

Ứng dụng kỹ thuật dao động ngẫu nhiên trong quan trắc sức khỏe kết cấu công trình

Application of random vibration technique in structural health monitoring

> HOÀNG TRỌNG LÂM

Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường ĐH Bách khoa-Đại học Đà Nẵng

Email: htlam@dut.udn.vn

TÓM TẮT

Hiện nay các công trình cầu nhịp lớn như cầu dây văng, cầu dây võng, cầu vòm... đều được lắp đặt hệ thống quan trắc sức khỏe phục vụ cho quá trình thi công cũng như trong quá trình khai thác cầu. Quan trắc sức khỏe kết cấu nhằm thu thập các thông tin về ứng xử của công trình, làm cơ sở cho việc đưa ra các đánh giá khả năng khai thác phục vụ của công trình. Các thông số dao động kết cấu (tần số dao động riêng, mode dao động và hệ số cản) rất quan trọng trong việc phân tích ứng xử động của kết cấu. Các thông số này được xác định dựa trên dữ liệu dao động kết cấu thu thập từ hệ thống các sensor và các thuật toán phân tích. Trong lĩnh vực quan trắc sức khỏe kết cấu công trình cầu thường sử dụng một số các phương pháp kích thích dao động như kích thích bằng lực xung kích, lực tác động tuần hoàn hoặc dưới tác dụng của xe tải di động. Mục đích thu được các thông số dao động của kết cấu. Yêu cầu đối với những phương pháp này là phải dùng lưu thông trong quá trình đo đạc. Một phương pháp khác được áp dụng khá phổ biến trong thời gian gần đây dựa trên dao động ngẫu nhiên của kết cấu dưới tác dụng của gió tự nhiên hoặc phương tiện giao thông ngẫu nhiên trên cầu với ưu điểm là đảm bảo giao thông liên tục. Bài báo tập trung ứng dụng thuật toán phân tích dao động theo giá trị riêng kết hợp với kỹ thuật kích thích dao động tự nhiên. Đây là thuật toán chỉ dựa vào kết quả phản ứng ngẫu nhiên của kết cấu để xác định các đặc trưng dao động.

Từ khóa: Dao động ngẫu nhiên; quan trắc sức khỏe công trình; thông số dao động.

ABSTRACT

Bridge health monitoring system are installed almost on long-span bridge during construction state and services state. Structural health monitoring (SHM) rapid assesment of a bridge's health and is recognized as one of the best ways to increase the safety and optimize bridge operation and maintenance. Modal identification methodologies are performed to determine the dynamic characteristics of structures. In SHM, these dynamic parameters (including natural frequencies, mode shapes and damping properties) play an important role in the understanding of the dynamic behavior of structures. In term of bridge health monitoring, the excitation sources of structures have used several methods such as impact excitation, harmonic force excitation and difference mode of truck excitation, which are subsequent to free decay responses. These methods must be prevented or control vehicle flow. The other excitation is ambient such as wind, traffic which is more advantage and does not need to interrupt traffic flow. This study focuses on the using of Natural Excitation Technique combined with the Eigen Realization Algorithm (Next-ERA) for modal identification. This is an output-only system identification with first step to compute a covariant or cross spectra of output and then which is an input of ERA. The study includes providing a mathematic algorithm on Next-ERA method and then application to analyze dynamic responses of the bridge under ambient excitation.

Key words: Ambient vibration; Structural health monitoring, modal parameters.

1. MỞ ĐẦU

Mục đích của việc quan trắc sức khỏe kết cấu công trình (SHM) được thể hiện các mức độ như sau: phát hiện các ứng xử bất thường trong kết cấu, xác định vị trí vật lý của các ứng xử bất thường, đánh giá định lượng kích cỡ và mức độ của các ứng xử bất thường, đánh giá định lượng sức khỏe và năng lực phục vụ của công trình. Việc phát hiện, định

vị và định lượng ứng xử bất thường ở giai đoạn đầu rất quan trọng trong việc thành công của SHM cho phép tiên lượng và đưa ra các giải pháp sửa chữa, bảo trì hoặc gia cường nhằm mục đích kéo dài tuổi thọ công trình [1]. Mối quan hệ giữa phản ứng động của cầu và tải trọng thông qua các đặc tính động của kết cấu. Một sự thay đổi thu thập được từ dao động của kết cấu có thể là dấu hiệu của sự xuống cấp hoặc thậm chí

xuất hiện hư hỏng. Nên yêu cầu đặt ra là kết cấu cần được theo dõi, quan trắc một cách thường xuyên và sử dụng những phương pháp có độ chính xác và tin cậy cao đồng thời giá thành phải thấp. Kỹ thuật xác định các thông số dao động từ phương pháp kích thích dao động ngẫu nhiên có nhiều ưu điểm hơn kích thích bằng phương pháp lực như: biên độ dao động kết cấu nhỏ rất phù hợp trong việc phân tích kết cấu làm việc trong giai đoạn tuyến tính, có thể quan trắc được liên tục và giá thành rất thấp. Tuy nhiên phương pháp này cũng tồn tại nhược điểm trong một số kết cấu có độ cứng lớn, cầu nhịp ngắn tỷ số giữa tính hiệu và nhiễu khá nhỏ làm cho quá trình phân tích khó khăn và độ tin cậy không cao. Sự thành công của hệ thống SHM là sự kết hợp giữa phần cứng (thiết bị thu thập thông tin), kỹ thuật xử lý số liệu (thuật toán phân tích) và giá thành [8].

Một vài thuật toán phân tích đặc trưng động học của kết cấu dựa vào kỹ thuật dao động ngẫu nhiên được áp dụng như Random Decrement technique [2] hay SSI (stochastic state space system identification) [3, 4]. Đây là những thuật toán chỉ sử dụng thông tin từ phản ứng kết cấu (thông tin đầu ra) để xác định các đặc tính dao động (tần số dao động riêng, dạng dao động và hệ số cản) của kết cấu.

Bài báo trình bày thuật toán định dạng dựa trên kỹ thuật dao động ngẫu nhiên (Natural Excitation Technique - NExT). Phương pháp NExT dựa trên việc lấy tương quan chéo (cross-correlation) giữa các kết quả dao động tại các điểm đo dưới tác dụng ngẫu nhiên [5, 6]. Hàm tương quan giữa hai kết quả dao động được tạo ra cùng một dao động ngẫu nhiên của kết cấu được chứng minh giống như một hàm xung (impulse response). Từ đó sử dụng nó như là kết quả đầu vào của thuật toán phân tích theo giá trị riêng (Eigen Realization Algorithm-ERA) [7].

2. PHÂN TÍCH DỮ LIỆU PHẢN ỨNG NGẪU NHIÊN VÀ THUẬT TOÁN PHÂN TÍCH THEO GIÁ TRỊ RIÊNG

Thuật toán phân tích theo giá trị riêng áp dụng cho thông số đầu vào là dao động tự do hoặc dao động dưới tác dụng của lực xung. Để áp dụng thuật toán này cho dao động ngẫu nhiên trước hết phải biến đổi dao động ngẫu nhiên này về dạng dao động tự do. Phần tiếp theo bài báo trình bày nội dung của phương pháp biến đổi này thông qua phương pháp kỹ thuật dao động tự nhiên và phương pháp phân tích theo giá trị riêng.

2.1. Kỹ thuật dao động tự nhiên (Natural Excitation Technique-NExT)

Nguyên lý cơ bản của NExT là hàm tương quan giữa hai phản ứng dưới tác dụng dao động ngẫu nhiên giống như dạng của phản ứng hàm xung hoặc một dao động tự do của kết cấu.

Phương trình dao động của hệ có n bậc tự do được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [c]\{\dot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

Trong đó $[m]$ ma trận khối lượng, $[c]$ ma trận cản damping, $[k]$ ma trận độ cứng, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ lần lượt là vector gia tốc, vận tốc và chuyển vị.

Giả thiết rằng damping tỷ lệ, phương trình (1) viết dưới dạng mô hình tọa độ như sau:

$$\ddot{q}^r + 2\zeta^r \omega_n^r \dot{q}^r + (\omega_n^r)^2 q^r = \frac{1}{m^r} \{\phi^r\}^T \{f(t)\} \quad (2)$$

Trong đó ký hiệu r là giá trị tương ứng với mode thứ r , \dot{q} , q , lần lượt là gia tốc, vận tốc và chuyển vị trong mô hình tọa độ, ϕ là hình dạng dao động, ω_n là tần số tự nhiên và m là khối lượng mô hình. Những phương trình này có thể giải bằng phương pháp tích phân của tích dưới dạng như sau

$$\{x\} = \sum_{r=1}^n \{\phi^r\}^T \int_{-\infty}^t \{\phi^r\} f(\tau) g^r(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

Phản ứng x_{ik} tại vị trí i gây ra bởi lực tác dụng $f_k(t)$ tại vị trí k , có thể được biểu diễn như sau

$$x_{ik} = \sum_{r=1}^n \phi_i^r \phi_k^r \int_{-\infty}^t f_k(\tau) g^r(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

Trong đó ϕ_i^r là thành phần thứ i của vector hình dạng, $g^r(t) = (1/m^r \omega_d^r) e^{-\zeta^r \omega_n^r t} \sin(\omega_d^r t)$ biểu diễn hàm phản ứng xung tương ứng với mode r , ω_d^r là tần số dao động có hệ số cản của mode r .

Khi $f_k(t)$ là hàm Dirac delta phương trình (4) có thể viết thành

$$x_{ik} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_i^r \phi_k^r}{m^r \omega_d^r} e^{-\zeta^r \omega_n^r t} \sin(\omega_d^r t) \quad (5)$$

Giả thiết $f_k(t)$ là hàm ngẫu nhiên trắng (white noise), tương quan chéo giữa phản ứng tại điểm i và điểm j kích thích bởi lực đặt tại điểm k được định nghĩa như sau

$$R_{ij}^k = E\{x_i^k(t+T)x_j^k(t)\} \quad (6)$$

Tương quan chéo giữa hai phản ứng ngẫu nhiên biểu diễn như sau

$$R_{ij}^k = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \frac{\phi_i^r \phi_j^s \phi_k^r \phi_k^s}{m^r \omega_d^r m^s \omega_d^s} \int_{-\infty}^{t+T} \int_{-\infty}^t g^r(t+T-\sigma) g^s(t-\sigma) E\{f_k(\sigma) f_k(\tau)\} d\sigma d\tau \quad (7)$$

Dựa trên giả thiết $f_k(t)$ là hàm ngẫu nhiên trắng nên hàm tương có dạng như sau

$$E\{f_k(\sigma) f_k(\tau)\} = \alpha_k \delta(\tau - \sigma) \quad (8)$$

Với $\delta(t)$ là hàm Dirac delta, phương trình (7) có thể rút gọn như sau

$$R_{ij}^k = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n \alpha_k \phi_i^r \phi_j^s \phi_k^r \phi_k^s \int_{-\infty}^t g^r(\lambda+T) g^s(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

Từ phương trình (4 & 9) theo [5] chứng minh được rằng hàm tương quan chéo giữa hai kết quả phản ứng dưới lực kích thích có dạng nhiễu trắng có thể biểu diễn dưới dạng dao động tắt dần hình sin nhân với hệ số α . Vì vậy những hàm dao động hình sin tắt dần có tính chất tương tự như hàm xung.

2.2. Thuật toán phân tích theo giá trị riêng (Eigen Realization Algorithm-ERA)

Thuật toán ERA [7, 8] là hệ thống định dạng chỉ sử dụng thông số đầu ra theo miền thời gian. Phương trình dao động (1) có thể biểu diễn dưới dạng phương trình trạng thái không gian trong miền rời rạc thời gian như sau

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (10)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k)$$

Trong đó $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times l}$, $C \in R^{m \times n}$ và $D \in R^{m \times l}$ là các ma trận trạng thái trong miền rời rạc theo thời gian; $x(k) \in R^n$ là vector trạng thái; $u(k) \in R^l$ là vector lực; $y(k) \in R^m = [y_1(k) \ y_2(k) \ \dots \ y_l(k)]^T$ vector cột biểu diễn phản ứng của kết cấu; m số tính hiệu đo của l sensor. Trong trường hợp hệ dao động tự do $u(k)=0$, từ (10) ta có:

$$y(0)=Cx(0); y(1)=CAx(0); y(2)=CA^2x(0); \dots y(k)=CA^kx(0) \quad (11)$$

Dựa vào vector dao động tự do, ma trận Hankel có dạng như sau:

$$H^s(0) = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_s \\ y_2 & y_3 & \dots & y_{s+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_s & y_{s+1} & \dots & y_{2s-1} \end{bmatrix}_{m \times s \times s} \quad (12)$$

$$H^s(1) = \begin{bmatrix} y_2 & y_3 & \dots & y_{s+1} \\ y_3 & y_4 & \dots & y_{s+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{s+1} & y_{s+2} & \dots & y_{2s} \end{bmatrix}_{m \times s \times s} \quad (13)$$

Với s là số nguyên xác định kích thước của ma trận Hankel.

Thay phương trình (11) vào phương trình (12) ma trận $H^s(0)$ có thể viết dưới dạng

$$H^s(0) = \begin{bmatrix} CAx(0) & CA^2x(0) & \dots & CA^s x(0) \\ CA^2x(0) & CA^3x(0) & \dots & CA^{s+1}x(0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^s x(0) & CA^{s+1}x(0) & \dots & CA^{2s-1}x(0) \end{bmatrix} = H_1 H_2 \quad (12)$$

Với $H_1 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{s-1} \end{bmatrix}$ $H_2 = \begin{bmatrix} Ax(0) & A^2x(0) & \dots & A^s x(0) \end{bmatrix}$ (13)

Thay phương trình (11) vào phương trình (13) ma trận $H^s(0)$ có thể viết dưới dạng

$$H^s(1) = H_1 A H_2 \quad (14)$$

Vì vậy ma trận trạng thái A và C được tính như sau

$$A = H_1^\dagger H^s(1) H_2^\dagger \quad C = E_m^T H_1 \quad (15)$$

Với H_1^\dagger ; H_2^\dagger ma trận nghịch đảo pseudo; $E_m^T = [I_m \quad 0]$ và I_m là ma trận đơn vị kích thước mxm. Phân tích theo giá trị đơn (singular value decomposition) của ma trận $H^s(0)$ biểu diễn như sau:

$$H^s(0) = U \sum V^T = \begin{bmatrix} U_n & U_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_n^n & 0 \\ 0 & \sum_p^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n^T \\ V_p^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$H_1 = U_n \sum_n^{1/2}; \quad H_2 = \sum_n^{1/2} U_n^T \quad (17)$$

Ma trận trạng thái A và C có thể được phân tích như sau

$$A = \sum_n^{-1/2} U_n^T H^s V_n \sum_n^{-1/2}; \quad C = E_m^T U_n \sum_n^{1/2} \quad (18)$$

Giá trị riêng β_i và vector riêng ψ_d của ma trận trạng thái A trong miền thời gian rời rạc được xác định như sau

$$(A_d - B) \psi_d = 0 \quad (19)$$

Trong đó $B = \text{diag}[\beta_1 \beta_2 \dots \beta_{2v}]$ ma trận chéo giá trị riêng trong miền thời gian rời rạc

$$(A_c - \Lambda) \psi_c = 0 \quad (20)$$

Trong đó $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{2v}]$ ma trận chéo giá trị riêng trong miền thời gian liên tục

Ta có $\lambda_i = \frac{\ln \beta_i}{\Delta t}$ (21)

là giá trị riêng thứ i của ma trận trạng thái A, t là thời gian lấy mẫu

Tần số dao động tự nhiên và hệ số cản của các mode dao động được tính như sau:

$$\omega_i = \sqrt{\text{Re}(\lambda_i)^2 + \text{Im}(\lambda_i)^2} \quad (22)$$

$$\zeta_i = \text{Re}(\lambda_i) / \omega_i$$

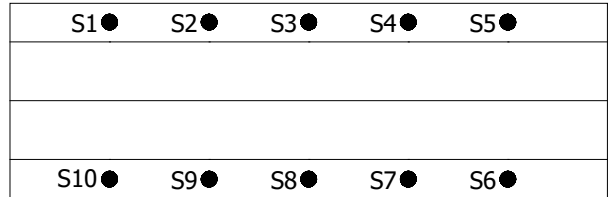
Trong đó $\text{Re}()$ và $\text{Im}()$ là phần số thực và ảo của λ_i

Hình dạng dao động của kết cấu được xác định như sau

$$\phi_i = C \cdot \Psi_d \quad (23)$$

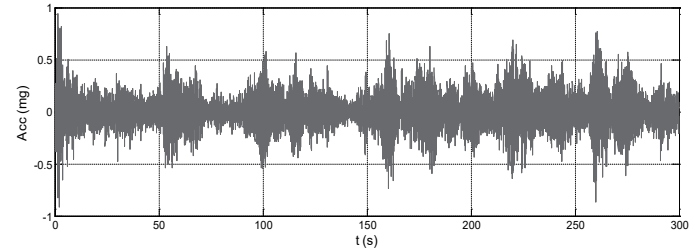
3. ỨNG DỤNG PHÂN TÍCH PHẢN ỨNG NGẪU NHIÊN CHO CÔNG TRÌNH CẦU

Để áp dụng phương pháp NExT-ERA xác định các thông số dao động của kết cấu, phản ứng động ngẫu nhiên của kết cấu cầu đo đạc từ thực nghiệm công trình cầu. Sơ đồ bố trí gia tốc kế trên cầu dầm thép liên hợp có chiều dài nhịp 50m như trên hình vẽ 1.



Hình 1. sơ đồ bố trí gia tốc kế trên mặt cầu

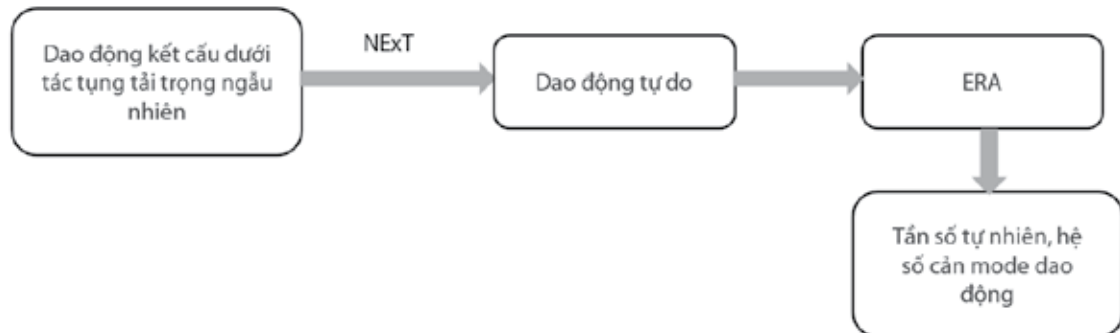
Phản ứng của kết cấu nhịp cầu theo phương đứng dưới tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên được thể hiện trên hình 2



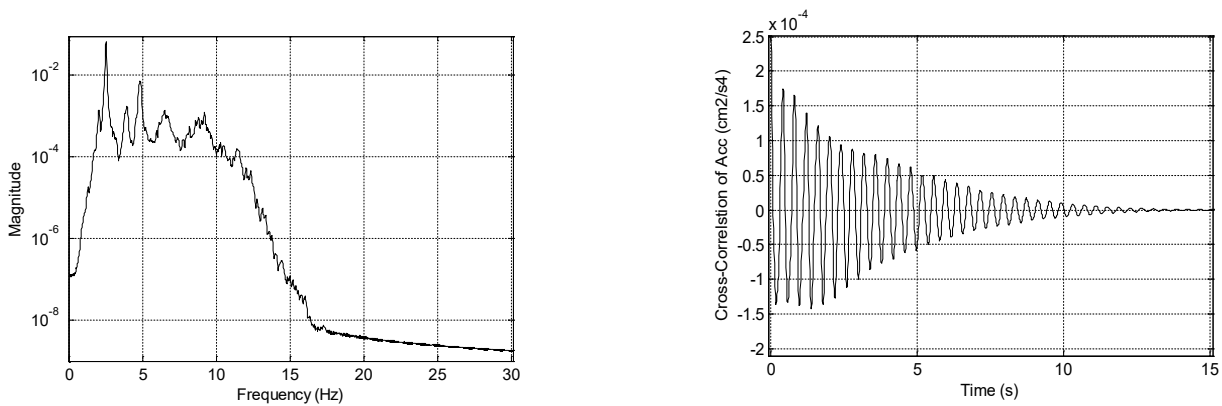
Hình 2. Phản ứng của kết cấu nhịp dưới tác dụng của tải trọng ngẫu nhiên tại sensor số 10

Đầu vào của thuật toán ERA là tham số Markov [6], tham số này có thể thu được từ thí nghiệm dao động tự do, dao động tắt dần theo hàm mũ hoặc dao động dưới tác dụng xung lực.

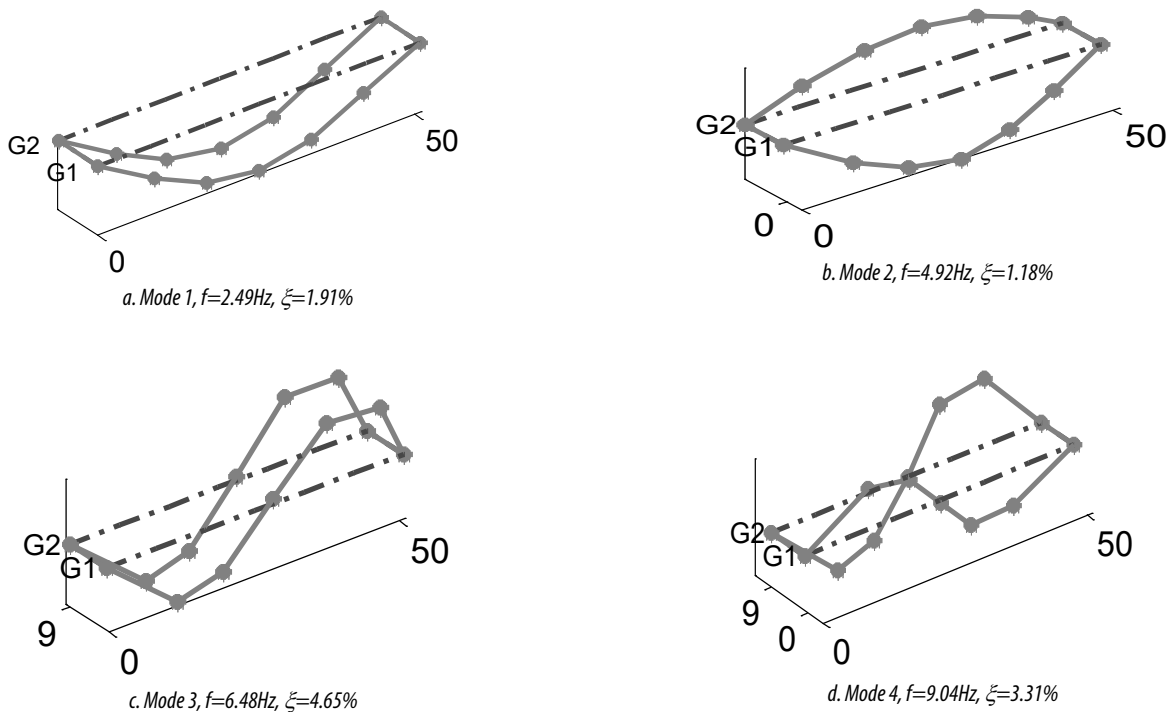
Để thu được tham số Markov từ dao động dưới tác dụng ngẫu nhiên của môi trường, đầu tiên ta xác định phổ năng lượng chéo (cross-power spectrum) giữa các kết quả đo gia tốc thu được từ các sensor, tiếp theo tính nghịch đảo của biến đổi Fourier sẽ thu được các dao động tự do. Trình tự để áp dụng thuật toán ERA đối với lực tác dụng ngẫu nhiên được thể hiện theo sơ đồ trong hình 3. Thuật toán này được tác giả xây dựng bằng ngôn ngữ Matlab. Hình 4 thể hiện phổ Fourier của dao động ngẫu nhiên và tương quan chéo thu được từ gia tốc số 10. Áp dụng thuật toán phân tích ERA cho các số liệu đầu vào dao động tự do như trong hình 4 thu được tần số dao động tự nhiên, hệ số cản và hình dạng mode như trong hình 5.



Hình 3. Sơ đồ thuật toán NExT-ERA



Hình 4. a. Phổ Fourier của kết quả đo gia tốc tại sensor số 10 (bên trái)
b. Hàm tương quan chéo của kết quả đo gia tốc tại sensor số 10 (dao động tự do) (bên phải)



Hình 5. Hình dạng mode dao động, tần số tự nhiên và hệ số cản

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày kỹ thuật xác định các thông số dao động của kết cấu dưới tác dụng của lực kích thích ngẫu nhiên. Bước quan trọng của thuật toán này là biến đổi dao động ngẫu nhiên về dao động tự do bằng hàm tương quan chéo giữa hai dao động ngẫu nhiên, sau đó áp dụng thuật toán ERA. Phương pháp phân tích các đặc tính dao động của kết cấu dựa trên kỹ thuật dao động ngẫu nhiên có nhiều ưu điểm như không cần trở giao thông, có thể quan trắc liên tục và giá thành thấp. Phương pháp này áp dụng rất hiệu quả đối với những kết cấu có độ cứng nhỏ, hệ số cản nhỏ và nhạy cảm với dao động như dao động do gió gây ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] B. Glicic "Very dense arrays of sensors for reliable and accurate damage identification" 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure-Torino 2015.
[2] J.C. Asmussen, S.R. Ibrahim and R. Brincker, 1998 "Random decrement: identification of structures subjected to ambient excitation" in *proceedings of the 16th*

international modal analysis conference (IMAC XVI). Santa Barbara, CA, USA: Society for Experimental Mechanics, pp. 914-921.
[3] B. Peeters and G.D. Roeck, "Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, (1999), 13(6), 855-878.
[4] H. T. Lam, H. Katsuchi and H. Yamada, "Stochastic identification of flutter derivatives of long span bridge deck by gust response", *Journal of Structural Engineering*, Vol 63A (2017), 421-429.
[5] C.R Farrar and G.H. Jame, "System identification from ambient vibration measurements on a bridge" *J. of sound and vibration* (1997) 205(1), 1-18.
[6] D.M. Siringoringo, and Y. Fujino (2008), "System identification of suspension bridge from ambient vibration response", *J. Eng. Struct.*, (30), 462-477.
[7] Juang, J.N., and Pappa, R.S., (1985), "An eigensystem realization algorithm (ERA) for modal parameter identification and model reduction", *J. Guid. Contr. Dyn.*, 299-318.
[8] Omar S. Sonbul and Muhammad Rashid (2023), "Algorithms and Techniques for the Structural Health Monitoring of Bridges: Systematic Literature Review" *J. MDPI*.