

ỨNG DỤNG BỘ LỌC KALMAN XỬ LÝ TÍN HIỆU CÂN ĐỘNG

APPLICATION OF KALMAN FILTER FOR SIGNAL PROCESSING OF DYNAMIC WEIGHING SYSTEMS

Đào Văn Phương¹, Nguyễn Anh Tuấn¹, Vũ Trung Hiếu²

¹Trường Cao đẳng Công thương TP.HCM; daovanphuong81@gmail.com

²Đại học khoa học kỹ thuật Nam Đài; vutronghieus192601@gmail.com

Tóm tắt - Cân xác định trọng lượng là nhu cầu phổ biến của đời sống hằng ngày. Cân đo trọng lượng trên một băng tải hoạt động liên tục sẽ giúp cho quá trình hoạt động sản xuất liên tục, không bị gián đoạn. Xử lý tín hiệu cân động dưới băng tải hoạt động liên tục là một thách thức và khó khăn cần giải quyết. Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ nghiên cứu ứng dụng thuật toán Kalman vào xử lý tín hiệu cân động điện tử hoạt động dưới băng tải hoạt động liên tục. Tín hiệu cân động sẽ được đọc từ cảm biến trọng lực lên phần mềm Matlab. Thuật toán Kalman sẽ được xây dựng trên phần mềm Matlab để xử lý tín hiệu này. Kết quả nghiên cứu sẽ được đối sánh với các phương pháp lọc FIR và lọc trung bình, trên phần mềm Matlab. Sau đó giải thuật Kalman sẽ được viết ứng dụng vào Kit vi xử lý để chế tạo cân động điện tử cho băng tải cân trái cây.

Từ khóa - Bộ lọc Kalman; cân động điện tử; cân điện tử; tín hiệu cảm biến trọng lực; xử lý tín hiệu.

Abstract - Weight determination scales are a common need in all areas of human daily life nowadays. The weighing scale on a continuous conveyor will help the production process be continuous and uninterrupted. Processing the weighing signal under a continuous conveyor belt is a challenging and difficult task. In this paper, we will study the application of Kalman algorithm to process electronic Dynamic Scale signals operating under continuous operating conveyors. Dynamic Scale signal will be read from LoadCell sensor to Matlab software. Kalman algorithm will be built on Matlab software to process this signal. The study results will be compared with those by the average FIR filter. Then Kalman algorithm will be written and applied to the microprocessor Kit to make electronic Dynamic Scales for fruit weighing.

Key words - Kalman filter; electronic dynamic scales; electronic scales; loadcell signal; signal processing.

1. Giới thiệu

Cân trọng lượng là một nhu cầu cần thiết và không thể thiếu trong đời sống xã hội, từ người nông dân làm ra rau, củ, quả, trái cây, ... cho đến các khu chế xuất, các nhà máy sản xuất ra hàng trăm tấn sản phẩm trong 1 ngày đều phải sử dụng cân để xác định trọng lượng, phân loại sản phẩm

Trên thực tế các nhà máy sản xuất muốn biết khối lượng hàng hoá, sản phẩm hay nguyên vật liệu, và cả cho những lĩnh vực khác như bến cảng, trạm cân xe phát hiện quá tải của cảnh sát giao thông đều được sử dụng cân điện tử. Sự phát triển của tự động hóa tạo ra các dây chuyền sản xuất liên tục, và hoàn toàn tự động. Do đó, việc cân trọng lượng các sản phẩm trên các băng chuyền hoạt động liên tục là hết sức cần thiết.

Khác với cân tĩnh, cân động là cân hoạt động trên băng chuyền hoạt động liên tục, quá trình hoạt động của băng chuyền sẽ gây ra giao động và từ đó gây ra sai số cho kết quả cân. Đã có nhiều nghiên cứu thuật toán xử lý tín hiệu cho cân động được công bố [1], [2], [3].

Trong nghiên cứu của các tác giả M. Halimic, W. Balachandran, M. Hodzic, và F. Cecelja [4], đã trình bày một phương pháp điều khiển Lọc tuyến tính bậc hai (LQG) để cải thiện hiệu suất của hệ thống cân động. Các tác giả đã phân tích và áp dụng phương pháp LQG để cải thiện hiệu suất của vòng điều khiển vị trí của hệ thống cân trọng lượng dựa và kết quả cho thấy hiệu suất được cải thiện. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu chỉ rút đánh giá thuật toán ở mức độ mô phỏng thí nghiệm. Trong nghiên cứu về bộ ước lượng Fuzzy Logic cho hệ thống cân động [5] của nhóm tác giả M. Halimic, W. Balachandran, và Y. Enab, các tác giả đã áp dụng bộ ước lượng logic mờ như là một bộ lọc để phân tập dùng lược đồ phân tập mờ C-means. Các tập logic mờ được lựa chọn theo các qui luật nhất định và kết quả đã làm tăng độ chính xác ước lượng trọng lượng của sản

phẩm. Tuy nhiên, phương pháp này khá phức tạp, phụ thuộc rất nhiều vào cấu trúc phần cứng và độ dao động của sản phẩm trong quá trình cân, sẽ làm cho quá trình ước lượng tăng về mặt thời gian, gây ra hiện tượng trễ tính toán và gây ra sai số. Một nghiên cứu khác của Higino và Couto sử dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu cổ điển [6], dựa trên lọc trung bình dịch chuyển ngẫu nhiên và tự thích nghi kết hợp với ngõ ra số ổn định đáp ứng với sự thay đổi trọng lượng. Nghiên cứu tập trung vào việc giải quyết vấn đề cho xử lý tín hiệu và đáp ứng nhanh với sự thay đổi trọng lượng khi tác động lên cảm biến trọng lượng. Kết quả nghiên cứu hiệu quả với các loại cảm biến trọng lượng tĩnh, và có khả năng đáp ứng nhanh cho mỗi lần thay đổi giá trị trọng lượng.

Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Qisheng Wu, Ruoyu Pan, Xianglong Luo, Lei Li về phương pháp xử lý tín hiệu cho hệ thống cân động sử dụng mạng SSA-LVQ [7]. Dữ liệu được thu thập bởi Thuật toán phân tích phổ (SSA) dưới tiền xử lý, sau đó các giá trị đỉnh của trục trước, sau, độ dốc tăng dần và độ dốc giảm dần trên cầu cân, tốc độ và loại phương tiện, được sử dụng làm đầu vào học tập cho Mạng lượng tử hóa véc tơ (LVQ) và trọng lượng tĩnh như đầu ra để mô phỏng. Kết quả cho thấy: độ chính xác với phương pháp đề xuất cao hơn tín hiệu số truyền thống, phương pháp xử lý và mạng LVQ truyền thống, phương pháp giảm hiệu quả sai số đo của động hệ thống cân, và có thể được áp dụng trực tiếp cho hệ thống cân. Phương pháp này phù hợp cho việc thiết kế các hệ thống cân có tải trọng lớn như cân tải trọng xe, cho phép sai số lớn.

Trong nghiên cứu của nhóm tác giả Piotr BAZYDLO, Roman SZEWCZYK, Michał URBANSKI [8] về một hệ thống tích hợp cân động dựa trên SCSDA. Nghiên cứu đề cập tới sự tích hợp của ba môi trường SCADA, LabVIEW và MATLAB để tạo ra một hệ thống công nghiệp có khả năng đối phó với các vấn đề trọng lượng dao động lớn.

Ngoài ra, các thuật toán đáp ứng khả thi cho điều khiển quá trình và trao đổi dữ liệu được trình bày. Bài viết bao gồm một mô tả về khả năng ứng dụng, kiểm tra hiệu suất, cũng như lợi ích và nhược điểm của hệ thống sử dụng các môi trường SCADA LabVIEW và MATLAB.

Trong nghiên cứu [14], tác giả giới thiệu nghiên cứu một hệ thống điện tử, cơ học và phần mềm, nơi các phép đo trọng lượng của trứng có thể được thực hiện động, được phát triển, phương pháp này cho kết quả phù hợp với sản phẩm cân là trứng.

Nhóm tác giả Maciej [15], trình bày nghiên cứu cân động dựa trên mô hình FIR, nghiên cứu tiếp cận được đề xuất trong bài báo này có thể được mô tả dưới dạng lược đồ logic dựa trên mô hình đáp ứng xung hữu hạn phản ứng của hệ thống cân.

Trong nghiên cứu [16], nhóm tác giả giới thiệu Các thí nghiệm xác nhận rằng khi được sửa đổi thích hợp, phương pháp dựa trên nhận dạng sẽ trở thành một công cụ đáng tin cậy để đo khối lượng động trong cân kiểm tra.

Có nhiều công ty sản xuất cân động ứng dụng cân đo xác định trọng lượng cho nhiều loại sản phẩm khác nhau, kỹ thuật sử dụng cho các hệ thống này cũng có nhiều điểm khác nhau.

Hãng sản xuất cân Mettler Toledo [9] giới thiệu sản phẩm cân buro kiện động, với tính năng là cân buro kiện đặt trên băng tải, với tốc độ băng tải khoảng 90m/phút, độ chính xác $\pm 10g$. Với hệ thống cân động này, vật cần cân được đóng hộp nên độ rung lắc thấp. Sản phẩm cân chủ yếu là buro kiện, cho độ chính xác $\pm 10g$. Cân băng tải SIEMENS [10] là cân băng tải tích lũy được ứng dụng để cân xác định khối lượng vật liệu chạy qua tuyến băng, được ứng dụng trong các ngành công nghiệp khai thác (than, quặng...), sản xuất, chế biến và cảng biển. Dung lượng cân 5 tấn/giờ đến 1200 tấn /h; Tốc độ băng cho phép 2m/s đến 5m/s; Cấp chính xác cấp II, III theo tiêu chuẩn Việt Nam; Độ rộng băng tải 0,6 m đến 1,2 m.

Các công ty sản xuất các loại cân động đáp ứng cho các sản phẩm cân khác nhau sẽ tương ứng với các loại cân khác nhau được chế tạo.

Cân trái cây trên băng chuyền hoạt động liên tục đòi hỏi phải có một thuật toán hữu hiệu cho việc xử lý tín hiệu vì ngoài chuyển động rung của băng tải gây ra sai số thì sự lún của trái cây cũng là yếu tố gây ra sai số tín hiệu cân. Trong bài báo này, tác giả sẽ nghiên cứu giải thuật Kalman xử lý tín hiệu cân động điện tử. Kết quả của giải thuật sẽ được so sánh với phương pháp lọc FIR và lọc trung bình để chứng minh tính hiệu quả của giải thuật. Cuối cùng nhóm nghiên cứu sẽ ứng dụng giải thuật vào để chế tạo một cân động điện tử hoạt động dưới băng chuyền chuyển động liên tục.

Phần cứng của hệ thống được chế tạo bao gồm: Băng tải động PVC hoạt động với tốc độ 20 sản phẩm/1 phút, động cơ kéo là động cơ AC 180 watt, 1 Load cell cảm biến trọng lực UDA của Keli và khung đỡ dưới đặt hệ thống. Kết quả cân sẽ được hiển thị lên màn hình HMI. Phạm vi trọng lượng sản phẩm trong khoảng từ 0,1kg - 10kg.

Băng tải trên được thiết kế với kích thước (1190 – 520 – 268 mm) và các chi tiết như: Trục, rulo quay, puley bị động, puley chủ động, phần tăng giảm lực căng băng tải,

phần con lăn, cảm biến quá trình, khung trên, dây đai...; Cảm biến trọng lượng với kích thước (170 – 70 – 70 mm) và khung dưới với kích thước (đế) là (810 – 650 – 525 mm).

Do cân là cân động, trọng lượng của cân trong quá trình cân không chỉ phụ thuộc vào giới hạn của cảm biến trọng lượng mà còn phụ thuộc vào kết cấu động cơ băng tải và cơ khí. Với kết cấu của của Modul cân động này, giá trị cân phù hợp là phạm vi 0,1kg tới 10kg.

2. Thuật toán Kalman và ứng dụng thuật toán Kalman vào xử lý tín hiệu cân động

2.1. Thuật toán Kalman [11]

Bộ lọc Kalman là bộ lọc số được dùng để lọc tín hiệu nhiễu bằng quan sát các phép đo trong một khoảng thời gian xác định. Bộ lọc Kalman là một thuật toán ước lượng dự báo - hiệu chỉnh chính xác, sử dụng như một mô hình hệ động học để dự báo các giá trị trạng thái và một mô hình đo để hiệu chỉnh việc dự báo này.

2.2. Ứng dụng THUẬT toán Kalman vào xử lý tín hiệu cân động

Bộ lọc Kalman sử dụng trong hệ thống này là ước lượng các trạng thái của một quá trình được rời rạc theo thời gian bằng một phương trình ngẫu nhiên tuyến tính, phương trình chuyển trạng thái [12], [13]:

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_k u_k + w_k \quad (1)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

Trong đó:

x_0 là giá trị khởi tạo ban đầu cho quá trình tính toán là 1.2;

x_k là trạng thái đọc được từ cảm biến trọng lực tại thời điểm k ;

u_k là vector điều khiển đầu vào (hiệu chỉnh chiều phù hợp của các vector);

w_k là nhiễu dao động trong quá trình cân;

G_k là ma trận chuyển đổi đầu vào (với hệ thống này là hệ số 1:1);

F_k là ma trận chuyển trạng thái (Hệ số chuyển trạng thái là 1 do hệ thống tính toán giá trị trực tiếp);

z_k là thông tin quan sát hay đo lường thực hiện tại thời điểm k ;

H_k là ma trận quan sát là 1;

v_k là nhiễu cộng trong quá trình đo lường.

Giải thuật bao gồm 2 quá trình: Quá trình ước lượng trọng lực (quá trình dự đoán) và quá trình điều chỉnh trọng lực.

Quá trình dự đoán giá trị trọng lực: Bộ lọc Kalman dựa vào trạng thái ước lượng giá trị trọng lực để điều chỉnh $\hat{x}_{k/k}$ là ước lượng của x_k đọc vào từ cảm biến trước đó để ước lượng trạng thái $\hat{x}_{k+1|k}$ là ước lượng dự đoán của x_{k+1} cho phép đo z_{k+1}

Trạng thái dự đoán:

$$\hat{x}_{k+1|k} = F_k \hat{x}_{k/k} + G_k u_k \quad (3)$$

Hiệp phương sai ước lượng dự đoán:

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k/k} F_k^T + Q_k \quad (4)$$

Ký hiệu ước lượng dự đoán của trạng thái x_{k+1} là $\hat{x}_{k+1|k}$

Quá trình hiệu chỉnh giá trị trọng lực: là quá trình thu thập giá trị trọng lực hiện tại, và dựa vào giá trị trọng lực đo lường hiện tại hiệu chỉnh giá trị trọng lực ước lượng dự đoán để thu được kết quả ước lượng chính xác. Kết quả này chính là giá trị ước lượng đầu ra của bộ lọc Kalman. Quá trình hiệu chỉnh ước lượng được thực hiện như sau:

Độ lợi Kalman:

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \quad (5)$$

Trạng thái ước lượng điều chỉnh:

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1|k}) \quad (6)$$

Hiệp phương sai ước lượng điều chỉnh:

$$P_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1|k} \quad (7)$$

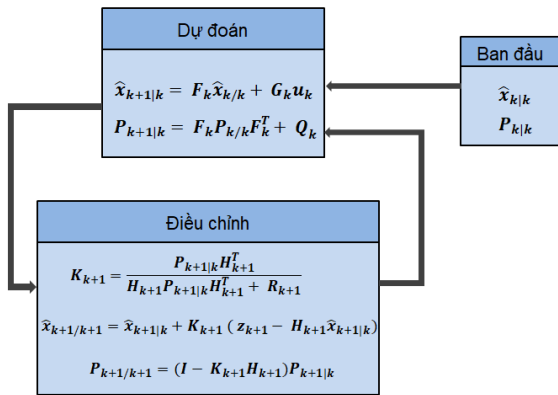
Trong đó:

K_{k+1} là độ lợi của mạch lọc Kalman;

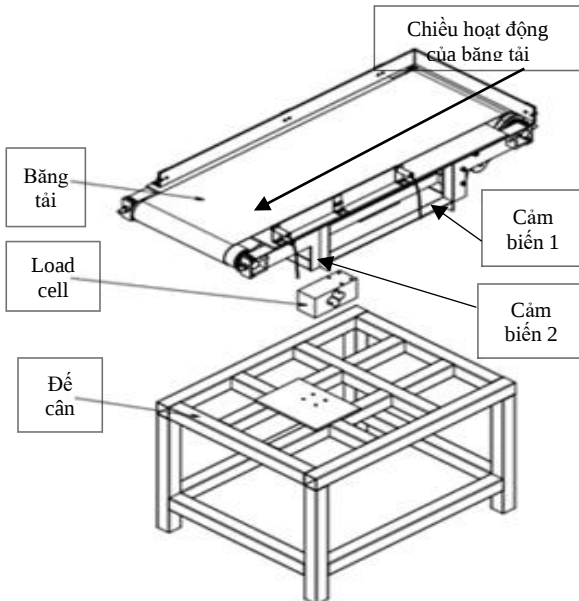
I là ma trận đơn vị dùng để điều chỉnh số chiều vector;

$\hat{x}_{k+1/k+1}$ là trạng thái ước lượng điều chỉnh ở thời điểm thứ $k+1$. Đây chính là giá trị trọng lực đầu ra của bộ lọc Kalman.

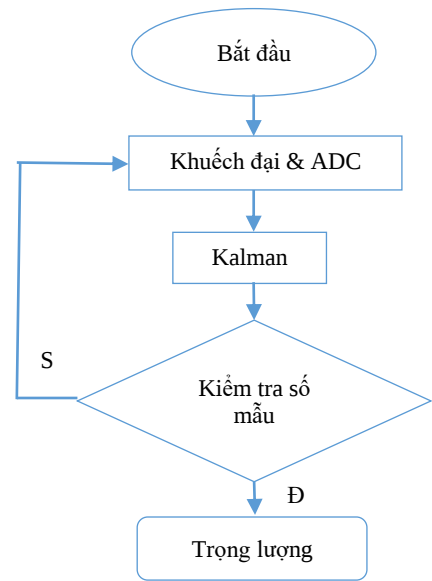
Lưu đồ giải thuật Kalman cho quá trình xử lý tín hiệu cân động được thể hiện như trong Hình 1.



Hình 1. Lưu đồ giải thuật xử lý tín hiệu cân động sử dụng bộ lọc Kalman



Hình 2. Bản vẽ cấu tạo hệ thống cân động



Hình 3. Lưu đồ giải thuật của toàn hệ thống cân động

Ứng dụng thuật toán Kalman vào chế tạo cân động.

Hoạt động của hệ thống: Sản phẩm cần cân sẽ được đặt lên băng tải (Băng tay hay hoặc tự động) trước cảm biến 1. Băng tải hoạt động liên tục chuyển sản phẩm qua cảm biến 1 để bắt đầu quá trình cân. Khi sản phẩm qua cảm biến 2, quá trình cân kết thúc chuyển sản phẩm tới các công đoạn tiếp theo. Tốc độ cân cho 1 trái là 3 giây.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Nhóm tác giả thực nghiệm trên chip stm32F746 đọc 1000 mẫu giá trị ADC 12bit lên Matlab dùng thuật toán Kalman xử lý tín hiệu cân động.

Vì giới hạn sản phẩm cân của hệ thống nằm trong phạm vi từ 0,1kg - 10,0kg nên nhóm nghiên cứu sẽ thí nghiệm với các giá trị trọng lượng trong phạm vi này là: 0,1kg; 3,2kg; 5,5kg và 10,0kg.

Kết quả đạt được như các Hình 5 với trọng lượng là 0,1kg, Hình 6 trọng lượng là 3,2kg, Hình 7 trọng lượng là 5,5kg, Hình 8 trọng lượng là 10,0 kg. Bảng 1 là kết quả thí nghiệm cân các loại trọng lượng khác nhau và độ lệch của mỗi lần cân giữa giá trị cân tĩnh và cân động.

Kết quả phân tích ở Hình 4a là tín hiệu đọc về từ cảm biến trọng lực, kết quả được phân tích bằng phép biến đổi Fourier để quan sát tín hiệu ở miền tần số. Kết quả phân tích phổ ngõ vào cho thấy phần lớn phổ tín hiệu cơ bản tập trung ở vùng tần số thấp có F_s khoảng dưới 100Hz.

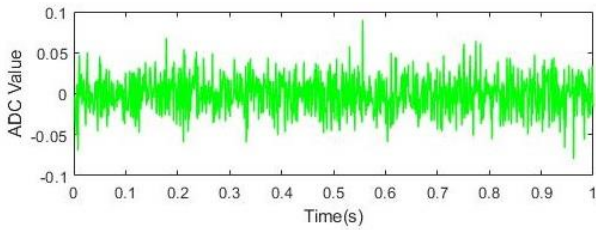
Với kết quả phân tích phổ trên, nhóm nghiên cứu sử dụng bộ lọc FIR lọc thông thấp có tần số cắt là 100Hz và kết quả như Hình 4b.

Với kết quả tính toán như thể hiện trong Hình 4, nhóm nghiên cứu tiến hành lấy mẫu tín hiệu sau khi lọc với chu kỳ lấy mẫu là 0,01 giây, sau đó kết quả được tính trị trung bình cho tín hiệu dùng phương pháp lọc FIR và trung bình này.

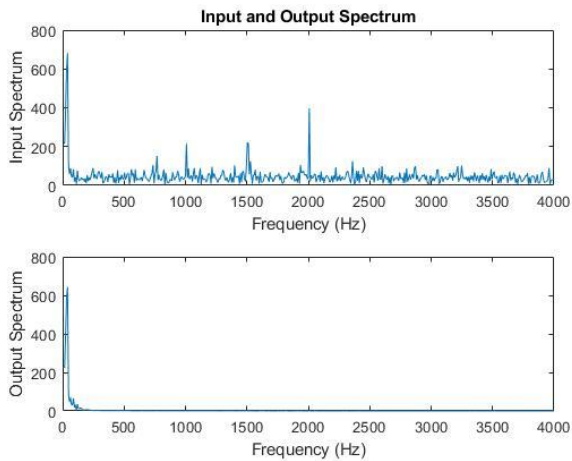
Các kết quả của Hình 5, Hình 6, Hình 7, Hình 8 cho thấy, thuật toán Kalman cho kết quả đáp ứng rất tốt với sự biến động tín hiệu ngõ vào. Kết quả tính toán đường màu xanh cho thấy, chỉ khoảng 70 mẫu giá trị ngõ vào, kết quả tính toán của bộ lọc Kalman cho giá trị rất sát với giá trị

chuẩn (từ tài liệu cảm biến trọng lượng Keli UDA của nhà cung cấp) đường màu đỏ. Kết quả thực nghiệm trên các Hình 5, 6, 7 cũng cho thấy, kết quả ngõ ra rất ổn định suốt quá trình của các mẫu sau mẫu 70 tới mẫu thứ 1000.

Tương tự với tín hiệu ngõ vào như vậy, các kết quả của Hình 5, Hình 6, Hình 7, Hình 8 cũng cho thấy, việc áp dụng bộ lọc FIR và Trung bình (Đường màu tím và màu đen) cho kết quả có độ lệch khá lớn so với giá trị chuẩn. Giá trị lệch này có xu hướng tăng dần khi trọng lượng của sản phẩm tăng và có chiều hướng cho giá trị lớn hơn giá trị thực. Điều này cũng đúng với thực tế khi trọng lượng tăng, quá trình chuyển động của băng tải sẽ gây ra lực dao động tăng và vector lực có xu hướng tăng theo chiều hướng xuống, làm cho sai số trọng lượng có xu hướng tăng khi trọng lượng sản phẩm cân tăng.

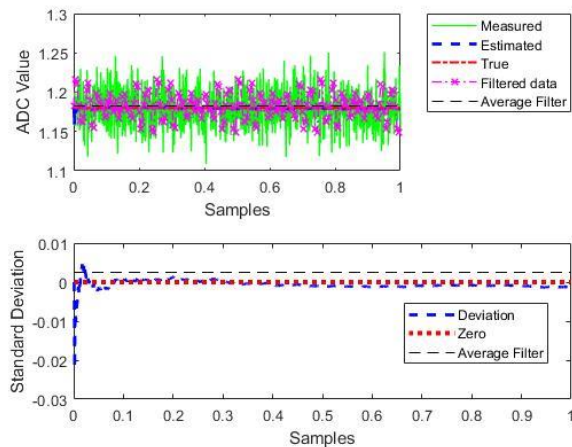


a. Tín hiệu thu được chưa xử lý

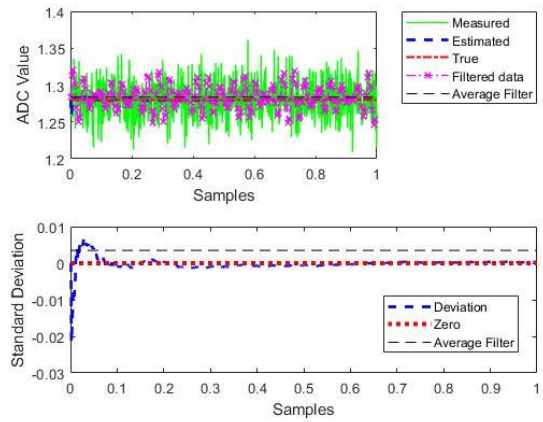


b. Phân tích phổ và lọc thông thấp tín hiệu

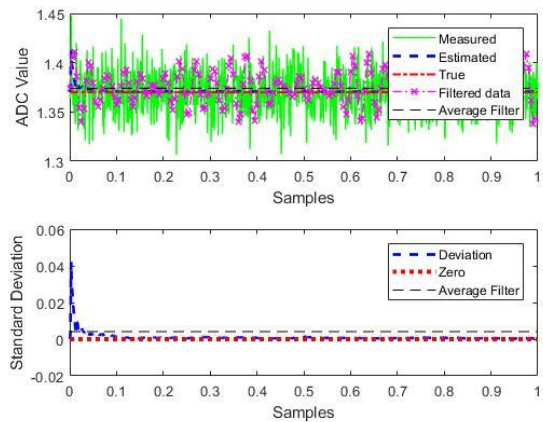
Hình 4. a. Tín hiệu thu; b. Phân tích phổ và lọc thông thấp



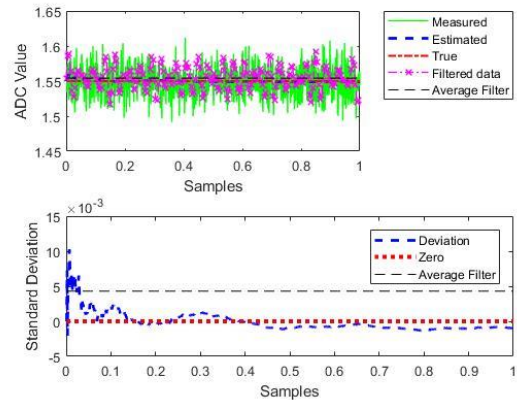
Hình 5. Tín hiệu cân trọng lượng 0,1kg



Hình 6. Tín hiệu cân trọng lượng 3,2kg



Hình 7. Tín hiệu cân trọng lượng 5,5kg



Hình 8. Tín hiệu cân trọng lượng 10,0kg



Hình 9. Hệ thống cân động

Dựa vào kết quả thực nghiệm nêu trên, nhóm tác giả tiến hành chế tạo một cân động điện tử, có khả năng cân trong phạm vi 0,1kg tới 10kg đối với sản phẩm cân động và 0,01kg tới 100kg với ứng dụng là cân tĩnh.

Kết quả đối sánh độ lệch của các giá trị trọng lượng cân khác nhau so với giá trị chuẩn của các giá trị tương ứng trong Bảng 1 cho thấy, các giá trị đạt trong phạm vi lệch là xấp xỉ 1% (0,0097/1kg). Giá trị này phù hợp với tiêu chuẩn cân trọng lượng theo tiêu chuẩn Việt Nam.

Bảng 1. Kết quả cân thực nghiệm

Loại trái cây	TT Cân thí nghiệm	Cân tĩnh (kg)	Cân động (kg)
Dưa hấu dài	1	3,55	3,58
	2	2,65	2,68
	3	2,23	2,26
Bưởi da xanh	4	1,20	1,22
	5	1,42	1,41
	6	1,31	1,33
Cộng		12,36	12,46
Sai số cân động/kg		0,0097	

4. Kết luận

Nhóm nghiên cứu đã nghiên cứu thành công ứng dụng thuật toán Kalman vào xử lý tín hiệu cân động. Kết quả nghiên cứu được thí nghiệm trên phần mềm Matlab để kiểm chứng tính hiệu quả của thuật toán. Kết quả được đối sánh với phương pháp lọc FIR và Trung bình đã thể hiện được tính ưu việt của thuật toán Kalman. Kết quả thí nghiệm được ứng dụng vào chế tạo hệ thống thực và được thử nghiệm với nhiều giá trị trọng lượng khác nhau. Kết quả thực nghiệm cho thấy, cân hoàn toàn đáp ứng được các tiêu chí của một cân trọng lượng thông thường trong phạm vi 0,1kg tới 10kg.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- [1] Wen-hui, Z., Bing-yuan, H., Zhen-jiang, M.: "Error Mechanism of Dynamic Weighing System", *Forest Engineering*, 2007, 23, (5), pp. 23-24.

- [2] RakhaH, A., Al-Kaisy, K.R.: "Field evaluation of weigh-in-motion screening on truck weigh station operations", *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, 2003, 12, (6), pp. 74-79.
- [3] Wen-bing, W.: "Application of Vehicle Dynamic Weigh Technology in Highway Management", *Computer and Communications*, 2004, 22, (2), pp.111-113.
- [4] Halimic, M., Balachandran, W., Hodzic, M., et al.: "Performance improvement of dynamic weighing systems using linear quadratic Gaussian controller", *Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 03, Proceedings of the 20th IEEE*, 2003, 20, (2), pp. 1537-1540.
- [5] Halimic, M., Balachandran, W., Enab, Y.: "Fuzzy logic estimator for dynamic weighing system", *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference*, 1996, 3, (1), pp. 2123-2129.
- [6] Higino, J., Couto, C.: "Digital filtering in smart load cells", *Industrial Electronics Control and Instrumentation Proceedings of the IEEE IECON 21st International Conference*, 1995, 21, (2), pp. 990-994.
- [7] Wu, Q., Pan, R., Luo, X., et al.: "A Signal Processing Method for Dynamic Weighing System", *SSA-LVQ Network ICEMI, The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009.
- [8] Bazydło, P., Szewczyk, R., Urbański, M.: "An Integrated Dynamic Weighing System Based On Scada", *Operations Research and Decisions*, 2015, 10, (25), pp. 5277-5288.
- [9] Link: <https://www.mt.com/vn/vi/home.html>. [Accessed: 20-Feb-2020].
- [10] Link: <http://asae.vn/vi/c/can-bang-tai-siemens.html>. [Accessed: 15-Mar-2020].
- [11] Rhudy, M.B., Salguero, R.A., Holappa, K.: "A Kalman filtering tutorial for undergraduate students", *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, 2017, 8, (1), pp.127-139.
- [12] Welch, G., Bishop, G.: "An introduction to the Kalman filter", Technical Report TR 95-041, *University of North Carolina, Department of Computer Science*, 1995.
- [13] Kalman, R.E.: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Trans. of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1960, 2, (12), pp. 35-45.
- [14] Smail, Y.: "Digital Signal Processing-based Dynamic Mass Measurement System for Egg Weighing Process", *Measurement and Control*, 2017, 50 (4), pp. 97–102
- [15] Maciej, N., Michał, M., Przemysław, P.: "High-Precision FIR-Model-Based Dynamic Weighing System", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65 (10), pp. 2349 – 2359.
- [16] Maciej, N., Michał, M., Przemysław, P.: "System identification based approach to dynamic weighing revisited", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 80 (1), pp. 582-599.

(BBT nhận bài: 27/7/2020, hoàn tất thủ tục phản biện: 04/11/2020)