



NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG MẤP MÔ MẶT ĐƯỜNG TRÊN MIỀN THỜI GIAN

Vũ Tuấn Đạt^{1*}

Tóm tắt: Mấp mô mặt đường (RSR) theo phương thẳng đứng, được xem là quá trình ngẫu nhiên ổn định, là số liệu quan trọng trong mô phỏng động lực học và dao động của ô tô. Trong bài báo này, một số phương pháp mô phỏng RSR trên miền thời gian đã được đề cập và phân tích. Xem xét đến ảnh hưởng của vận tốc chuyển động của ô tô, phương pháp biến đổi ngược Fourier (IFT) trên cơ sở mật độ phổ công suất (PSD) của mặt đường đã được lựa chọn để mô phỏng RSR. Kết quả mô phỏng cho thấy: PSD của mặt đường có được từ mô phỏng phù hợp với PSD của cấp mặt đường đã cho.

Từ khóa: Mấp mô mặt đường; quá trình ngẫu nhiên ổn định; mật độ phổ công suất; biến đổi ngược Fourier; trên miền thời gian.

Research on the method of simulating road surface roughness in time domain

Abstract: The vertical road surface roughness (RSR), as a stationary stochastic process, is the most important data for automobile dynamic-vibration simulations. In this paper, the methods of simulating RSR in time domain were introduced and analyzed. Considering the effect of the vehicle velocity, the inverse Fourier transform (IFT) method was chosen to simulate the RSR based on power spectral density (PSD) of road profiles. The simulation results show that: the PSD, which was generated in this method, is same as the given one.

Keywords: Road surface roughness; stationary stochastic process; power spectral density; Inverse Fourier transform; in time domain.

Nhận ngày 10/5/2017; sửa xong 13/6/2017; chấp nhận đăng 23/6/2017
Received: May 10, 2017; revised: June 13, 2017; accepted: June 23, 2017



1. Đặt vấn đề

Trong quá trình khai thác, có nhiều nguồn kích thích gây ra dao động của ô tô, trong đó nguồn kích thích từ mặt đường không bằng phẳng là nguyên nhân chủ yếu, có ảnh hưởng đến nhiều tính năng khai thác, đặc biệt ảnh hưởng đến tính êm dịu và an toàn chuyển động của ô tô. Vì vậy, trong các nghiên cứu về dao động và độ bền kết cấu của ô tô khi chịu tải trọng động từ mặt đường thì số liệu về độ mấp mô biên dạng mặt đường (Road surface roughness - RSR) là không thể thiếu [1-3].

Để thu được số liệu phản ánh RSR thường sử dụng hai phương pháp: thực nghiệm đo đạc và mô phỏng. Phương pháp thực nghiệm cho kết quả chính xác hơn, phản ánh được cả trắc dọc và trắc ngang của một đoạn đường cụ thể. Tuy nhiên phương pháp này đòi hỏi chi phí lớn và tốn nhiều công sức. Hiện nay, với các phương pháp tính toán hiện đại và có sự trợ giúp của máy tính, phương pháp mô phỏng RSR đã và đang được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu động lực học phương tiện nói chung và dao động của ô tô nói riêng.

Trong bài báo này, trên cơ sở lý luận quá trình ổn định ngẫu nhiên thông qua mật độ phổ công suất (Power Spectral Density - PSD) mô tả đặc tính thống kê của mặt đường, tác giả đã tiến hành nghiên cứu một số phương pháp mô phỏng RSR trên miền thời gian. Xem xét đến sự ảnh hưởng của vận tốc ô tô, trên cơ sở tiêu chuẩn ISO 8608:1995 về phân cấp mặt đường theo PSD, bài báo đã lựa chọn phương pháp biến đổi ngược Fourier (Inverse Fourier transform - IFT) để mô phỏng RSR trên miền thời gian. Phương pháp IFT có ý tưởng và thuật toán rõ ràng, kết quả chính xác hơn so với các phương pháp khác. Hiện nay, phương pháp IFT được sử dụng rất phổ biến trong mô phỏng RSR trên miền thời gian trong nghiên cứu dao động của ô tô.

¹TS, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải.

*Tác giả chính. E-mail: wjduatc@gmail.com.



2. Cơ sở lý luận trong mô phỏng RSR

RSR là độ sai lệch theo phương thẳng đứng của bề mặt đường so với mặt chuẩn nào đó. Nguyên nhân làm cho mặt đường không bằng phẳng có thể được chia làm ba nguyên nhân chính: yếu tố tự nhiên, do chất lượng thi công xây dựng và do quá trình sử dụng chịu tải trọng từ các phương tiện giao thông. Nghiên cứu về RSR là một phần trong nghiên cứu đo lường và kiểm tra chất lượng mặt đường được xuất phát từ những nhu cầu: kiểm tra và đánh giá chất lượng mặt đường; cung cấp số liệu thống kê cho hệ thống quản lý mặt đường; tham số hóa dùng trong các mục đích nghiên cứu khác như mô phỏng RSR, nghiên cứu động lực học phương tiện,...

2.1 Hàm PSD của RSR

Từ rất nhiều các nghiên cứu đo đạc thực nghiệm cho thấy RSR có đặc tính ngẫu nhiên, ổn định, tuân theo luật phân bố Gaussian. Do đó, có thể dùng lý luận quá trình ổn định ngẫu nhiên thông qua PSD mô tả đặc tính thống kê của mặt đường [4]. Căn cứ lý luận biến đổi Fourier, bất cứ hàm xác định $f(t)$, thỏa mãn điều kiện khả tích tuyệt đối đều có thể biến đổi Fourier trực tiếp (từ hàm số có tính chu kỳ sang cấp số Fourier) và thu được phổ tần số tương ứng. Tuy nhiên, đối với quá trình ngẫu nhiên bình ổn $q(t)$ thường không thỏa mãn điều kiện khả tích tuyệt đối, vì vậy không thể tiến hành phân tích trực tiếp từ số liệu miền trên thời gian. Căn cứ tính chất của hàm tự tương quan $R_q(\tau)$ khi $\tau \rightarrow \infty$ thì $R_q(\tau) \rightarrow 0$, vì vậy có thể tiến hành phân tích phổ tần số đối với quá trình ngẫu nhiên thông qua hàm tự tương quan. Căn cứ công thức Wiener-Khinchine, dưới đây được gọi là cặp công thức biến đổi Fourier:

$$S_q(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_q(X) e^{-2i\pi\Omega X} dX \quad (1)$$

$$R_q(X) = \int_{-\infty}^{\infty} S_q(\Omega) e^{2i\pi\Omega X} d\Omega \quad (2)$$

trong đó: $S_q(\Omega)$ là hàm PSD của mặt đường; $R_q(X)$ là hàm tự tương quan không gian, $R_q(X) = E[q(x), q(x+X)]$; x là hướng chuyển động của ô tô; X là khoảng cách theo hướng chuyển động, tương quan với τ trong hàm tự tương quan; Ω là tần số sóng mặt đường, là nghịch đảo của bước sóng không gian của mặt đường λ . Theo lý luận quá trình ngẫu nhiên, công thức (1) và (2) biểu diễn theo tần số dài f và tần số góc ω như sau:

$$S_q(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_q(\tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

$$R_q(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_q(f) e^{2i\pi f\tau} df \quad (4)$$

và:

$$S_q(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_q(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

$$R_q(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_q(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (6)$$

trong đó: $R_q(X) = E[q(x), q(x+X)]$ là hàm tự tương quan thời gian; $\omega = 2\pi f$ và $S_q(f) = 2\pi S_q(\omega)$. Giả thiết ô tô có vận tốc v theo hướng chuyển động x , ta có $X = v\tau$. Với $\Omega = \lambda^{-1} = (vT)^{-1} = f/v$, trong đó X là chu kỳ sóng mặt đường, từ (1) ta có:

$$S_q(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_q(v\tau) e^{-2i\pi\left(\frac{f}{v}\right)(v\tau)} d(v\tau) = v \int_{-\infty}^{\infty} R_q(\tau) e^{-2i\pi f\tau} d\tau = v S_q(f) \quad (7)$$

Do vận tốc ô tô không đổi, $R_q(\tau)$ chỉ là hàm của τ , từ (7) ta có:

$$S_q(\Omega) = v S_q(f) = 2v\pi S_q(\omega) \quad (8)$$

2.2 Tiêu chuẩn ISO 8608:1995

Năm 1995, Tổ chức tiêu chuẩn quốc tế (ISO) đưa ra phương pháp biểu thị RSR với tiêu chuẩn ISO 8608:1995 [5]. Công thức PSD của RSR được biểu thị như sau:

$$S_q(\Omega) = S_q(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (9)$$

trong đó: Ω_0 là tần số không gian tham khảo; $\Omega_0 = 0.1m^{-1}$; w là chỉ số mũ, thường lấy giá trị bằng 2. Trên cơ sở đó, đưa ra 8 cấp mặt đường tương ứng phạm vi cận trên, cận dưới và giá trị trung bình của PSD tương ứng với Ω_0 . Đồng thời đưa ra giá trị bình phương trung bình (Root Mean Square - RMS) σ_q là tương ứng với $0.011m^{-1} \leq \Omega \leq 2.83m^{-1}$ như trong Bảng 1.

Bảng 1. Phân cấp mật đường theo PSD - ISO 8608:1995

Phân cấp mật đường	$S_q(\Omega)(10^{-6}\text{m}^2/\text{m}^4)$ với $\Omega_0 = 0.1(\text{m}^{-1})$			$\sigma_q(10^{-6}\text{m}^2/\text{m}^4)$ với $0.011\text{m}^{-1} \leq \Omega \leq 2.83\text{m}^{-1}$		
	Cận dưới	Trung bình	Cận trên	Cận dưới	Trung bình	Cận trên
A	8	16	31	2.69	3.81	5.38
B	32	64	128	5.38	7.61	10.77
C	128	256	512	10.77	15.23	21.53
D	512	1024	2048	21.53	30.45	43.06
E	2048	4096	8192	43.06	60.90	86.13
F	8192	16284	32768	86.13	121.80	172.26
G	32768	65536	131072	172.26	243.61	344.52
H	131072	262144	524288	344.52	487.22	689.04

Dạng hàm phân thức của PSD trên miền tần số [6]:

$$S_q(\Omega) = (2\alpha\beta^2) / \pi(\alpha^2 + \Omega^2) \quad (10)$$

trong đó: α, β là hằng số phụ thuộc cấp mật đường của hàm phân thức. Căn cứ hàm phân thức Parkhilovski biểu thị PSD trên miền tần số:

$$S_q(\Omega) = (2\alpha\beta^2) / (\alpha^2 + (2\pi\Omega)^2) \quad (11)$$



3. Các phương pháp mô phỏng RSR trên miền thời gian

3.1 Phương pháp lọc tuyến tính (– LFWN)

Cơ sở của phương pháp lọc tuyến tính (Linear Filtering White Noise - LFWN) là dựa trên hàm phân thức của PSD theo công thức (10). Dùng phương trình lọc tuyến tính sau làm mô hình toán học kích thích RSR trên miền thời gian [6]:

$$\dot{q}_{ij}(t) + \alpha v q_{ij}(t) = \xi_{ij} \quad i, j = 1, 2 \quad (12)$$

trong đó: i là biểu thị vị trí kích thích tại bánh trước ($i=1$) và bánh sau ($i=2$); j là biểu thị vị trí kích thích của bánh bên trái ($j=1$) và bánh bên phải ($j=2$); $q_{ij}(t)$ là kích thích ngẫu nhiên của RSR; v là vận tốc chuyển động của ô tô; ξ_{ij} là độ lệch chuẩn của quá trình ngẫu nhiên Gaussian, thỏa mãn điều kiện kỳ vọng:

$$E[\xi_{1i}(t)\xi_{1j}(\tau)] = 2\alpha v \beta^2 \delta(t-\tau) \delta_{ij} \quad (13)$$

$$E[\xi_{2i}(t)\xi_{2j}(\tau)] = 2\alpha v \beta^2 \delta(t-\tau) \delta_{ij} \quad (14)$$

$$E[\xi_{1i}(t)\xi_{2j}(\tau)] = 2\alpha v \beta^2 \delta(|t-\tau|-t_w) \delta_{ij} \quad (15)$$

trong đó: $t_w = (l_f + l_r) / v$; $v = L / v$ với l_f, l_r là khoảng cách từ trọng tâm tới cầu trước và cầu sau; L là chiều dài cơ sở của ô tô; $\delta(t)$, δ_{ij} là hàm suy rộng Dirac và Kronecker.

Trong công thức (12), ξ_{ij} đóng vai trò thông số đầu vào, q_{ij} đóng vai trò thông số đầu ra của quá trình lọc sóng. $q_{ij}(t)$ và $\dot{q}_{is}(t)$ là mô phỏng RSR và tốc độ thay đổi của RSR theo thời gian. Mặt khác, công thức (12) có thể tiến hành biến đổi Fourier để kiểm chứng sự phù hợp PSD trên miền tần số của hàm phân thức (10). Phương pháp LFWN được sử dụng tương đối phổ biến để mô phỏng RSR theo phổ mật đường tiêu chuẩn trên miền thời gian.

3.2 Phương pháp phân tán thời gian trên cơ sở hàm phân thức của PSD - IUWN

Căn cứ hàm phân thức Parkhilovski biểu thị PSD theo công thức (11). Thiết lập mô hình mô phỏng phân tán trên miền thời gian (Integral Unit White Noise - IUWN) của RSR bằng công thức đệ quy:

$$q_0 = \beta \omega_0 \quad (16)$$

$$q_i = e^{-\alpha \Delta t} q_{i-1} + \beta \sqrt{1 - e^{-2\alpha \Delta t}} \omega \quad (17)$$

trong đó: Δt là khoảng chia thời gian của các điểm; ω là giá trị ngẫu nhiên độc lập tuân theo phân bố chuẩn $N(0,1)$; q_0, ω_0 là giá trị ban đầu được chọn.

Quá trình mô phỏng bao gồm các bước: dùng phương pháp số dư sinh dãy số ngẫu nhiên phân bố bình quân $\{u_i\}$ trong vùng $(0,1)$. Từ đó, tính toán dãy số ngẫu nhiên có phân bố chuẩn là ω . Sau cùng, xác định khoảng chia thời gian Δt , theo công thức (17) tính toán được RSR trên miền thời gian q_i . Khi biết vận tốc

chuyển động của ô tô, sẽ biết được độ trễ thời gian của bánh sau so với bánh trước. Phương pháp IUWN cho tính toán đơn giản, tuy nhiên độ chính xác mô phỏng phụ thuộc giá trị Δt , số lượng dãy số ngẫu nhiên trong phân bố chuẩn $N(0,1)$ và độ chính xác khi tính toán dãy số ngẫu nhiên này.

3.3 Phương pháp chất chồng điều hòa - HS

Phương pháp chất chồng điều hòa (Harmonic Superposition Method - HS) về bản chất cũng là phương pháp mô phỏng RSR bằng phân tán thời gian. Tín hiệu ngẫu nhiên có thể thông qua biến đổi Fourier phân tán để phân thành tập hợp các sóng hình sin có tần số và biên độ khác nhau. PSD của RSR tương ứng với bình phương dải tần số tương ứng với các giá trị biên độ khác nhau của các sóng sin này. Khi biết PSD của RSR là $S_q(f)$ trong khoảng tần số $f_1 \leq f \leq f_2$, lợi dụng tính chất của quá trình bình ổn ngẫu nhiên, phương sai σ^2 của RSR được xác định:

$$\sigma^2 = \int_{f_1}^{f_2} S_q(f) df \quad (18)$$

Chia khoảng (f_1, f_2) thành n khoảng nhỏ, mỗi khoảng có bước tần số là Δf và tần số trung tâm là f_{mid-i} , $i = (1, 2, \dots, n)$. Thay thế giá trị $S_q(f)$ bằng các giá trị $S_q(f_{mid-i})$ trong tất cả các khoảng nhỏ. Công thức (18) có thể viết thành:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n S_q(f_{mid-i}) \Delta f \quad (19)$$

Mục tiêu bây giờ cần tìm là các hàm số sin có tần số f_{mid-i} và độ lệch chuẩn là $\sqrt{S_q(f_{mid-i}) \Delta f}$. Hàm số này có dạng $\sqrt{S_q(f_{mid-i}) \Delta f} \sin(2\pi f_{mid-i} t + \theta_i)$. Sử dụng phương pháp chất chồng cho tất cả các hàm số hình sin tương ứng với mỗi khoảng chia, sẽ có được kích thích ngẫu nhiên của RSR trên miền thời gian [7]:

$$q(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_q(f_{mid-i}) \Delta f} \sin(2\pi f_{mid-i} t + \theta_i) \quad (20)$$

trong đó: θ_i là số ngẫu nhiên của phân bố đều, $\theta_i = (0, 2\pi)$. Cả hai vế công thức (20) đều có thể đạo hàm theo thời gian, vì vậy cũng tìm được giá trị ngẫu nhiên của vận tốc thay đổi RSR. Với khoảng chia đủ nhỏ và n đủ lớn, đặc trưng tần số của kích thích RSR trên miền thời gian theo (20) với phổ mật đường là như nhau. Như vậy, $q(t)$ không chỉ phản ánh mức độ RSR mà còn phản ánh được yếu tố vận tốc của ô tô. Trong công thức (20), giá trị θ_i không làm ảnh hưởng tới giá trị PSD, nhưng có thể làm cho giá trị $q(t)$ quá lớn, làm giảm tính ứng dụng của mô hình.

Phương pháp HS thích hợp với mô phỏng RSR trên miền thời gian với phổ mật đường có được khi đo lường thực nghiệm. Đặc biệt là đối với các mặt đường phi tiêu chuẩn hoặc không có phân cấp theo ISO.

3.4 Phương pháp biến đổi ngược Fourier - IFT

Các phương pháp mô phỏng LFWN, IUWN và HS trên đây có nhược điểm là tồn tại sai số nhất định do tương quan giữa các hàm PSD của RSR và hàm PSD có sẵn là không đồng nhất. Cơ sở của phương pháp biến đổi ngược Fourier (Inverse Fourier Transform - IFT) là căn cứ biểu đạt thức dưới dạng hàm số mũ của PSD, sử dụng phương pháp IFT để mô phỏng kích thích ngẫu nhiên từ PSD. Các bước cơ bản của phương pháp này như sau [8]:

- Tiến hành phân tán hợp lý PSD của RSR thành các số liệu trên miền thời gian;
- Dùng biến đổi Fourier - FFT tính toán RSR phân tán trên miền thời gian;
- Tiến hành biến đổi IFT với những quy tắc bổ sung đối với số liệu RSR. Từ đó thu được số liệu của RSR trên miền thời gian mà vẫn đảm bảo sự đồng nhất của giữa các hàm PSD của RSR và hàm PSD có sẵn.

Giả định tần số không gian của RSR có giới hạn trên và dưới là Ω_2 và Ω_1 . Theo (9), ta có:

$$S_q(\Omega) = \begin{cases} S_q(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} & \Omega_1 \leq \Omega \leq \Omega_2 \\ 0 & \Omega < \Omega_1; \Omega > \Omega_2 \end{cases} \quad (21)$$

Việc lựa chọn phạm vi tần số không gian phải đảm bảo có chứa các vùng tần số thời gian phù hợp với phạm vi tốc độ chuyển động của ô tô. Giả thiết dao động của ô tô có phạm vi tần số thời gian là f_2 và f_1 , giới hạn tần số không gian là: $\Omega_2 = f_2 / v$ và $\Omega_1 = f_1 / v$. Với quãng đường chiều dài L , số điểm chia là N , khoảng cách giữa hai điểm theo chiều dài là ΔL hay $L = N \Delta L$, khoảng cách điểm chia theo tần số không gian $\Delta \Omega = 1/L$. Trong tính toán mô phỏng, để đảm bảo PSD không bị lặp chồng tần số phải thỏa mãn một số điều kiện: $\Delta L \leq 1/(2\Omega_2)$, $\Omega_1 \geq \Delta \Omega$ và $L \geq 1/\Omega_1$. Đặt q_m với $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ là số liệu của RSR, biến đổi Fourier phân tán ta có:

$$Q_i = \sum_{m=0}^{N-1} q_m e^{\frac{j2\pi im}{N}} \text{ với } i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (22)$$

Mối quan hệ giữa Q_i và PSD của RSR được biểu diễn như sau:

$$|Q_k| = \sqrt{\frac{N}{2\Delta\Omega}} S_q(\Omega_k) \text{ với } k=0,1,2,\dots,\frac{N}{2} \text{ và } \Omega_k = k\Delta\Omega \quad (23)$$

Từ công thức (23) chỉ có được giá trị suất của biến đổi Fourier, với Q_i là số phức. Nếu tương vị góc là θ_k , ta có:

$$Q_k = |Q_k| e^{j\theta_k} \text{ với } k=0,1,2,\dots,\frac{N}{2} \quad (24)$$

Trong công thức (24), θ_k có thể lấy tùy ý trong khoảng $(0,2\pi)$. Từ công thức (23) và (24) thu được $(N/2+1)$ số đầu tiên của biến đổi Fourier phân tán, vì vậy, muốn thông qua IFT để có được số liệu của q_m với $m=0,1,2,\dots,N-1$, cần phải bổ sung của số còn lại của biến đổi Fourier phân tán. Để bổ sung cần căn cứ đặc tính của biến đổi Fourier phân tán để có Q_k đầy đủ với $k=0,1,2,\dots,N-1$. Tiếp theo tiến hành IFT đối với các Q_k đầy đủ để thu được RSR:

$$q_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Q_k e^{\frac{j2\pi km}{N}} \text{ với } m=0,1,2,\dots,N-1 \quad (25)$$

Công thức (25) biểu diễn dưới dạng PSD của RSR trên miền thời gian:

$$q(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{4S_q(\Omega_i) \Delta\Omega \cos(\Omega_i t + \theta_i)} \quad (26)$$

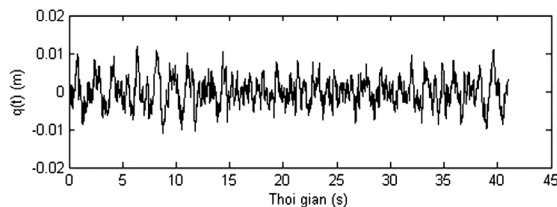
Phương pháp IFT có ý tưởng và thuật toán rõ ràng, có xem xét đến ảnh hưởng của tần số dao động và vận tốc chuyển động của ô tô, kết quả chính xác hơn so với các phương pháp khác. Hiện nay, phương pháp IFT được sử dụng phổ biến nhất trong mô phỏng RSR trên miền thời gian trong nghiên cứu dao động của ô tô.



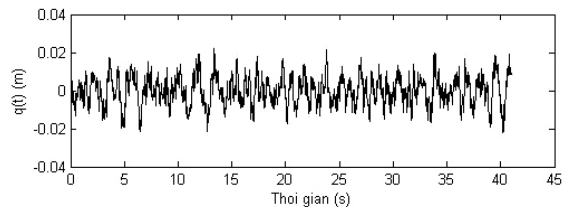
4. Kết quả mô phỏng RSR bằng phương pháp IFT

Bài báo ứng dụng phần mềm MatLab xây dựng chương trình mô phỏng RSR bằng phương pháp IFT với các thông số cơ bản như sau: vận tốc chuyển động của ô tô $v = 40 \text{ km/h}$ (hay 11.11 m/s); phạm vi tần số $0.5 \text{ Hz} \leq f \leq 30 \text{ Hz}$; $\Omega_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; thời gian mô phỏng $t = 40.96$ giây, $N = 2^{12} = 4096$, tương ứng $\Delta t = 0.01$ giây; chiều dài quãng đường mô phỏng $L = tv$ và $\Delta L = L/N$. Tiến hành mô phỏng cho bốn cấp mặt đường B, C D và E theo tiêu chuẩn ISO 8608:1995 với mật độ phổ công suất trung bình của mặt đường tương ứng.

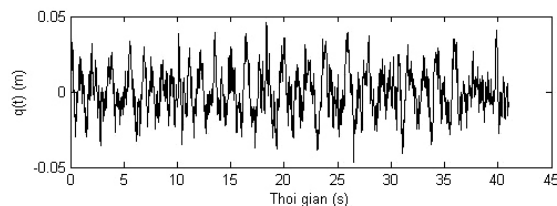
Trên Hình 1 đến Hình 4 là kết quả mô phỏng $q(t)$ tương ứng:



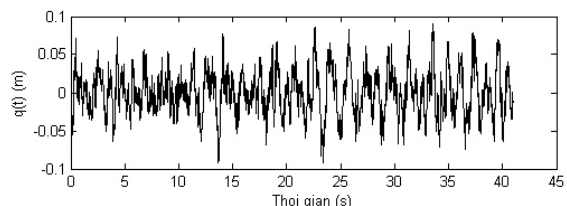
Hình 1. $q(t)$ với mặt đường cấp B,
 $v = 40 \text{ km/h}$



Hình 2. $q(t)$ với mặt đường cấp C,
 $v = 40 \text{ km/h}$



Hình 3. $q(t)$ với mặt đường cấp D,
 $v = 40 \text{ km/h}$



Hình 4. $q(t)$ với mặt đường cấp E,
 $v = 40 \text{ km/h}$



5. Kết luận

Nghiên cứu về RSR là một phần trong nghiên cứu đo lường và kiểm tra chất lượng mặt đường với các mục đích: kiểm tra và đánh giá chất lượng mặt đường sau xây dựng mới cũng như sau nâng cấp, duy tu; cung cấp số liệu thống kê cho hệ thống quản lý mặt đường; mô phỏng RSR phục vụ cho nghiên cứu động lực học phương tiện.

Trên cơ sở lý luận quá trình ổn định ngẫu nhiên thông qua PSD mô tả đặc tính thống kê của mặt đường với tiêu chuẩn ISO8608:1995, bài báo đã tiến hành nghiên cứu phân tích một số phương pháp mô phỏng biên dạng mặt đường trên miền thời gian. Từ đó, bài báo đã lựa chọn phương pháp IFT và ứng dụng phần mềm MatLab để mô phỏng cho ra kết quả mấp mô mặt đường với một số cấp mặt đường khác nhau. Phương pháp IFT là một phương pháp được sử dụng rộng rãi trong mô phỏng RSR, phương pháp này có xem xét đến ảnh hưởng của tần số dao động và vận tốc chuyển động của ô tô, kết quả mô phỏng chính xác hơn so với các phương pháp khác.

Kết quả nghiên cứu của bài báo không chỉ là tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu về động lực học phương tiện nói chung và dao động ô tô nói riêng, mà còn là tài liệu tham khảo cho hướng nghiên cứu về độ bền kết cấu phương tiện khi chịu tải trọng ngẫu nhiên từ mặt đường trong quá trình khai thác.

Tài liệu tham khảo

1. Yshimura A. (1998), "Semractive Suspension of Passenger Cars Using Fussy Reasoning and The Field Testing", *International Journal of Vehicle Designs*, 19(2):150-166.
2. A U FTK, Cheng Y.S., Cheung Y.K. (2001), "Effects of Random Road Surface Roughness and Long-Term Deflection of Prestressed Concrete Girder and Cable-Stayed Bridges on Impact Due To Moving Vehicles", *Journal of Computers and Structures*, 79:853-872.
3. Schiehlen W., Hu B. (2003), "Spectral Simulation and Shock Absorber Identification", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38:161-171.
4. Deng X.J., Sun L. (2000), *Vehicles & Ground Structure - Dynamic System*, China People Transportation Press.
5. ISO8608:1995, *Mechanical vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data*.
6. Zhang Y.L., Zhong Y.F. (2004), "Time Domain Model of Road Undulation Excitation to Vehicles", *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 35(02):9-12.
7. Lu Z.X., Hou Z.F. (2005), "Introduction of Description Models of Road Surface Roughness", *Chinese Society Agricultural Engineering - CSAE Annual Meeting*, 2005:490-495.
8. Liu X.D., et al (2003), "Research on The Method of Simulating Road Roughness Numerically", *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 29(09):843-846.