

PHÂN TÍCH ĐỘ ỔN ĐỊNH CHUỖI: ỨNG DỤNG CHO HỆ THỐNG THEO DÕI XE TỰ ĐỘNG

STRING STABILITY ANALYSIS: APPLICATION TO AUTOMATED VEHICLE FOLLOWING SYSTEMS

TS. Phạm Hữu Truyền¹, TS. Lưu Đức Lịch^{2,*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

TÓM TẮT

Gần đây, việc phát triển các phương tiện kết nối và tự lái đã có sự quan tâm đáng kể. Trong bài viết này, chúng tôi đánh giá về độ ổn định chuỗi của hai nhóm xe với các xe được trang bị hệ thống điều khiển thích nghi hành trình ACC và các xe được trang bị hệ thống phối hợp điều khiển thích nghi hành trình CACC, trong đó các xe có khả năng kết nối với nhau thông qua kênh V2V. Điều kiện độ ổn định chuỗi được đánh giá thông qua đồ thị đáp ứng tần số.

Từ khóa: Hệ thống hỗ trợ lái xe tiên tiến; Hệ thống điều khiển thích nghi hành trình; Ổn định chuỗi; Ô tô tự lái; Hệ thống giao thông thông minh.

ABSTRACT

Recently there has been considerable interest in the development of connected and autonomous vehicles. In this paper, we evaluate the string stability for two platoon, in which vehicles equipped with Adaptive Cruise Control and vehicles equipped with Cooperative Adaptive Cruise Control with the vehicles are connected to each other through the V2V channel. The string stability condition is evaluated through the frequency response graph.

Keywords: ADAS; ACC; String stability; Self-driving cars; Intelligent transportation system.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong vài thập kỷ qua, số lượng phương tiện ngày càng tăng và năng lực đường bộ hạn chế đã gây ra các vấn đề giao thông nghiêm trọng, chẳng hạn như tắc nghẽn giao thông và tai nạn đường bộ. Hệ thống giao thông thông minh (ITS) là một trong những giải pháp nhằm cải thiện điều kiện giao thông hiện nay [1].

Nhóm phương tiện là một trong những công nghệ ITS. Ý tưởng đầu tiên về tổ chức các xe thành một đội hình cùng nhau di chuyển được tác giả [2] đưa ra: Việc hình thành một nhóm xe di chuyển trên đường cao tốc được gọi là một đội hình xe, bao gồm xe dẫn đầu và các xe theo sau đi theo xe dẫn đầu bằng cách giữ khoảng cách nhất định, trong đó xe đi sau trong đội hình được điều khiển tự động. 

Hiệu suất của một đội hình xe có thể được đánh giá bằng hai đặc điểm chính: ổn định bên trong và ổn định chuỗi. Một đội hình không ổn định dẫn đến lỗi khoảng cách giữa các ô tô sẽ ngày càng lớn [3]. Sự khuếch đại liên tục này có thể dẫn đến việc mất kiểm soát đối với đội hình xe, có khả năng dẫn đến tai nạn hoặc tình trạng mất an toàn. Nói chung, rất dễ chứng minh độ ổn định bên trong của các đội hình xe này và thách thức thường là chứng minh độ ổn định chuỗi của đội hình xe. Vì vậy, trong bài báo này, chúng tôi chỉ tập trung vào phân tích độ ổn định chuỗi.

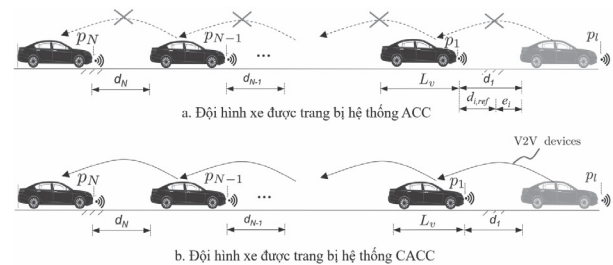
Công nghệ kết nối các phương tiện với nhau (V2V) tạo điều kiện phát triển các cấu trúc liên kết khác nhau [4]. Lợi ích của các cấu trúc liên kết này trong việc giảm khoảng cách giữa các xe trong một đội hình, đồng thời đảm bảo độ ổn định chuỗi.

Trong bài báo này, chúng tôi phân tích độ ổn định chuỗi cho hai nhóm xe, trong đó nhóm xe thứ nhất, xe theo sau trang bị hệ thống ACC và nhóm xe thứ hai, xe theo sau được trang bị hệ thống phối hợp điều khiển thích nghi hành trình CACC. Hai nhóm xe này di chuyển cùng một tốc độ lúc đồng thời duy trì một khoảng cách nhỏ giữa các xe liên kế trong nhóm.

2. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN CỦA MỘT NHÓM PHƯƠNG TIỆN

Giả sử nhóm phương tiện di chuyển từ trái sang phải bao gồm $N + 1$ xe như minh họa ở hình 1, trong đó các xe được liệt kê với chỉ số $i = 0; \dots; N$, $i = 0$ biểu thị xe dẫn đầu. Vị trí của xe thứ i so với điểm quy chiếu cố định trên lề đường được ký hiệu là p_i , khoảng cách giữa xe i và xe $i - 1$ được ký hiệu là d_i , được đo bởi cảm biến đặt ở xe thứ i và L_i là chiều dài xe. Đội hình xe thứ nhất, các xe theo sau được

trang bị hệ thống điều khiển thích nghi hành trình ACC (hình 1a), đội hình xe thứ hai, các xe theo sau được trang bị hệ thống phối hợp điều khiển thích nghi hành trình CACC (hình 1b), tức là các xe theo sau có khả năng kết nối V2V để nhận thông tin từ xe phía trước.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống

Tham chiếu cho các cấu trúc hệ thống điều khiển ACC của xe theo sau là khoảng cách mong muốn $d_{i,ref}$ được xác định bằng cách sử dụng chiến lược thời gian di chuyển mong muốn:

$$d_{i,ref} = r_0 + h_i v_i \quad (1)$$

Trong đó, r_0 là khoảng cách mong muốn khi dừng lại, h_i là thời gian di chuyển mong muốn và v_i là vận tốc đo được của phương tiện i .

Xem xét khoảng cách thực tế d_i là dữ liệu nhận từ cảm biến radar và khoảng cách mong muốn $d_{i,ref}$. L_v là chiều dài xe. Lỗi khoảng cách e_i giữa xe i và $i - 1$ được định nghĩa trong [5] là:

$$e_i = d_{i,ref} - d_i = d_{i,ref} - (p_{i-1} - L_v - p_i) \quad (2)$$

Mô hình tuyến tính hóa cho động lực học theo phương dọc của ô tô thu được như sau [5]:

$$\tau_v \dot{a}_i(t) + a_i(t) = u_i(t) \quad (3)$$

Trong đó, a_i là gia tốc của xe thứ i , u_i là gia tốc mong muốn của xe thứ i , τ_v là tham số động lực học của bộ truyền động.

Thuật toán kiểm soát khoảng cách cho hệ thống ACC của phương tiện đi theo sau trong đội hình xe thứ nhất có thể được mô tả bằng:

$$u_{i,ACC} = k_v(v_{i-1} - v_i) + k_e e_i \quad (4)$$

Sử dụng phương trình (1), (2), cùng với mô hình động lực học ô tô (3) và luật kiểm (5), ta thu được hàm truyền sai số khoảng cách giữa các xe liền kề của đội hình xe trang bị hệ thống ACC:

$$H_{i,ACC}(s) := \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} := \frac{k_v s + k_e}{\tau_v s^3 + s^2 + (k_v + k_e h_i)s + k_e} \quad (5)$$

Trong đó, $E_i(s)$, $E_{i-1}(s)$ là biến đổi Laplace của e_i , e_{i-1} tương ứng.

Thuật toán kiểm soát khoảng cách cho hệ thống CACC của phương tiện đi theo sau trong đội hình xe thứ hai có thể được mô tả bằng:

$$u_{i,CACC} = k_1 a_{i-1} - k_2 a_i + k_3(v_{i-1} - v_i) + k_4 e_i \quad (6)$$

Dựa vào phương trình (1), (2), cùng với mô hình động lực học ô tô (3) và luật kiểm (6), ta thu được hàm truyền liên quan đến sai số khoảng cách giữa các xe liền kề của đội hình xe trang bị hệ thống CACC:

$$H_{i,CACC}(s) := \frac{E_i(s)}{E_{i-1}(s)} := \frac{k_1 s^2 + k_3 s + k_4}{\tau_v s^3 + (1 + k_2)s^2 + (k_3 + k_4 h_i)s + k_4} \quad (7)$$

3. PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH CHO HỆ THỐNG

Một đội hình xe được trang bị hệ thống ACC/CACC di chuyển cùng lúc có thể gặp phải sự mất ổn định chuỗi, vấn đề yêu cầu là phải phát triển một phương pháp để xác định sự ổn định chuỗi cho một đội hình xe. Hệ thống được coi là ổn định chuỗi nếu các lỗi khoảng cách e_i không được khuếch đại khi chúng lan truyền đến xe cuối cùng của đội hình. Nếu chuỗi không ổn định, điều đó có nghĩa là lỗi

khoảng cách giữa các xe sẽ ngày càng lớn. Sự khuếch đại liên tục này có thể dẫn đến việc mất kiểm soát, và có khả năng dẫn đến tai nạn hoặc tình trạng mất an toàn. Vì vậy, điều cốt yếu là phải đảm bảo độ ổn định chuỗi để duy trì hành vi an toàn và phối hợp của các xe.

Điều kiện để đáp ứng ổn định chuỗi của xe được mô tả bởi mối quan hệ được trình bày trong [3]:

$$\|H_i(s)\| \leq 1 \Rightarrow \|e_1\|_\infty \geq \|e_2\|_\infty \geq \dots \geq \|e_N\|_\infty \quad (8)$$

Một giải pháp heuristic được đề xuất để phân tích sự ổn định chuỗi cho một nhóm xe đồng nhất dựa trên điều kiện (8). Các giá trị thời gian $h_i \geq 0$ được đưa ra theo thứ tự tăng dần và đồ thị đáp ứng tần số của hàm truyền $H_i(j\omega)$ tương ứng được vẽ, kiểm tra điều kiện $\|H_i(j\omega)\| \leq 1$ với $\omega > 0$ bằng cách kiểm tra độ lớn của đồ thị đáp ứng tần số, nếu độ lớn cực đại nhỏ hơn hoặc bằng 1 thì hệ thống đảm bảo ổn định chuỗi, tức là điều kiện (8) được thỏa mãn. Ngược lại, độ lớn cực đại lớn hơn 1 thì hệ thống không ổn định chuỗi tức là điều kiện (8) không được thỏa mãn.

Dựa vào kết quả trong [6], hàm truyền liên quan đến sai số khoảng cách giữa các xe liền kề của 2 đội hình tương ứng các xe được trang bị 2 hệ thống ACC và CACC thu được như sau:

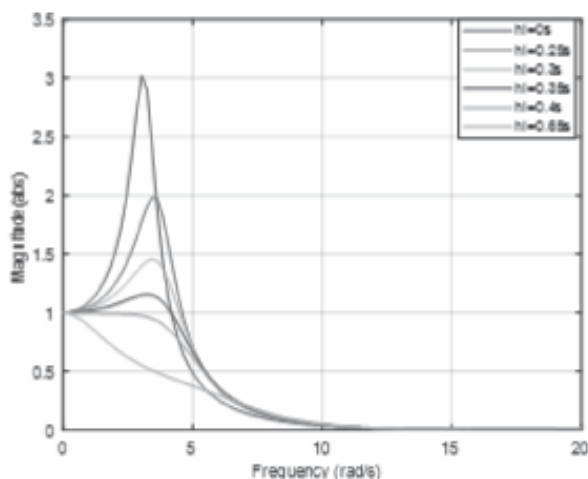
$$H_{i,ACC}(s) := \frac{0.8s + 2}{0.25s^3 + s^2 + (0.8 + 2h_i)s + 2} \quad (9)$$

$$H_{i,CACC}(s) := \frac{0.125s^2 + 0.4s + 22.5}{0.25s^3 + 2s^2 + (0.4 + 22.5h_i)s + 22.5} \quad (10)$$

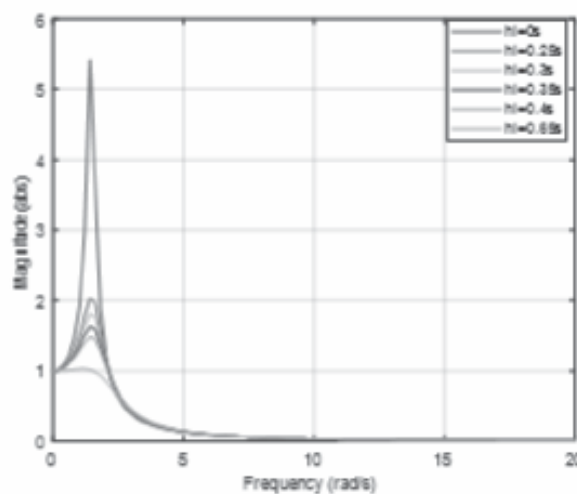
Điều kiện ổn định chuỗi từ phương trình (8) đã được áp dụng cho hàm $h_i(s)$ bằng cách tăng h_i từ 0 đến giá trị thỏa mãn điều kiện ổn định chuỗi. 

Tăng giá trị thời gian h_i từ 0s đến 0.65s, đối với hệ thống ACC, $0s \leq h_i < 0.65s$, ta thấy rằng đồ thị đáp ứng tần số lớn hơn 1, do đó không thỏa mãn điều kiện ổn định (8), hệ thống không ổn định. Tuy nhiên, giá trị thời gian $h_i = 0.65s$, đồ thị đáp ứng tần số nhỏ hơn 1, thỏa mãn điều kiện (8), hệ thống đảm bảo ổn định chuỗi.

Đối với hệ thống CACC, $0s \leq h_i < 0.4s$, ta thấy rằng đồ thị đáp ứng tần số lớn hơn 1, do đó không thỏa mãn điều kiện ổn định (8), hệ thống không ổn định chuỗi. Tiếp tục tăng giá trị h_i , giá trị thời gian $h_i \geq 0.4s$, đồ thị đáp ứng tần số nhỏ hơn 1, điều đó cho thấy hệ thống đảm bảo ổn định chuỗi. Nếu giá trị h_i càng lớn thì đồ thị đáp ứng tần số càng nhỏ hơn 1, hệ thống càng ổn định, tuy nhiên giá trị h_i càng lớn dẫn đến khoảng cách mong muốn càng lớn hơn như thể hiện trong công thức (1), và do đó sẽ tạo ra khoảng cách lớn giữa các xe trong đội hình.



Hình 2. Đồ thị của đội hình xe CACC



Hình 3. Đồ thị của đội hình xe ACC

Thông qua kết quả phân tích độ ổn định chuỗi, rõ ràng đội hình xe trang bị hệ thống CACC có giá trị thời gian h_i nhỏ hơn nhiều so với đội hình xe trang bị hệ thống ACC, điều đó chứng minh rằng khoảng cách giữa các xe trang bị hệ thống CACC nhỏ hơn khoảng cách giữa các xe trang bị hệ thống ACC, tức là chiều dài nhóm xe CACC ngắn hơn, khả năng tăng lưu lượng xe tốt hơn.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một phương pháp phân tích độ ổn định chuỗi cho một đội hình thứ nhất trong đó các xe được trang bị hệ thống ACC và cho một đội hình thứ hai trong đó các xe được trang bị hệ thống CACC đã được triển khai. Giá trị thời gian h_i nhỏ nhất thỏa mãn điều kiện ổn định chuỗi được quan tâm. Dựa vào kết quả phân tích, chúng ta thấy rằng độ ổn định chuỗi xe trang bị hệ thống CACC có thể đáp ứng được với h_i nhỏ nhất là 0,4s, trong khi nhóm xe trang bị hệ thống ACC đảm bảo ổn định nhóm với giá trị $h_i = 0.65s$. Điều này cho thấy rằng đội hình xe trang bị hệ thống CACC cải thiện lưu lượng xe lưu thông tốt hơn do khoảng cách giữa các xe nhỏ hơn như thể hiện trong

công thức (1), trong khi vẫn duy trì độ ổn định của nhóm. Hướng nghiên cứu tương lai, tác giả sẽ mô phỏng, đánh giá hiệu quả của hệ thống CACC.❖

Ngày nhận bài: **02/8/2023**

Ngày phản biện: **23/8/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Darbha Swaroop and KR Rajagopal (2001), “A review of constant time headway policy for automatic vehicle following”, IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585), IEEE, pp. 65–69.
- [2]. Steven E Shladover (1979). *Operation of automated guideway transit vehicles in dynamically reconfigured trains and platoons (extended summary)*. Tech. rep.
- [3]. Swaroop, D., and Hedrick, J. K. (1996). *String Stability of Interconnected Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, No. 3, pp. 349-357.
- [4]. Darbha, S., Konduri, S., & Pagilla, P. R. (2018), *Benefits of V2V communication for autonomous and connected vehicles*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(5), 1954-1963.
- [5]. Luu, D. L., Lupu, C., Ismail, L. S., & Alshareefi, H. (2020), *Spacing control of cooperative adaptive cruise control vehicle platoon*, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), pp. 1-6.
- [6]. Luu, L. D., Lupu, C., & Alshareefi, H. D. (2022), *A Comparative Study of Adaptive Cruise Control System based on Different Spacing Strategies*, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 24(2), 3-12.