuyên chịu các tải trọng tĩnh (bao gồm trọng lượng bản thân kết cấu, trọng lượng các bộ phận cấu tạo, các bộ phận phi kết cấu như lan can cầu, lớp phủ,...) và tải trọng động (như hoạt tải xe cộ di chuyển trên kết cấu nhịp cầu, tải trọng gió, tải trọng va chạm, tải trọng động đất hay các tác động khác...). Các tác dụng động lực thay đổi theo thời gian làm phát sinh hiện tượng dao động của công trình [2]. Việc xác định các đặc trưng dao động (tần số dao động riêng, dạng dao động (mode)...) của kết cấu có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá tình trạng kỹ thuật của kết cấu, cho phép chẩn đoán kết cấu phục vụ công tác bảo trì công trình.

Một trong những phương pháp đánh giá tình trạng kết cấu hiện nay là sử dụng các thông số dao động như tần số dao động riêng, các dạng dao động để có thể phát hiện các khu vực hư hỏng, thuận tiện chỉ định vị trí để sửa chữa tăng cường kết cấu [3], [4]. Các phương pháp xác định tín hiệu dao động hiện nay thường được thu thập bằng các cảm biến truyền thống như cảm biến gia tốc, cảm biến vận tốc, hoặc cảm biến chuyển vị [5], [6]. Nhưng các loại cảm biến này bộc lộ nhiều nhược điểm như kích thước lớn, nhạy cảm với các tác động của môi trường như gió, nước mưa dẫn đến thu nhận các tín hiệu nhiễu loạn, do đó việc xử lý

các tín hiệu này thường rất khó khăn, thậm chí thiếu chính xác. Hơn nữa, các cảm biến này chịu ảnh hưởng lớn nếu khoảng cách lắp đặt xa, công tác chuẩn bị rất phức tạp, chi phí cao do các thiết lập với rất nhiều cảm biến để xác định được các dạng dao động.

Hiện nay với tiến bộ kỹ thuật công nghệ, các thế hệ cảm biến hiện đại sử dụng sợi quang học (Optical Fiber Sensors - OFS) được ứng dụng rất hiệu quả. Trong đó, công nghệ cảm biến sợi quang Fiber Bragg Grating (FBG) [7], [8] là một trong những lựa chọn phổ biến để đo biến dạng hoặc nhiệt độ của kết cấu do thiết bị đơn giản nhỏ gọn, tín hiệu phản xạ tương đối mạnh, độ bền cao, khả năng chịu được nhiệt độ và áp suất cao, miễn nhiễm điện từ [9], [10].

Xu hướng quốc tế trong việc ứng dụng cảm biến sợi quang FBG đang phát triển mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực như giám sát kết cấu công trình (cầu, hầm, nhà cao tầng...), giao thông thông minh, quốc phòng và hàng không, đặc biệt khi kết hợp với trí tuệ nhân tạo để dự báo hư hỏng và tự động hóa bảo trì. Trong bối cảnh đó, tiềm năng ứng dụng FBG tại Việt Nam là rất lớn khi nhu cầu phát triển hạ tầng giao thông và chuyển đổi số đang gia tăng, tạo cơ hội tích hợp cảm biến FBG vào hệ thống giám sát kết cấu ở quy mô công nghiệp, giúp giảm chi phí kiểm tra định kỳ và nâng cao độ an toàn cho công trình.

Thuật ngữ cách tử Bragg sợi quang được vay mượn từ định luật Bragg và được áp dụng cho các cấu trúc tuần hoàn được ghi bên trong lõi của sợi quang viễn thông thông thường. Do đó FBG về cơ bản là một cảm biến nhiệt độ và biến dạng, nhưng bằng cách thiết kế giao diện thích hợp, nhiều phép đo khác có thể được thực hiện để áp đặt nhiều lên cách tử dẫn đến sự thay đổi bước sóng Bragg mà sau đó có thể được sử dụng như một bộ chuyển đổi tham số. Các ứng dụng FBG trong quan trắc kết cấu và vật liệu có thể kể đến như các nghiên cứu trên

dầm bê tông dự ứng lực [11], kết cấu bê tông liên hợp [12], hay ứng dụng FBG để đo nhiệt độ và biến dạng trong dầm bê tông trong giai đoạn đóng rắn và bảo dưỡng [10], [13] hoặc trong quan trắc sức khỏe cầu [14].

Ở Việt Nam những năm gần đây, cảm biến FBG đã được nghiên cứu và thiết kế [15]. Tuy nhiên, ứng dụng cảm biến FBG trong đo đạc, quan trắc công trình còn rất hạn chế, mới chỉ bước đầu được nghiên cứu áp dụng vào quan trắc dao động kết cấu trên mô hình giàn thép [16] và mô hình cầu dây văng [17] trong phòng thí nghiệm. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chưa đưa ra được quy trình và phương pháp lắp đặt cảm biến sợi quang trên kết cấu, đồng thời việc xử lý và phân tích dữ liệu đo từ FBG để tìm ra được tần số dao động còn phụ thuộc vào phần mềm thương mại. Vì vậy, việc nghiên cứu sâu về nguyên lý hoạt động và ứng dụng cảm biến FBG trong đo đạc biến dạng và dao động của kết cấu công trình là rất cần thiết, nhằm làm chủ công nghệ và đóng góp tích cực vào các phương pháp hiện đại trong quan trắc, theo dõi và chẩn đoán kết cấu công trình.

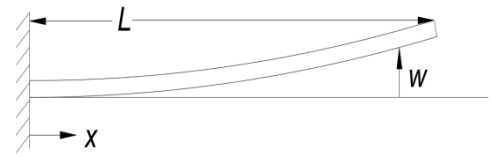
Do vậy, bài báo này trình bày việc ứng dụng cảm biến FBG để thu thập tín hiệu dao động từ một dầm thép dạng công-xon và đưa ra một quy trình xử lý tín hiệu để xác định tần số dao động và các dạng dao động tương ứng. Kết quả thu được từ thực nghiệm sẽ được so sánh với các kết quả từ lời giải lý thuyết và mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH).

2. Cơ sở lý thuyết về dao động của dầm công-xon và mô hình PTHH

2.1. Cơ sở lý thuyết về dao động của dầm công-xon

Dầm công-xon là một kết cấu được sử dụng rất phổ biến trong ngành xây dựng và giao thông với một đầu cố định và đầu còn lại tự do (xem Hình 1). Dao động của kết cấu dầm nói

chung và dầm công-xon nói riêng là bài toán kinh điển đã được nghiên cứu và mô tả chi tiết trong [18].



Hình 1. Dầm công-xon khi biến dạng.

Phương trình dao động cơ bản của dầm công-xon (với giả thiết dầm có khối lượng phân bố đều) như sau [18]:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Áp dụng điều kiện biên ở hai đầu dầm ta được:

$$w(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} X_m(x) (A_m \sin \omega_m t + B_m \cos \omega_m t) \quad (2)$$

2.2. Phương pháp tính và nghiệm của hệ

Phương trình (2) chỉ ra rằng chuyển động tùy ý của một dầm trải qua dao động tự do có thể được biểu thị dưới dạng chồng chất các dạng dao động tự do của nó (X_m), mỗi dạng dao động điều hòa đơn giản với tần số ω_m và các thành phần biên độ A_m và B_m . Các dạng dao động (hàm riêng) đối với dầm công-xon, được biểu thị theo tọa độ $\xi = x/l$, như sau:

$$X_m = (\cosh \beta_m \xi - \cos \beta_m \xi) - \gamma_m (\sinh \beta_m \xi - \sin \beta_m \xi) \quad (3)$$

trong đó β_m biểu thị giá trị riêng liên quan đến tần số với:

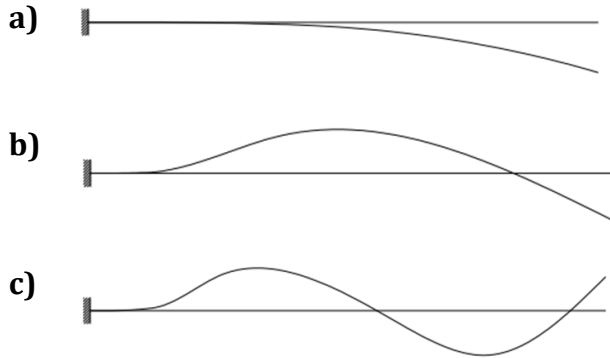
$$\beta_m = \left[\omega_m l^2 (\rho A / EI) \right]^{1/2} \quad (4)$$

và γ_m là hệ số tỷ số biên độ cho hàm riêng thứ m . Đối với dầm công-xon, năm giá trị chính xác đầu tiên của β_m và γ_m là [6]:

$$\beta_m = 1.87510410, 4.69409113, 7.85475743, 10.99554074, 14.13716839, \dots \quad (5)$$

$$\gamma_m = 0.73409550, 1.01846644, 0.99922450, 1.00003355, 0.99999855, \dots \quad (6)$$

Do đó, ta có thể đưa ra được ba dạng dao động đầu tiên của dầm công-xon như Hình 2:

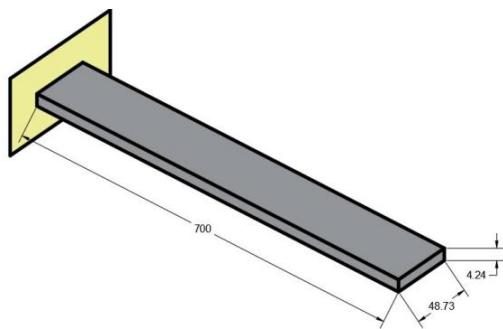


Hình 2. Ba dạng dao động đầu tiên của dầm công-xon. (a) Dạng dao động 1, (b) Dạng dao động 2, (c) Dạng dao động 3.

2.3. Xây dựng mô hình PTHH

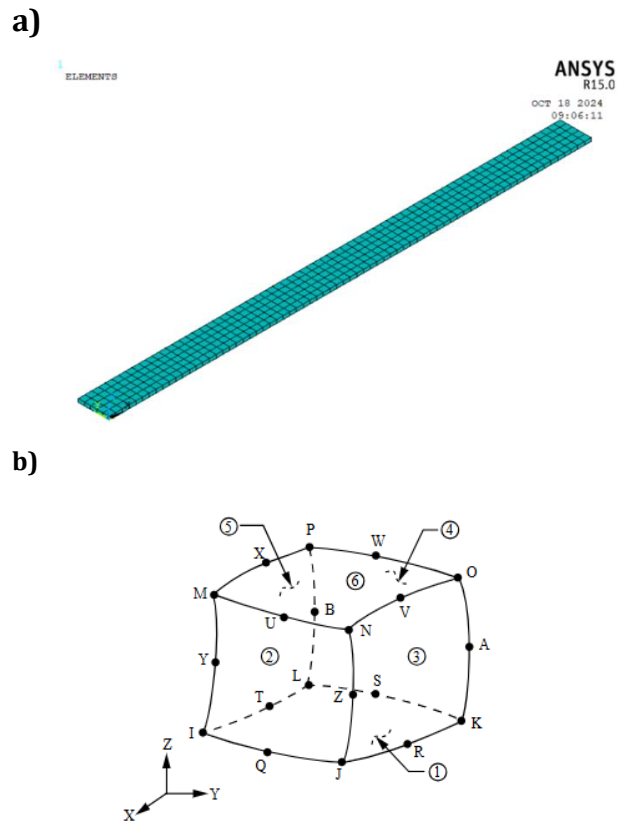
Phần này minh họa phương pháp xây dựng mô hình số để phân tích dao động của dầm công-xon. Các kết cấu cầu được mô hình hóa theo phương pháp PTHH trên phần mềm ANSYS Mechanical APDL 15.0 [19]. Việc mô hình trên các phần mềm hay chương trình tính khác có thể được tiến hành theo cách tiếp cận tương tự.

Dầm thép như Hình 3 được ngàm cố định một đầu bằng bốn bu-lông, để tạo một dầm công-xon có chiều dài là 700mm, chiều rộng là 48.73mm và chiều cao 4.24mm. Hệ số Poisson là 0.3, khối lượng riêng của thép là 7750kg/m³ và mô đun đàn hồi là 210GPa.

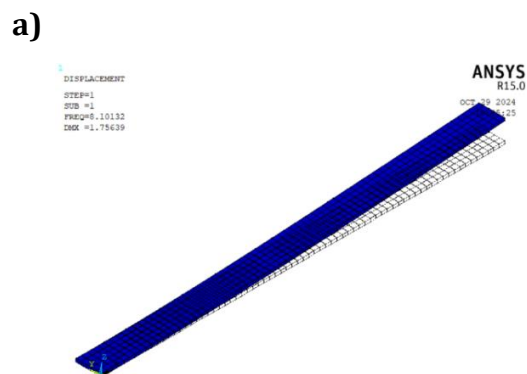


Hình 3. Kích thước của dầm công-xon trong phòng thí nghiệm.

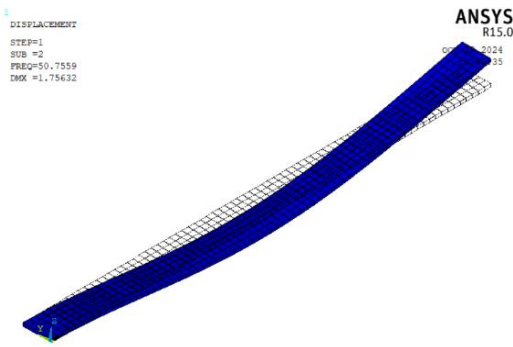
Dầm được mô hình bằng phần không gian là SOLID186 như minh họa trên Hình 4. Phần tử này có 3 bậc tự do tại mỗi nút bao gồm 3 chuyển vị theo phương x, y, z trong hệ tọa độ địa phương. Tổng cộng phần tử SOLID186 có 20 nút. Ba dạng dao động uốn đầu tiên của dầm cùng với các tần số dao động riêng tương ứng tính toán từ mô hình PTHH được thể hiện trên Hình 5.



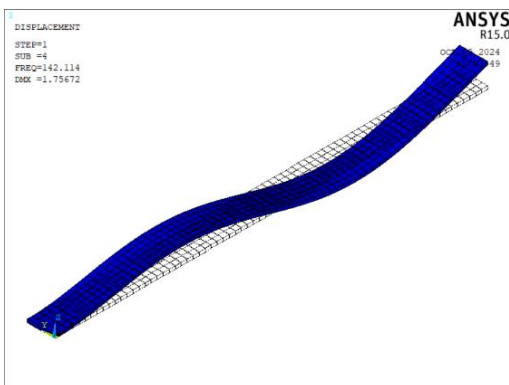
Hình 4. Dầm được mô hình bằng phần không gian là SOLID186. (a) Chia lưới PTHH của dầm công-xon, (b) Phần tử dầm không gian SOLID186 [19].



b)



c)



Hình 5. Ba dạng dao động đầu tiên và tần số của dầm công xon. (a) Mode 1: $f_1 = 7,23$ Hz, (b) Mode 2: $f_2 = 45,3$ Hz, (c) Mode 3: $f_3 = 126,87$ Hz.

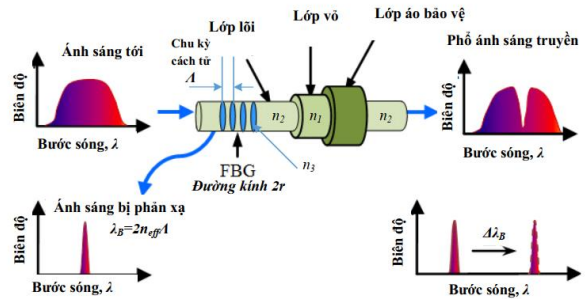
3. Thực nghiệm thu thập tín hiệu dao động từ cảm biến FBG

3.1. Giới thiệu nguyên lý cấu tạo FBG

Cách tử Bragg sợi FBG bao gồm một cấu trúc được khắc với chu kỳ đều đặn của hệ số chiết suất dọc theo lõi của sợi trong một sợi quang đơn chế độ. Cấu trúc này tạo ra các vùng có chỉ số khúc xạ cao và thấp xen kẽ, giúp phản xạ bước sóng ánh sáng thỏa mãn điều kiện cộng hưởng Bragg. Kiểu này bao gồm các cách tử sợi là các cấu trúc cách đều nhau và đồng nhất trong một vùng sợi, nơi mà pha (phase) phía trước là vuông góc với trục chính truyền sóng của sợi quang học, với các mặt phẳng cách tử có chu kỳ không đổi, được xem như các phần tử cơ bản của cách tử Bragg. Hình 6 mô tả cấu trúc cơ bản của một cách tử nhiễu xạ Bragg sợi với các tín hiệu phản xạ và

truyền đi khi đầu vào là một nguồn phổ băng rộng BBS (broadband source) [15].

Minh họa trên Hình 6, cách tử Bragg sợi FBG có đường kính lõi $2r$ cỡ $5 \div 8 \mu\text{m}$ và có lớp vỏ (cladding) được chế tạo từ vật liệu silica (SiO_2) với chiết suất $n_1 \approx 1,45$ ở bước sóng 1550 nm . Lõi sợi có chiết suất n_2 cũng từ silica nhưng được pha tạp thêm các nguyên tố như Ge (Germanium) để tăng chiết suất. Mức chênh lệch chiết suất lõi (core) và vỏ (cladding) thường cỡ từ $0.003 \div 0.005$, giúp hỗ trợ hoạt động đơn chế độ. Cách tử ở lõi có chiết suất n_3 lớn hơn n_2 và có chênh lệch cỡ $0.0003 \div 0.001$, được tạo ra bằng kỹ thuật khắc tia laser. Lớp áo bảo vệ được chế tạo từ nhựa polymer hoặc lớp phủ chịu nhiệt. Cấu trúc lõi được chế tạo thành các cách tử với chu kỳ tuần hoàn, với N cách tử (N thường lớn, cỡ hơn 1000), và có khoảng cách giữa các vùng cách tử (chu kỳ cách tử Λ) cỡ $0.5 \mu\text{m}$. Một nguồn phổ rộng được truyền vào đầu vào sẽ có một phổ hẹp bước sóng phản xạ với bước sóng cộng hưởng được gọi là bước sóng Bragg (λ_B), phổ truyền đi về phía đầu ra là phổ bị thiếu phần phổ phản xạ ở bước sóng λ_B [15].



Hình 6. Cấu trúc của một cách tử Bragg sợi [15].

Theo luật Bragg [20], cách tử sẽ chỉ phản xạ một bước sóng riêng được gọi là bước sóng Bragg và được xác định bởi hệ thức:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (7)$$

Trong đó: Λ là chu kỳ cách tử (khoảng cách giữa hai vùng chỉ số khúc xạ cao) và n_{eff} là hệ số chiết suất hiệu dụng của lõi sợi quang.

Khi có biến dạng hoặc thay đổi nhiệt độ, bước sóng Bragg sẽ bị dịch chuyển theo công thức [21]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\varepsilon_z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (8)$$

Trong đó: $\Delta\lambda_B$ là sự thay đổi bước sóng Bragg, ρ_e là hệ số quang đàn hồi, ε_z là biến dạng dọc theo trục sợi quang, α là hệ số giãn nở vì nhiệt và η là hệ số quang nhiệt.

Lưu ý rằng các thí nghiệm ở nghiên cứu này đều thực hiện trong phòng với nhiệt độ phòng giữ ở mức ổn định 25-27°C, đồng thời thời gian dầm dao động là rất ngắn (cỡ vài chục giây), cho nên có thể bỏ qua ảnh hưởng của nhiệt độ ở công thức (8).

3.2. Thiết lập các thiết bị cho công tác đo đạc

Cảm biến sợi quang của hãng FBGS (Model: DTG®-LBL-1550-F) được sử dụng như trong thí nghiệm này. Cuộn cảm biến sợi quang có chiều dài trên 5m với 20 cảm biến cách đều nhau 25cm. Mỗi cảm biến dọc theo sợi quang được cấu tạo từ hai cách tử Bragg có chiều dài khoảng 2mm cách đều nhau 3cm. Bước sóng của các cảm biến nằm trong khoảng từ 1530-1566 nm. Sợi quang FBG được gắn cố định lên dầm bằng băng dính, chạy dọc theo tim dầm và được kéo căng vừa phải nhằm đạt được kết quả chính xác nhất khi biến dạng dọc trục (Hình 7). Dọc theo chiều dài dầm có 3 cảm biến được đánh số 1, 2 và 3 bắt đầu từ đầu hẫng của dầm công xon. Một đầu của sợi quang có giắc cắm kết nối với bộ chuyển đổi (Hình 8a), và bộ chuyển đổi (hay thiết bị đọc tín hiệu) được kết nối với máy tính bằng dây cáp mạng (Hình 8b). Ở đây sợi quang FBG là cảm biến biến dạng, và được kết nối với kênh đo biến dạng.

Để đo dao động của dầm, sử dụng búa cao su loại nhỏ gõ một lực vừa phải vào đầu dầm theo phương thẳng đứng nhằm tạo dao động uốn trong mặt phẳng thẳng đứng. Khi kết cấu dao động, biến dạng của kết cấu sẽ làm sợi

quang biến dạng theo (do sợi được gắn chặt vào bề mặt kết cấu), từ đó làm thay đổi (dịch chuyển) bước sóng phản xạ của sợi quang FBG. Bộ chuyển đổi (hay thiết bị đọc tín hiệu) sẽ ghi nhận sự thay đổi bước sóng này theo thời gian với tần suất lấy mẫu cố định (ở đây là 1000 Hz). Dữ liệu thu được là độ dịch chuyển của bước sóng theo thời gian (xem mục 3.4).



Hình 7. Sợi quang FBG được gắn trên dầm thép trong phòng thí nghiệm.

a)

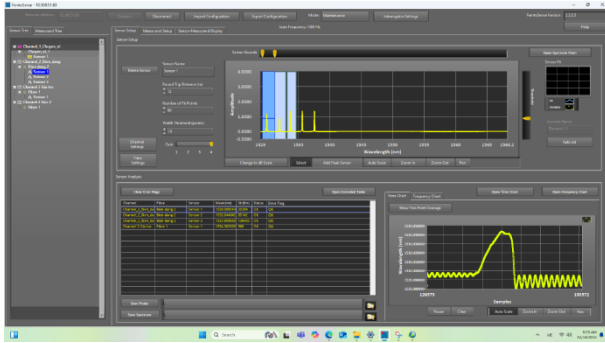


b)



Hình 8. Bộ chuyển đổi. (a) Chưa kết nối với máy tính, (b) Được kết nối với máy tính.

3.3. Dữ liệu đo từ phần mềm FemtoSense

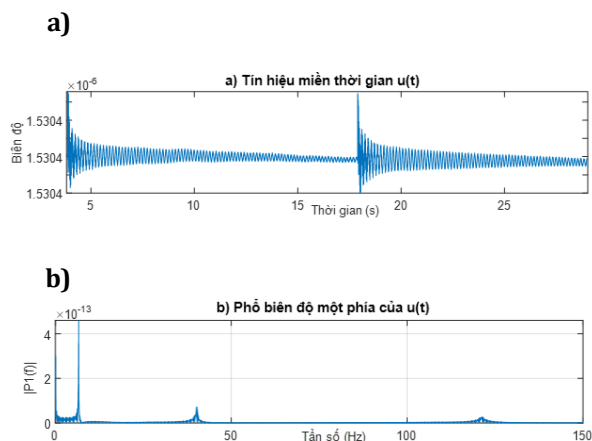


Hình 9. Phần mềm FemtoSense đọc kết quả từ các cảm biến sợi quang FBG.

Màn hình chính của phần mềm FemtoSense [22], với 3 cửa sổ chính gồm Sensor Tree để chọn kênh muốn theo dõi quá trình đó, Sensor Setup nhằm biết được bao nhiêu cảm biến và cảm biến nào đang được chọn để lấy số liệu và cuối cùng là Sensor Analysis để có những số liệu xác thực theo thời gian thực, và các tác động được hiện thị ở cửa sổ nhỏ góc bên phải. Hiện tại đang được để ở Channel 2 đo biến dạng, với hiển thị từ cảm biến 1 (Sensor 1) như Hình 9.

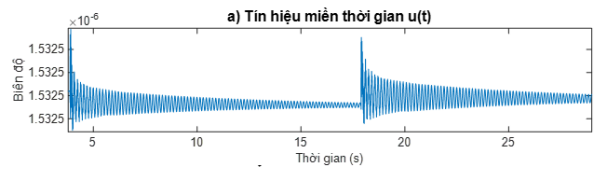
3.4. Xử lý dữ liệu

Dữ liệu đo biến dạng động từ ba cảm biến nói trên được đọc và thể hiện trên các Hình 10a, 11a và 12a dưới đây. Lưu ý rằng tần số lấy mẫu của cảm biến sợi quang FBG ở đây là 1000 Hz.

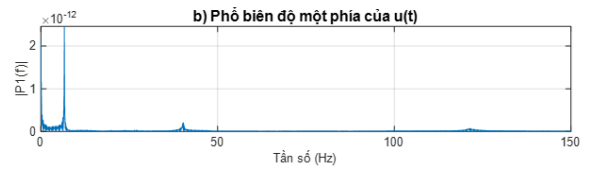


Hình 10. Cảm biến 1. (a) Tín hiệu miền thời gian $u(t)$, (b) Phổ biên độ một phía của $u(t)$.

a)

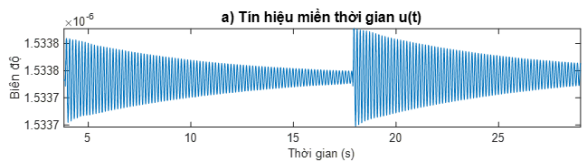


b)

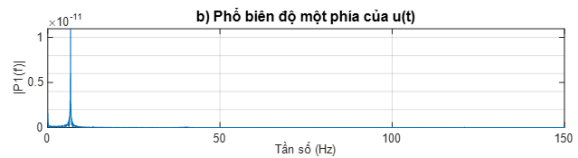


Hình 11. Cảm biến 2. (a) Tín hiệu miền thời gian $u(t)$, (b) Phổ biên độ một phía của $u(t)$.

a)



b)



Hình 12. Cảm biến 3. (a) Tín hiệu miền thời gian $u(t)$, (b) Phổ biên độ một phía của $u(t)$.

Phần mềm [22] không trực tiếp xử lý dữ liệu để tìm ra tần số dao động của dầm. Vì vậy, cần xử lý thêm dữ liệu để tìm được giá trị mong muốn. Bài báo này sử dụng chương trình Matlab [23] với biến đổi Fourier nhanh (FFT) để tìm ra các tần số dao động của dầm từ dữ liệu đo. Sau khi biến đổi FFT, phổ biên độ một phía của tín hiệu dao động trên miền tần số được thể hiện trên các Hình 10b, 11b và 12b. Dữ liệu đo được từ ba cảm biến này cho kết quả của ba tần số dao động uốn đầu tiên tương đối giống nhau với sai lệch nhỏ (không quá 0,55%).

4. So sánh kết quả

Bảng 1 so sánh kết quả tính toán tần số dao động từ ba phương pháp bao gồm lời giải lý thuyết ở mục 2.2, kết quả đo từ cảm biến sợi quang (FBG strain sensor), và kết quả từ mô hình phần tử hữu hạn sử dụng phần tử SOLID186 trong ANSYS APDL [19]. Mục tiêu của việc so sánh là đánh giá sự tương đồng và mức độ sai lệch giữa các phương pháp, từ đó làm cơ sở để xác định độ tin cậy và tính chính xác của các phương pháp khi áp dụng trong phân tích dao động. Kết quả này được so sánh với giá trị các tần số dao động tự do của dầm tính toán từ lý thuyết và mô hình PTHH, với chênh lệch không quá 2.74%. Kết quả cho thấy kết quả đo bằng FBG là rất đáng tin cậy.

Bảng 1: So sánh các tần số đo bằng FBG, tính theo lý thuyết và PTHH.

Dạng dao động (mode)	Lý thuyết (Hz)	FBG (Hz)	PTHH (Hz)	Sai số		
				Lý thuyết và FBG	FBG và PTHH	Lý thuyết và PTHH
1	7,189	7,07	7,23	1,68%	2,26%	0,57%
2	45,053	43,85	45,3	2,74%	3,31%	0,55%
3	126,15	127,50	126,87	1,06%	0,49%	0,57%

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày phương pháp thực nghiệm đo dao động một dầm công xon trong phòng thí nghiệm bằng cảm biến biến dạng sợi quang FBG. Kết quả đo đạc được so sánh với kết quả lý thuyết và mô hình phần tử hữu hạn, với sự sai khác không quá 2.74% (đối với ba dạng dao động uốn đầu tiên của dầm). Kết quả nghiên cứu sơ bộ trong phòng thí nghiệm cho thấy cảm biến sợi quang FBG là một giải pháp hiệu quả và có độ chính xác cao trong quan trắc dao động kết cấu.

Nghiên cứu này đóng góp vào việc phát triển các hệ thống hiện đại trong quan trắc, theo dõi sức khỏe kết cấu tại Việt Nam, đồng

thời tạo tiền đề cho các ứng dụng cảm biến sợi quang FBG trong quan trắc kết cấu công trình cầu.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Bùi Thị Hồng: Phương pháp, tiếp nhận tài trợ, viết – bản thảo gốc. **Đỗ Anh Tú:** Phương pháp, viết – bản thảo gốc, chỉnh sửa bản thảo, đánh giá kết quả. **Vũ Bá Thành, Hoàng Thị Tuyết:** chỉnh sửa bản thảo. **Trần Tuấn Phương, Bùi Tuấn Anh, Phạm Đức Thuận:** Thực nghiệm, mô phỏng số.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-CB-006.

-
- 1st Thi Hong Bui. *University of Transport and Communications*
 2nd Tu Anh Do*. *University of Transport and Communications*
 3rd Ba Thanh Vu. *University of Transport and Communications*
 4th Thi Tuyet Hoang. *University of Transport and Communications*
 5th Tuan Phuong Tran. *Student at the Faculty of International Education, University of Transport and Communications*
 6th Tuan Anh Bui. *Student at the Faculty of International Education, University of Transport and Communications*
 7th Duc Thuan Pham. *Student at the Faculty of International Education, University of Transport and Communications*

*Corresponding author: doanhtu@utc.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] V. Rahul, A. Shukla, K. Jayakrishna, V. R. Kar, M. Rajesh, S. Thirumalini, and M. Manikandan, "Structural health monitoring of aerospace composites," in *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2019, pp. 33–52. doi: [10.1016/B978-0-08-102291-7.00003-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102291-7.00003-4).
- [2] J. W. Tedesco, W. G. McDougal, and C. A. Ross, *Structural Dynamics: Theory and Applications*, Pearson Education, 1999.
- [3] T. T. Bui, Q. T. Vu, N. L. Nguyen, and N. H. Tran, "Enhancing time series data classification for structural damage detection through out-of-distribution representation learning," *Structures*, vol. 65, Art. no. 106766, 2024, doi: [10.1016/j.istruc.2024.106766](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106766).
- [4] T. T. Bui, Q. T. Vu, N. L. Nguyen, and N. H. Tran, "Time series data recovery in SHM of large-scale bridges: Leveraging GAN and Bi-LSTM networks," *Structures*, vol. 63, Art. no. 106368, 2024, doi: [10.1016/j.istruc.2024.106368](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106368).
- [5] A. Sabato, M. Q. Feng, Y. Fukuda, D. L. Carní, and G. Fortino, "A novel wireless accelerometer board for measuring low-frequency and low-amplitude structural vibration," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 2942–2949, May. 2016, doi: [10.1109/JSEN.2016.2522940](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2522940).
- [6] M. Biglar, M. Gromada, F. Stachowicz, and T. Trzepieciniski, "Optimal configuration of piezoelectric sensors and actuators for active vibration control of a plate using a genetic algorithm," *Acta Mechanica*, vol. 226, pp. 3451–3462, 2015, doi: [10.1007/s00707-015-1388-1](https://doi.org/10.1007/s00707-015-1388-1).
- [7] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Letters*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, 1978, doi: [10.1063/1.89881](https://doi.org/10.1063/1.89881).
- [8] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Optics Letters*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989, doi: [10.1364/OL.14.000823](https://doi.org/10.1364/OL.14.000823).
- [9] M. J. Nicolas, R. W. Sullivan, and W. L. Richards, "Large scale applications using FBG sensors: Determination of in-flight loads and shape of a composite aircraft wing," *Aerospace*, vol. 3, no. 3, Art. no. 18, 2016, doi: [10.3390/aerospace3030018](https://doi.org/10.3390/aerospace3030018).
- [10] K. K. S. Silva et al., "On the use of embedded fiber optic sensors for measuring early-age strains in concrete," *Sensors*, vol. 21, no. 12, Art. no. 4171, 2021, doi: [10.3390/s21124171](https://doi.org/10.3390/s21124171).
- [11] D. Anastasopoulos, M. De Smedt, G. De Roeck, L. Vandewalle, and E. Reynders, "Modal strain identification using sub-microstrain FBG data from a pre-stressed concrete beam during progressive damage testing," *Procedia Engineering*, vol. 199, pp. 1846–1851, 2017, doi: [10.1016/j.proeng.2017.09.108](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.108).
- [12] K. T. Lau, C. C. Chan, L. M. Zhou, and W. Jin, "Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors," *Composites Part B: Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 33–45, 2001, doi: [10.1016/S1359-8368\(00\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(00)00044-5).
- [13] C. Fernando, A. Bernier, S. Banerjee, G. G. Kahandawa, and J. Eppaarachchi, "An investigation of the use of embedded FBG sensors to measure temperature and strain inside a concrete beam during the curing period and strain measurements under operational loading," *Procedia Engineering*, vol. 188, pp. 393–399, 2017, doi: [10.1016/j.proeng.2017.04.500](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.500).
- [14] T. H. T. Chan et al., "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation," *Engineering Structures*, vol. 28, no. 5, pp. 648–659, 2006, doi: [10.1016/j.engstruct.2005.09.018](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.018).
- [15] T. C. Dũng, "Nghiên cứu và thiết kế mô phỏng cách tử Bragg sợi cho cảm biến nhiệt độ," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thông tin và Truyền thông*, vol. 03, no. CS.01, pp. 62–70, 2022.
- [16] M. Đ. Anh, "Quan trắc và đánh giá kết cấu cầu sử dụng hệ cảm biến cáp quang," Ph.D. dissertation, Trường Đại học Giao thông vận tải, Việt Nam, 2024.
- [17] N. N. Lân, "Nghiên cứu ứng dụng cảm biến sợi quang (Fiber Optic Sensors – FOS) và trí tuệ nhân tạo trong dự báo biến dạng động kết cấu công trình cầu," Bộ Giao thông vận tải, 2023.
- [18] A. W. Leissa and M. I. Sonalla, "Vibrations of cantilever beams with various initial conditions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 150, no. 1, pp. 83–99, 1991, doi: [10.1016/0022-460X\(91\)90403-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90403-7).
- [19] ANSYS Inc., *ANSYS Mechanical APDL Material Reference*, Release 15.0, Canonsburg, PA, USA, 2013.
- [20] W. L. Bragg, J. Thomson, and H. Friedrich, "Mr Bragg, Diffraction of short electromagnetic

- waves, etc.," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 43, pp. 1–7, 1914.
- [21] H. Li *et al.*, "Rapid response of high precision fiber Bragg grating based temperature sensor," in *Proceedings of Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 2018, pp. 64–67.
- [22] Faz Technology, *FAZT IX 1.0.B.2.0 System User Guide*, 2019.
- [23] MathWorks, "MATLAB." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com>.