

Ứng dụng thuật toán chống nhiễu Kalman Filter cho cảm biến siêu âm US-015

Trần Anh Dũng*, Nguyễn Văn Thọ*

*ThS. Trường Cao Đẳng Nghề An Giang

Received: 2/7/2024; Accepted: 8/7/2024; Published: 15/7/2024

Abstract: In measurement, the major problem encountered is dealing with noise reduction. Noise in the sensor is created due to a number of reasons such as noise due to external signals, complexity of measurement status and sensor quality... Therefore, it is necessary to avoid noise to achieve good results, thereby improve measurement accuracy. signals from sensors. Noise leads to errors between the measured value and the actual value. One of the solutions is to design a signal filter. In this study, the design of the Kalman Filter (KF) algorithm for the US-015 ultrasonic sensor is presented. The KF algorithm is designed to overcome the existence of noisy measurements on the sensor. The type of ultrasonic sensor used is US-015, capable of detecting distances from 2 cm to 400 cm. The KF algorithm is implemented using an ATmega 328p microcontroller on an Arduino Uno R3 board. Experimental results show that the KF algorithm is capable of reducing measurement noise of ultrasonic sensors.

Keywords: Arduino, Kalman Filter, US - 015 sensor, Matlab

1. Giới thiệu

Một hệ thống cảm biến tốt là cần thiết trong việc thiết kế một hệ thống điều khiển và vận hành trong thực tế. Bên cạnh độ tin cậy của phương pháp điều khiển được thiết kế, quá trình điều khiển tốt còn bị ảnh hưởng bởi hiệu quả hoạt động của hệ thống cảm biến. Như đã biết, một trong những điều cần tránh trong hệ thống cảm biến là sự xuất hiện của nhiễu khi đo. Nhiễu trên cảm biến khiến tính nhất quán của dữ liệu đo trở nên không ổn định.

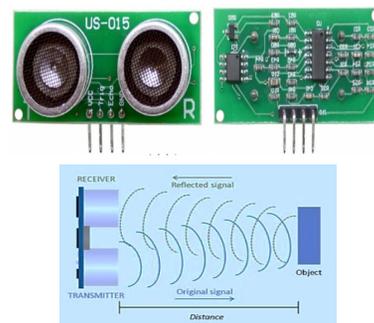
Một phương pháp có thể được sử dụng để khắc phục vấn đề này là thiết kế các thuật toán lọc. Quá trình lọc có thể được thực hiện dưới hai dạng: phần cứng và thuật toán lập trình. Adnan Rafi Al Tahtawi [1]: Thiết kế thuật toán bộ lọc Kalman ... Lọc ở dạng phần cứng có thể được xây dựng bằng sơ đồ mạch điện tử. Tuy nhiên, nó kém hiệu quả hơn vì nó yêu cầu sơ đồ mạch bổ sung trên hệ thống. Để khắc phục trở ngại này, việc lọc dưới dạng thuật toán lập trình thành một phương pháp có thể sử dụng được. Ngoài ra nó không yêu cầu sơ đồ phần cứng điện tử, hiệu suất lọc được thậm chí còn chính xác hơn vì nó sử dụng quy trình tính toán.

Nghiên cứu trình bày quy trình sử dụng thuật toán Kalman Filter (KF), để xử lý hệ thống thu thập dữ liệu là một thiết bị cảm biến sóng siêu âm. KF là một bộ lọc thuật toán được Rudolf E. Kalman giới thiệu vào năm 1960 thông qua việc xuất bản một bài báo về cách tiếp cận mới lọc các vấn đề và dự đoán quá trình tuyến tính [2].

2. Nội dung nghiên cứu

2.1. Cảm biến siêu âm US-015

Cảm biến siêu âm loại US-015 được sử dụng làm hệ thống cảm biến phát hiện khoảng cách. Cảm biến này có hai bộ phận đóng vai trò là máy phát và máy thu. Ở đầu ra, cảm biến có bốn chân, đó là Vcc, Trig, Echo và Gnd, như trong (hình 2.1).



Hình 2.1. Cấu tạo và hoạt động cảm biến siêu âm US-015

Cảm biến siêu âm hoạt động dựa trên nguyên lý phản xạ sóng âm để đo khoảng cách của vật thể với tần số nhất định. Sóng siêu âm là sóng âm có tần số cao, trên 20.000 Hz (20 KHz).

Cảm biến siêu âm có hai thành phần chính; sóng siêu âm được phát ra từ bộ phát thông qua chân Trigger được vi điều khiển cung cấp tín hiệu xung. Sau đó, sóng phản xạ bộ thu nhận được sẽ được chuyển tiếp đến bộ vi điều khiển thông qua chân Echo. Từ khái niệm, có thể thấy rằng sóng siêu âm được phát ra khi cảm biến được cấp tín hiệu xung với

chu kỳ 10 μ s qua chân Trigger. Sóng siêu âm phát ra và phản xạ có tần số 40 KHz. Thời gian trễ thu được giữa sóng truyền và sóng phản xạ được sử dụng làm tham chiếu để tính khoảng cách của cảm biến đến vật thể [3, 4] như (hình 2.1) minh họa hoạt động của cảm biến siêu âm.

2.2. Thuật toán Kalman Filter

Bộ lọc Kalman được xuất bản vào năm 1960 bởi Rudolf E. Kalman, người đầu tiên phát triển thuật toán này. Bộ lọc Kalman là một thuật toán toán học ước tính các giá trị trên dữ liệu hoặc cảm biến để giảm lỗi bình phương trung bình (RMSE) của hệ thống [5]. Bộ lọc Kalman đáng tin cậy trong các khía cạnh ứng dụng khác nhau; nó có thể ước tính cả dữ liệu trước đó và dữ liệu hiện tại, thậm chí có thể dự đoán dữ liệu tiếp theo và có thể đưa ra ước tính ở trạng thái hệ thống không xác định được mô hình hóa.

Bộ lọc Kalman có một số phương trình toán học, chẳng hạn như bộ lọc Kalman tiêu chuẩn, bộ lọc Kalman mở rộng [6], bộ lọc Kalman phi tuyến [7] và bộ lọc Kalman tổ hợp [8]. Bộ lọc Kalman tiêu chuẩn là bộ lọc đơn giản nhất trong các bộ lọc. Trong nghiên cứu này, bộ lọc Kalman tiêu chuẩn được sử dụng để ước tính phép đo khoảng cách, trong đó tham số được sử dụng là đủ để giảm nhiễu. Bộ lọc Kalman thường được thực hiện theo hai giai đoạn: dự đoán và cập nhật.

Bộ lọc Kalman tiêu chuẩn có phương trình toán học được thể hiện:

- Quá trình ước lượng khoảng cách đo:

$$x_{t|t-1} = A_t X_{t-1|t-1} + B_t u_t \quad (1)$$

$$P_{t|t-1} = A_t P_{t-1|t-1} A_t^T + Q_t \quad (2)$$

- Quá trình hiệu chỉnh khoảng cách đo:

$$X_{t|t} = X_{t|t-1} + K_t \left(y_t - H_t X_{t|t-1} \right) \quad (3)$$

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T \quad (4)$$

$$P_{t|t} = (1 - K_t H_t) P_{t|t-1} \quad (5)$$

Các biến này nêu rõ: x là giá trị mong muốn, A là ma trận chuyển trạng thái, u là biến điều khiển, B là ma trận chuyển trạng thái đầu vào, P là ma trận chuyển trạng thái, Q là quá trình ma trận chuyển trạng thái, y là biến đo lường, H là ma trận đo lường, K là giá trị hiệu chỉnh Kalman, R là phép đo ma trận chuyển trạng thái, $t|t$ là khoảng thời gian hiện tại, $t-1|t-1$ là khoảng thời gian trước đó và $t|t-1$ là các bước trung gian.

Các phương trình (1) đến (5) là mô hình chung của hệ thống bộ lọc Kalman có thể được sửa đổi theo nhu cầu và độ phức tạp của hệ thống được xây dựng. Do đó, có một cách triển khai thuật toán bộ lọc Kalman để giảm nhiễu khi đọc cảm biến và thực hiện một số điều chỉnh theo các điều kiện yêu cầu. Một số điều chỉnh được thực hiện là:

Dự đoán giá trị cảm biến: Trong phần này, các điều chỉnh được thực hiện cho phương trình (1) bằng cách gán giá trị $A_t = 1$ vì nó không có giá trị chuyển tiếp. Do đó, nó có thể giảm các biến đầu vào của hệ thống không có đầu vào. Phương trình điều chỉnh được thể hiện trong phương trình (6).

$$x_{t|t-1} = x_{t-1|t-1} \quad (6)$$

- *Dự đoán giá trị lỗi trên cảm biến:* Bằng cách lấy $A_t = 1$ thì phương trình (2) được điều chỉnh thành phương trình (7).

$$P_{t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t \quad (7)$$

- *Hiệu chỉnh giá trị dự đoán:* Trong phương trình (3), giá trị $H_t = 1$, trong đó giá trị cảm biến cần lọc chỉ là một giá trị đọc của cảm biến. Vì vậy nó có thể được viết dưới dạng phương trình (8).

$$X_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t \left(Y_t - x_{t|t-1} \right) \quad (8)$$

Tính giá trị hiệu chỉnh Kalman: Bằng cách theo sau $H_t = 1$ thì phương trình (4) có thể được viết dưới dạng phương trình (9).

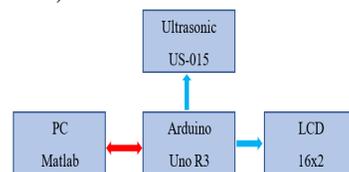
$$K_t = P_{t|t-1} \left(P_{t|t-1} + R \right) \quad (9)$$

Hiệu chỉnh giá trị lỗi trên cảm biến: Bằng cách theo sau $H_t = 1$ thì phương trình (5) có thể được điều chỉnh thành phương trình (10)

$$P_{t|t} = (1 - K_t) P_{t|t-1} \quad (10)$$

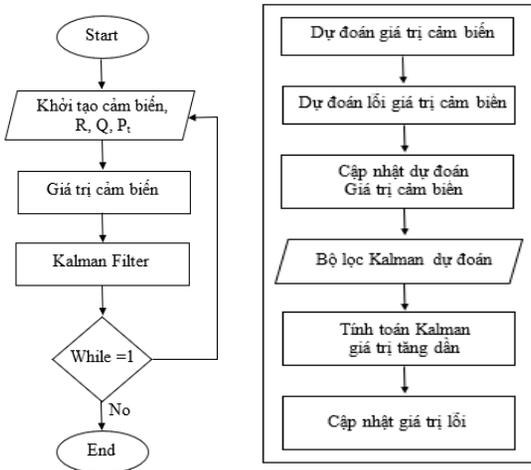
2.3. Thiết kế hệ thống

Để trực quan hơn về ứng dụng ước lượng khoảng cách bằng cảm biến siêu âm US-015 được chống nhiễu bằng thuật toán KF, chúng tôi thiết kế chi tiết sơ đồ khối hệ thống trên (hình 2.2) và lưu đồ giải thuật (hình 2.3).



Hình 2.2. Hệ thống đo khoảng cách

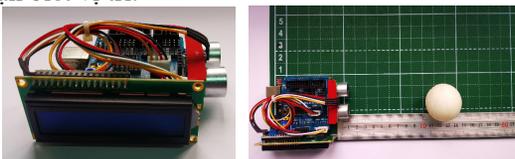
Theo (hình 2.2), thiết bị được sử dụng trong nghiên cứu này là Arduino UNO R3 làm vi điều khiển truyền dữ liệu, cảm biến siêu âm US-015 làm cảm biến ước tính khoảng cách, LCD 16 x 2 để hiển thị giá trị ước tính và máy tính có chức năng lọc nhiễu, truyền dữ liệu với Arduino và cấp nguồn điện 5 volt cho Arduino sử dụng cổng USB A. Bộ nguồn Arduino được sử dụng để cung cấp cho cảm biến siêu âm US-015 và LCD 16 x 2.



Hình 2.3. Lưu đồ giải thuật và khối tính toán Kalman

2.4. Chế tạo mô hình thực nghiệm

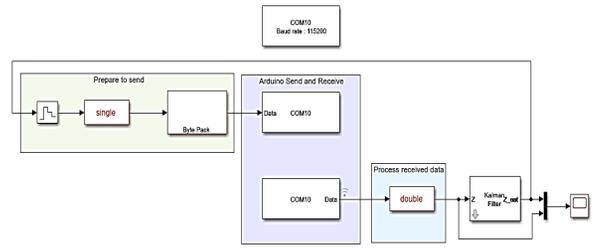
Mô hình thực nghiệm chống nhiễu cho cảm biến US-015 bằng thuật toán Kalman như (hình 2.4). Trong đó, Arduino UNO R3 module được dùng làm mạch giao tiếp giữa máy tính và mô hình. Module này có nhiệm vụ truyền dữ liệu sau khi xử lý nhiễu từ máy tính. Đồng thời, nó cũng được dùng để đọc giá trị cảm biến khoảng cách, xử lý nhiễu và trả về vị trí cho arduino gửi ra LCD 16 x 2. LCD 16 x 2 được dùng để hiển thị giá trị cảm biến trước khi lọc và sau lọc. Cảm biến siêu âm US - 015 [9] dùng để nhận biết vị trí.



Hình 2.4. Mô hình lắp đặt thiết bị thực nghiệm

2.5. Kiểm nghiệm với thuật toán Kalman filter

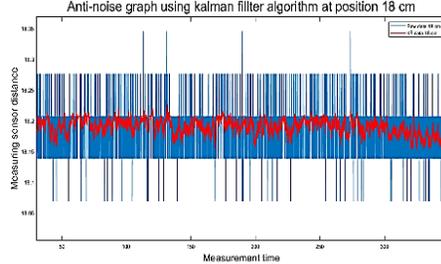
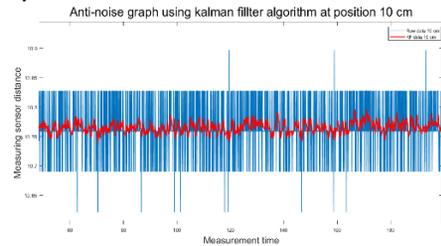
Sơ đồ kết hợp với thuật toán chống nhiễu Kalman filter, gọi tắt là bộ điều khiển chống nhiễu áp dụng cho cảm biến US-015 như (hình 2.5). Tham số bộ điều khiển với $R = 10$; $Q = 0,01$, với các thông số khoảng cách 10 cm, 18 cm và khoảng cách đi động từ 5 cm đến 22 cm.



Hình 2.5. Bộ điều khiển chống nhiễu KF

Thực nghiệm tại vị trí 10 cm và 18 cm:

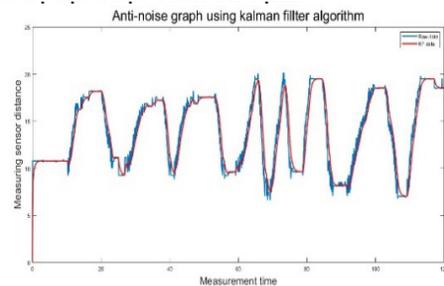
Thực nghiệm được đo ở khoảng cách 10 cm với các thông số $R = 10$, $Q = 0.01$. Kết quả cho thấy giá trị ổn định hơn.



Hình 2.6. Thực nghiệm tại vị trí 10 cm, 18 cm

Thực nghiệm khi di chuyển vị trí 5 cm đến 22 cm.

Thực nghiệm được đo ở khoảng cách 5 cm đến 22 cm với các thông số $R = 10$, $Q = 0.01$. Kết quả cho thấy giá trị đạt được luôn ổn định.



Hình 2.7. Thực nghiệm tại vị trí 5 cm đến 22 cm

Thảo luận: Mô hình chống nhiễu áp dụng thuật toán Kalman được triển khai trong nghiên cứu này đặt bộ điều khiển trên máy tính. Tín hiệu sau khi xử lý nhiễu được truyền xuống mô hình để hiển thị trên LCD 16 x 2 thông qua module giao tiếp Arduino UNO R3 thông dụng. Cảm biến khoảng cách trên

thiết bị được xử lý và hồi tiếp về máy tính thông qua module giao tiếp này. Với thiết kế như trên, mô hình thực nghiệm này có thể áp dụng để khảo sát nhiều thuật toán chống nhiễu hiện đại khác, được xây dựng trên máy tính.

Đây là một ưu điểm của thiết kế, không gây cản trở trong việc triển khai các giải thuật phức tạp, thường đòi hỏi cấu hình cao cho phần cứng của mô hình thực nghiệm. Việc đặt bộ điều khiển chống nhiễu cho cảm biến khoảng cách được triển khai trong nghiên cứu này được đặt trên máy tính cũng có ưu điểm lớn về việc xử lý số liệu thực nghiệm.

Thực tế cho thấy, khi cảm biến lấy mẫu khoảng cách, xử lý dữ liệu và truyền về đến máy tính có kèm theo nhiều giá trị do thiết bị, hoặc can nhiễu ngoại vi khác. Hạn chế này xảy ra là do bản thân cảm biến đo khoảng cách có sai số, kết hợp với thời gian trễ của việc xử lý và truyền dữ liệu về máy tính.

Mẫu dữ liệu thu được của thí nghiệm hàm chứa đầy đủ sai số cảm biến và thời gian trễ của việc xử lý và truyền dữ liệu. Do đó, thuật toán Kalman được xác định giúp khắc phục được hạn chế nêu trên. Bên cạnh các ưu điểm nổi bật trên, mô hình thực nghiệm này vẫn có hạn chế do được chế tạo thủ công. Hạn chế này không dễ khắc phục, trừ khi mô hình được chế tạo một cách chính xác, đạt các tiêu chuẩn cần thiết. Ngoài ra, quả bóng hình tròn cũng ảnh hưởng đến sai số trong quá trình đo.

Cảm biến siêu âm US - 015 có ưu điểm về giá thành có thể đáp ứng nhu cầu thực hiện tiểu luận đối với sinh viên, code giao tiếp Arduino cũng được hỗ trợ nhiều nguồn tham khảo và thư viện sẵn cho cảm biến này. Modul cảm biến này có nhiều ưu điểm hơn so với các modul cảm biến HC - SR04, HC - SR05.

Nhược điểm của cảm có sai số còn lớn và vùng nhận dạng bị giao động hoặc không nhận được vị trí ở vùng gần cảm biến, khoảng cách từ 0 ÷ 5 cm thường cho kết quả không chính xác. Hướng khắc phục này có thể khắc phục bằng phương pháp đọc trung bình giá trị, tức đọc nhiều lần trong thời gian mili giây. Ngoài ra cảm biến cũng bị ảnh hưởng bởi màu sắc của vật cần xác định khi đo.

3. Kết luận

Nghiên cứu này đề xuất sử dụng thuật toán Bộ lọc Kalman để đo khoảng cách bằng cảm biến siêu âm US - 015 mặc dù thời gian cần thiết để đạt được độ ổn định đo khoảng trong hệ thống này đáp ứng được giá trị đầu ra. Kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng thuật toán Kalman Filter giúp tăng cường đáng kể độ chính

xác của phép đo khoảng cách so với việc không sử dụng thuật toán. Các giá trị tham số tối ưu cho Bộ lọc Kalman trong hệ thống này được xác định là $R = 10$ và $Q = 0,01$. Quá trình tinh chỉnh các tham số này bao gồm việc sử dụng phương pháp thử sai, kiểm tra các giá trị một cách có hệ thống từ thấp nhất đến cao nhất cho đến khi thu được các giá trị tham số hiệu quả nhất. Phương pháp này mất nhiều thời gian cho quá trình phân tích dữ liệu trong thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

[1]. Amelia, A., & Al Tahtawi, A. R. (2017). Sistem Kendali dan Pemantauan Ketinggian Air pada Tangki Berbasis Sensor Ultrasonik. *Kopertip*, 1(1), 25-30.

[2]. Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems.

[3]. Cenkeramaddi, L. R., Bhatia, J., Jha, A., Vishkarma, S. K., & Soumya, J. (2020, 9-13 Nov. 2020). A Survey on Sensors for Autonomous Systems. Paper presented at the 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).

[4]. Darwito, P. A., Raditya, M., Sa'diyah, H., Cikadiarta, A., & Aditya, W. (2019, 28-29 Aug. 2019). Comparative Study of Burst And Beams Types Ultrasonic Sensor For Distance Measurements. Paper presented at the 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA).

[5]. Wachsmuth, M., Koppert, A., Zhang, L., & Schwieger, V. (2020, 23-24 Nov. 2020). Development of an error-state Kalman Filter for Emergency Maneuvering of Trucks. Paper presented at the 2020 European Navigation Conference (ENC).

[6]. Garcia, R. V., Pardal, P. C. P. M., Kuga, H. K., & Zanardi, M. C. (2019). Nonlinear filtering for sequential spacecraft attitude estimation with real data: Cubature Kalman Filter, Unscented Kalman Filter and Extended Kalman Filter. *Advances in Space Research*, 63(2), 1038-1050. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.003>.

[7]. Ullah, I., Shen, Y., Su, X., Esposito, C., & Choi, C. (2020). A Localization Based on Unscented Kalman Filter and Particle Filter Localization Algorithms. *IEEE Access*, 8, 2233-2246. doi:10.1109/ACCESS.2019.2961740.

[8]. Van Leeuwen, P. J. (2020). A consistent interpretation of the stochastic version of the Ensemble Kalman Filter. 146(731), 2815-2825. doi:<https://doi.org/10.1002/qj.3819>.

[9]. Synacorp. (2021). 3822 US-015 High Accuracy Ultrasonic Sensor.