

PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TẦN SỐ DAO ĐỘNG TRỰC TUYẾN ÁP DỤNG CHO CÁC CẢM BIẾN THÔNG MINH

PHẠM HOÀNG KIÊN

Khoa Công trình

Trường Đại học Giao thông vận tải

Tóm tắt: Bài viết này giới thiệu về một phương pháp xử lý số liệu mới trong đó bằng cách sử dụng đồng thời một số bộ lọc thông dải dải hẹp và bộ lọc trung bình động, chúng ta sẽ tách được các thành phần dao động mong muốn và tính được biên độ của các thành phần dao động này. Phương pháp xử lý số liệu mới này không cần thiết bị có tính năng cao trong lưu trữ và xử lý số liệu. Vì vậy nó thích hợp với cảm biến thông minh trong công tác quan trắc thường xuyên.

Từ khóa: cảm biến thông minh, quan trắc tình trạng sức khỏe, phân tích thời gian – tần số, xử lý số liệu

Abstract: To detect the change in the dynamic characteristics of a structure, a time-frequency analysis technique that can detect the change in the frequency components over time is needed. This paper introduces an algorithm for real-time data processing with a narrow-band pass filter array to solve this problem. This new data processing do not require large amount of computation and large storage capacity equipments. Therefore, it is appropriate to be applied for smart sensors with low cost requirements.

Keywords: smart sensor, health monitoring, time-frequency analysis, data processing

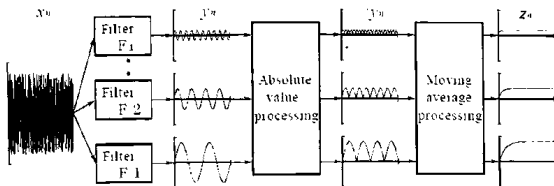
1. MỞ ĐẦU

Một trong những phương pháp có hiệu quả để áp dụng kết quả quan trắc vào công tác bảo trì là tiến hành quan trắc thường xuyên đối với tình trạng sức khỏe tổng thể của hệ kết cấu, nếu thấy có bất thường trong tình trạng sức khỏe tổng thể thì phân tích và dự đoán những vị trí có thể xảy ra hư hỏng, sau đó tiến hành kiểm tra chi tiết đối với những vị trí này. Khi kết cấu xảy ra hư hỏng, độ cứng của hệ sẽ thay đổi và do vậy các đặc tính động học cũng sẽ thay đổi. Chính vì vậy phương pháp quan trắc động thường được sử dụng khi đánh giá tình trạng sức khỏe tổng thể của hệ kết cấu. Tuy nhiên trong phương pháp quan trắc động, từ kết quả đo không thể đánh giá một cách trực tiếp tình trạng của kết cấu mà sẽ cần các thiết bị lưu trữ số liệu (kết quả đo) và xử lý các số liệu này. Đây là một trong những lý do khiến phương pháp động không thể áp dụng phổ biến mà chỉ giới hạn áp dụng cho một số kết cấu có tính trọng yếu. Để có thể áp dụng rộng rãi hơn phương pháp quan trắc động, ý tưởng về cảm biến thông minh (cảm biến có thể tự xử lý các phép tính và đưa ra kết quả đánh giá các đặc tính động học) đã được giới thiệu. Để có thể đánh giá được các đặc tính động học người ta cần tiến hành phân tích thời gian – tần số. Tuy nhiên các phương pháp phân tích thông thường (running spectrum, wavelet analysis...) đều không thích hợp với cảm biến thông minh vì chúng yêu cầu các thiết bị có tính năng cao trong lưu trữ và xử lý số liệu. Điều này làm giá thành của cảm biến thông minh trở nên rất cao không thích hợp cho việc sử dụng phổ cập. Bài viết này giới thiệu về một phương pháp xử lý số liệu mới trong đó bằng cách sử dụng đồng thời một số bộ lọc thông dải dải hẹp và bộ lọc trung bình động, chúng ta sẽ tách được các thành phần dao động mong muốn và tính được biên độ của các

thành phần dao động này. Phương pháp mới này không cần thiết bị có tính năng cao trong lưu trữ và xử lý số liệu. Vì vậy nó thích hợp với cảm biến thông minh trong công tác quan trắc thường xuyên.

2. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TẦN SỐ DAO ĐỘNG TRỰC TUYẾN

Phương pháp phân tích tần số với các phép tính đơn giản đồng thời không yêu cầu nhiều bộ nhớ được minh họa trong Hình 1. Đầu tiên cho sóng dao động qua các bộ lọc thông dải dải hẹp (narrow-band pass filter) có các tần số trung tâm (center frequency) khác nhau, chúng ta sẽ tách được các thành phần dao động tương ứng với các tần số trung tâm này. Sau đó tính các giá trị tuyệt đối của tung độ dao động và dùng phép xử lý trung bình động, chúng ta sẽ tìm được biên độ dao động của các thành phần dao động đã được tách ra. Phương pháp xử lý số liệu mới này sẽ được trình bày cụ thể ở phần dưới.



Hình 1. Phương pháp phân tích thời gian - tần số dùng bộ lọc thông dải dải hẹp

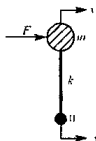
2.1. Bộ lọc thông dải dải hẹp

Để đánh giá được tình trạng sức khỏe của kết cấu từ các số liệu quan trắc (miền thời gian) chúng ta thường phải phân tích chuyển đổi từ miền thời gian sang miền tần số. Khi đó bộ lọc thông dải (band-pass filter) thường được sử dụng để làm giảm khối lượng tính toán. Tuy nhiên trong nhiều trường hợp nếu chúng ta để dải băng thông (bandwidth) có độ rộng lớn thì sẽ khó bắt được tần số dao động mà chúng ta quan tâm. Trong phần này một phương pháp xử lý số liệu mới dùng bộ lọc thông dải dải hẹp (narrow band-pass filter) sẽ được giới thiệu. Lấy ví dụ minh họa là hệ kết cấu có một bậc tự do (Hình 2), phương pháp xử lý số liệu mới này gồm ba bước sau:

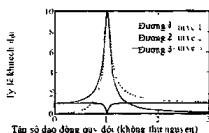
Bước 1: gọi x là chuyển vị cưỡng bức sẽ được nhập vào điểm dưới O trong bước 2. Trong bước 1 này, chúng ta coi điểm dưới O được ngàm cố định và cho một lực F (bằng tích của chuyển vị x và độ cứng của hệ k) tác dụng lên chất điểm m , tìm hệ số ứng xử động (response modification factor) của chuyển vị y tại chất điểm m (đường cong ① trong Hình 3). Hệ số ứng xử động là hệ số giữa các giá trị của ứng xử y khi cho lực F tác dụng động và tác dụng tĩnh.

Bước 2: cho điểm dưới O dao động với chuyển vị cưỡng bức là x . Gọi y là chuyển vị tương đối giữa chất điểm m và điểm dưới O, tìm hệ số ứng xử động của chuyển vị y (đường cong ② trong Hình 3). Hệ số ứng xử động trong trường hợp này là hệ số giữa chuyển vị động y và một giá trị tiêu chuẩn (giá trị tiêu chuẩn là giá trị chuyển vị khi tần số dao động của chuyển vị cưỡng bức x có giá trị vô cùng lớn).

Bước 3: tìm hệ số ứng xử động (đường cong ③ trong Hình 3) là hiệu của các hệ số ứng xử động tìm được trong các bước 1 và 2. Lấy 1 trừ đi hệ số ứng xử động của đường cong ③ này, chúng ta thu được bộ lọc thông dải dải hẹp.



Hình 2. Hệ dao động một bậc tự do



Hình 3. Ứng xử của bộ lọc

Cách dẫn giải hàm truyền (transfer function) của bộ lọc thông dải dải hẹp được trình bày như sau. Trong bước 1 với lực F là số liệu đầu vào và chuyển vị y là số liệu đầu ra, phương trình dao động của hệ sẽ có dạng như sau:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F = kx \quad (1)$$

Trong đó, $k/m = \omega_n^2$, $c/m = 2\zeta\omega_n$. Sau đó áp dụng biến đổi Laplace (Laplace transform) để tìm hàm truyền $H_1(s)$. Trong bước 2 với chuyển vị x là số liệu đầu vào và y là số liệu đầu ra, phương trình dao động của hệ sẽ có dạng như sau:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{x} \quad (2)$$

Tương tự như trên, áp dụng biến đổi Laplace chúng ta có thể tìm hàm truyền $H_2(s)$.

Hàm truyền $H_1(s)$ trong bước 3 đối với cả hệ dao động sẽ có dạng như sau:

$$H_1(s) = 1 - \{H_1(s) - H_2(s)\} = \frac{2\zeta\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

Như vậy nếu coi x là số liệu đầu vào và y là số liệu đầu ra, bộ lọc thông dải dải hẹp có thể được biểu diễn theo công thức sau:

$$y_n = \frac{1}{1 + 2\zeta\left(\frac{\omega_c T}{2}\right) + \left(\frac{\omega_c T}{2}\right)^2} \left\{ \begin{aligned} &2\left[1 - \left(\frac{\omega_c T}{2}\right)^2\right]y_{n-1} \\ &- \left[1 - 2\zeta\left(\frac{\omega_c T}{2}\right) + \left(\frac{\omega_c T}{2}\right)^2\right]y_{n-2} + 2\zeta\left(\frac{\omega_c T}{2}\right)(x_n - x_{n-2}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Trong đó T : khoảng thời gian giữa hai lần lấy mẫu, ω_c là tần số trung tâm (center frequency) của bộ lọc số ($\omega_c T/2 = \tan(\omega_n T/2)$). n thể hiện giá trị hiện tại của các đại lượng x và y , $n-1$ là giá trị của mẫu cách giá trị hiện tại i mẫu.

Cho $s = j\omega$ ta có hàm đặc tính tần số của bộ lọc này như sau:

$$H(\omega) = \frac{(2\zeta\omega_n\omega)^2 + 2j\zeta\omega_n\omega(\omega_n^2 - \omega^2)}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \quad (5)$$

Ở đây nếu cho $\omega/\omega_n = \omega'$ ta có:

$$|H_i(\omega')| = \sqrt{(2\zeta\omega')^2 / \{(\omega'^2 - 1)^2 + (2\zeta\omega')^2\}} \quad (6)$$

và

$$\angle H_i(\omega') = \tan^{-1}((1 - \omega'^2)/2\zeta\omega')$$

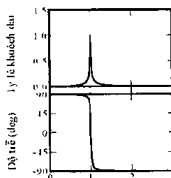
Đặc tính tần số của bộ lọc thông dải dải hẹp được thể hiện trong Hình 4. Các đặc tính này có thể được mô tả như sau. Tại tần số dao động trung tâm độ trễ sẽ bằng 0. Lệch ra khỏi giá trị tần số này độ trễ sẽ là 90° hoặc -90° . Từ điều kiện tại tần số cắt (cut-off frequency) -3dB, trị số tuyệt đối của biểu thức (6) nhận giá trị là $10^{-0.15}$ ta sẽ tìm được trị số của ω' . Công thức gần đúng xác định tần số cắt về phía nhỏ hơn so với tần số trung tâm quy đổi (không thứ nguyên) là $\omega_{low} = \sqrt{1 - 2\zeta + 2\zeta^2} = 1 - \zeta$, tần số cắt về phía lớn hơn so với tần số trung tâm quy đổi là $\omega_{high} = \sqrt{1 + 2\zeta + 2\zeta^2} = 1 + \zeta$. Dùng biến đổi Laplace ngược của hàm $H_i(s)$ chúng ta có đáp ứng xung kích (impulse response) của bộ lọc như sau:

$$\begin{aligned} L^{-1}\{H_i(s)\} &= L^{-1}\left(\frac{2\zeta\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}\right) \\ &= 2\zeta\omega_n e^{-\zeta\omega_n t} \left\{ \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) - \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

Từ đó chúng ta có thể xác định được hằng số thời gian (time constant) của đáp ứng quá độ (transient response) như sau: $\tau = 1/(\zeta\omega_n)$. Như vậy nếu hệ số giảm chấn (damping ratio) ζ của hệ kết cấu có giá trị nhỏ, dải băng thông của bộ lọc cũng có giá trị nhỏ nhưng thời gian xảy ra đáp ứng quá độ sẽ dài hơn. Ngược lại, nếu hệ số giảm chấn ζ có giá trị lớn, dải băng thông sẽ rộng nhưng thời gian để đáp ứng quá độ tắt sẽ nhanh.

2.2. Bộ lọc trung bình động xác định biên độ của các thành phần dao động

Sau khi cho sóng dao động (kết quả quan trắc động) chạy qua bộ lọc thông dải dải hẹp, chúng ta sẽ thu được một sóng đầu ra có dạng gần như chỉ là một sóng đơn (single frequency). Gọi T và A lần lượt là chu kỳ và biên độ của sóng đơn này, chúng ta có công thức biểu diễn dao động của sóng đơn như sau: $A \times \sin(2\pi/T)$. Trị số trung bình của giá trị tuyệt đối của tung độ



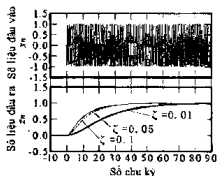
Tần số dao động quy đổi (không thứ nguyên)

Hình 4. Đặc tính độ trễ và biên độ dao động của bộ lọc thông dải dải hẹp

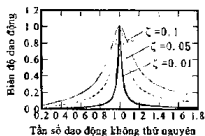
dao động trong một chu kỳ T sẽ là $2A/\pi$. Như vậy để tìm biên độ của thành phần dao động tương ứng với tần số trung tâm của các bộ lọc thông dải dải hẹp, chúng ta chỉ cần lấy trị số trung bình của giá trị tuyệt đối của tung độ dao động trong một chu kỳ T nhân với trị số trung bình động $\pi/2$. Tuy nhiên, thông thường để tính được giá trị trung bình động sẽ cần có bộ nhớ đủ lớn để lưu trữ được tối thiểu n giá trị tung độ của dao động trong một chu kỳ T . Để giải quyết điều này bộ lọc trung bình động chỉ số được sử dụng như sau:

$$z_n = ky_n + (1-k)z_{n-1} \quad (8)$$

Đối với những dao động có biên độ thay đổi không quá nhanh, bộ lọc này cho kết quả tương đương với các bộ lọc trung bình động thông thường khác. y là số liệu đầu vào, z là số liệu đầu ra, n là số lượng dữ liệu tham gia vào phép tính trung bình động, k là giá trị nghịch đảo của n . Bộ lọc trung bình động chỉ số cho phép tính được giá trị trung bình động theo thời gian mà chỉ cần lưu trữ một giá trị của số liệu đầu ra đã được tính toán tại bước trước đó. Không chỉ riêng bộ nhớ mà cả khối lượng tính toán cũng giảm đi nhiều. Ở đây, giá trị y_n trong công thức (8) sẽ được lấy là giá trị tuyệt đối của y_n trong công thức (4). Giả sử chúng ta có một sóng đơn mà từ thời điểm 0 sẽ có biên độ dao động bằng 1 như trong Hình 5. Cho sóng đơn này qua bộ lọc thông dải dải hẹp (công thức (4)) có tần số trung tâm bằng tần số dao động của sóng đơn, giá trị tuyệt đối của sóng đầu ra lại cho qua bộ lọc trung bình động chỉ số (công thức (8)). Chúng ta thu được kết quả của đáp ứng quá độ như ở hình dưới của Hình 5. Chúng ta có 3 kết quả ứng với 3 giá trị khác nhau của hệ số giảm chấn ζ . Hình 6 thể hiện đáp ứng xác lập (steady-state response) của phương pháp xử lý số liệu đã được giới thiệu trong bài viết này khi cho tín hiệu sóng đơn trong Hình 5 qua bộ lọc thông dải dải hẹp (công thức (4)) có tần số trung tâm thay đổi trong phạm vi từ 0.2 lần đến 1.8 lần tần số dao động của sóng đơn. Giá trị của hệ số giảm chấn ζ trong Hình 6 cũng được giả thiết tương tự như giá trị đã được sử dụng trong hình dưới của Hình 5. Từ các Hình 5 và 6, chúng ta cũng được các kết quả tương tự như những kết luận đã được nêu trong phần cuối của mục 2.1 về mối qua hệ giữa hệ số giảm chấn ζ và độ lớn của dải băng thông và thời gian của đáp ứng quá độ.



Hình 5. Đáp ứng quá độ



Hình 6. Đáp ứng xác lập

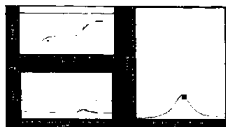
3. VÍ DỤ VỀ XÂY DỰNG HỆ THỐNG PHÁT HIỆN SỰ THAY ĐỔI CỦA TẦN SỐ DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA HỆ KẾT CẤU

Phương pháp xử lý số liệu được giới thiệu trong bài viết này chủ yếu là để áp dụng cho các cảm biến thông minh trong tương lai. Tuy nhiên, để xác nhận khả năng của phương pháp này

trong việc phát hiện sự thay đổi của tần số dao động riêng của hệ kết cấu, người ta đã áp dụng một cách mô phỏng vào hệ quan trắc như được minh họa trong Hình 7. Hệ này nhằm mục đích quan trắc sự thay đổi của tần số dao động riêng của kết cấu, nó bao gồm những thiết bị sau: máy tính cá nhân, thiết bị thu dữ liệu Data Logger, đầu đo gia tốc và mô hình kết cấu có dạng thanh công son trên đó có gắn quả nặng, vị trí quả nặng có thể thay đổi tùy ý. Đầu đo gia tốc được gắn vào vị trí ngoài cùng của thanh công son. Hình 8 thể hiện các kết quả quan trắc. Hình bên trái phía trên và bên trái phía dưới trong Hình 8 lần lượt thể hiện kết quả quan trắc sự biến đổi của tần số dao động riêng và hệ số giảm chấn. Bằng cách thay đổi vị trí của quả nặng (đầu tiên là gắn ở đầu thanh, sau đó là ở vị trí 1/3 và 2/3 chiều dài thanh) người ta làm thay đổi tần số dao động riêng của hệ. Kết quả quan trắc (với các tần số dao động riêng lần lượt là 19.5 Hz, 20.7 Hz và 23 Hz) phù hợp với các kết quả tính toán lý thuyết.



Hình 7. Ví dụ mô phỏng về hệ thống quan trắc



Hình 8. Ví dụ về kết quả quan trắc

4. KẾT LUẬN

Các thuật toán của phương pháp phân tích tần số dao động trực tuyến đã được trình bày, trong đó, bằng cách sử dụng đồng thời một số bộ lọc thông dải dải hẹp và bộ lọc trung bình động, chúng ta sẽ tách được các thành phần dao động mong muốn và tính được biên độ của các thành phần dao động này.

Phương pháp xử lý số liệu mới này không cần thiết bị có tính năng cao để lưu trữ và xử lý số liệu. Vì vậy nó thích hợp với cảm biến thông minh trong công tác quan trắc thường xuyên.

Tính hữu hiệu của phương pháp cũng đã được kiểm chứng thông qua một mô hình đơn giản để quan trắc sự thay đổi của tần số dao động riêng của hệ kết cấu.

Ngày nhận bài lần đầu: 25/9/2015

Ngày nhận bài sửa: 27/11/2015

Ngày chấp nhận đăng bài: 30/10/2015

Tài liệu tham khảo

- [1]. Leon Cohen, 1994. Time Frequency Analysis: Theory and Applications (Prentice Hall Signal Processing Series), Prentice Hall.
- [2]. Takatoshi O., Toshihiro O. and Yoshitaka N., 2004. Highly accurate estimation of structural vibration-frequency by ambient vibration AR model, *Journal of JSCE*, No. 759/I-67, pp. 271-282.
- [3]. Tominori N., and Fujino Y., 2009. Smart sensor middleware development for structure vibration measurement, *Journal of JSCE A*, Vol.65, No.2, pp. 523-535.

Phản biện: TS. Nguyễn Thị Cẩm Nhung, TS. Bùi Tiến Thành.