

Nâng cao độ chính xác cân bằng tải bằng bộ lọc Median và EMA trong xử lý tín hiệu cảm biến tải trọng

Hoàng Ngọc Nhân¹, Lê Mạnh Hùng^{1*}, Đặng Kiên Quyết²

¹Viện Đổi mới sáng tạo Quốc gia, Bộ Khoa học và Công nghệ, C6, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Công ty Cổ phần Nhiệt điện Phả Lại, phường Chí Linh, TP. Hải Phòng, Việt Nam

Ngày nhận bài 24/6/2025; ngày chuyển phản biện 26/6/2025; ngày nhận phản biện 15/7/2025; ngày chấp nhận đăng 21/7/2025

Tóm tắt:

Hệ thống cân bằng tải đóng vai trò quan trọng trong các dây chuyền sản xuất công nghiệp như khai thác khoáng sản, nhà máy nhiệt điện, xi măng hay chế biến vật liệu rời. Nhiệm vụ chính của hệ thống này là đo lường khối lượng vật liệu được vận chuyển liên tục, giúp doanh nghiệp theo dõi sản lượng, tối ưu hóa quá trình sản xuất và duy trì chất lượng sản phẩm đầu ra. Bài báo trình bày một phương pháp lọc tín hiệu kết hợp giữa bộ lọc trung vị (Median) và bộ lọc trung bình động lũy thừa (EMA) nhằm cải thiện độ ổn định và độ chính xác của tín hiệu cảm biến tải trọng trong hệ thống cân bằng tải. Hệ thống được xây dựng trên nền tảng vi điều khiển STM32H743ZIT tích hợp ADC 24-bit và hệ điều hành thời gian thực FreeRTOS. Tín hiệu được xử lý qua chuỗi lọc Median bậc 7 và EMA với hệ số $\alpha=0,3$ trước khi hiệu chuẩn và tính toán lưu lượng. Thử nghiệm tại dây chuyền thực tế cho thấy, giải pháp giúp giảm nhiễu xung hơn 68%, độ lệch chuẩn tín hiệu giảm hơn 62%, độ trễ chỉ khoảng 104 ms, sai số đo khối lượng duy trì dưới $\pm 1,2\%$. Kết quả cho thấy phương pháp có tiềm năng ứng dụng cao trong các môi trường công nghiệp có nhiễu mạnh.

Từ khóa: bộ lọc trung bình động lũy thừa, cảm biến tải trọng, cân bằng tải, giảm nhiễu, STM32, xử lý tín hiệu số.

Chỉ số phân loại: 1.3, 2.1, 2.2

Enhancing the accuracy of conveyor belt weighing systems using Median and Exponential Moving Average filters in load cell signal processing

Ngoc Nhan Hoang¹, Manh Hung Le^{1*}, Kien Quyet Dang²

¹National Academy for Advanced Technology and Innovation, Ministry of Science and Technology, C6 Building, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

²Pha Lai Thermal Power Joint Stock Company, Chi Linh Ward, Hai Phong City, Vietnam

Received 24 June 2025; revised 15 July 2025; accepted 21 July 2025

Abstract:

The belt weighing system plays a vital role in industrial production lines such as mineral mining, thermal power plants, cement manufacturing, and bulk material processing. Its main function is to measure the mass of material being continuously conveyed, enabling businesses to monitor throughput, optimise production processes, and maintain the quality of the output products. This article presents a signal filtering method that combines the Median filter and the Exponential Moving Average (EMA) filter to improve the stability and accuracy of load cell signals in conveyor belt weighing systems. The system is implemented on an STM32H743ZIT microcontroller platform, featuring an integrated 24-bit ADC and the FreeRTOS real-time operating system. The signal is processed using a seven-point Median filter followed by an EMA filter with a smoothing factor $\alpha=0.3$, prior to calibration and flow calculation. Experimental results from a real-world industrial conveyor line demonstrate that the proposed method reduces impulse noise by over 68%, decreases signal standard deviation by more than 62%, maintains latency at approximately 104 ms, and keeps mass measurement error below $\pm 1.2\%$. These results verify the feasibility and high efficiency of the proposed approach in harsh industrial environments with significant noise interference.

Keywords: conveyor belt weighing, digital signal processing, Exponential Moving Average filter, load cell, noise reduction, STM32.

Classification numbers: 1.3, 2.1, 2.2

*Tác giả liên hệ: Email: lemanhhung@mst.gov.vn

1. Đặt vấn đề

Hệ thống cân bằng tải là thành phần thiết yếu trong các dây chuyền sản xuất công nghiệp như khai thác khoáng sản, nhiệt điện, xi măng và chế biến vật liệu rời. Chức năng chính của hệ thống là đo khối lượng vật liệu di chuyển liên tục, giúp doanh nghiệp kiểm soát sản lượng, tối ưu hóa vận hành và đảm bảo chất lượng đầu ra. Độ chính xác của hệ thống phụ thuộc trực tiếp vào tín hiệu thu được từ cảm biến tải trọng. Tuy nhiên, trong môi trường công nghiệp, tín hiệu này thường bị ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ, rung động cơ học và biến thiên nhiệt độ - gây ra dao động không mong muốn và sai số đo [1, 2].

Để cải thiện chất lượng tín hiệu, nhiều nghiên cứu đã áp dụng các kỹ thuật lọc số trong khâu xử lý tín hiệu load cell. I. Yabanova (2017) [2] đã ứng dụng các phương pháp xử lý tín hiệu số nhằm giảm nhiễu động trong hệ thống cân bằng tải, trong khi D. Richiedei và cs (2022) [3] đề xuất bộ lọc thích nghi dạng Shaper-Based giúp rút ngắn thời gian ổn định tín hiệu. F. Liang và cs (2021) [4] triển khai bộ lọc trung bình trượt cải tiến cho hệ thống cân điện tử cho thấy, khả năng làm mịn tín hiệu nhưng độ phản hồi còn chậm khi tải biến thiên nhanh. Ngoài ra, B. Sun và cs (2021) [5] và M. Meller và cs (2014) [6] đã nghiên cứu các bộ lọc thích nghi như LMS và Kalman có khả năng tự điều chỉnh theo đặc tính nhiễu, tuy nhiên yêu cầu mô hình hệ thống chi tiết và chi phí tính toán cao, hạn chế khi ứng dụng trên vi điều khiển công suất thấp.

Trong khi đó, các bộ lọc phi tuyến như Median có ưu điểm nổi bật trong việc loại bỏ nhiễu xung ngắn mà không làm biến dạng tín hiệu gốc [7]. Tuy nhiên, Median chưa đủ hiệu quả khi đối mặt với nhiễu tần thấp. Để khắc phục, EMA với hệ số suy giảm $\alpha=0,3$ được sử dụng nhằm làm mượt tín hiệu và duy trì độ trễ thấp [8, 9]. Việc kết hợp hai bộ lọc này cho phép tận dụng ưu điểm của từng loại - Median loại nhiễu đột biến, EMA ổn định tín hiệu theo thời gian - qua đó cải thiện độ chính xác và tính đáp ứng của hệ thống đo trong môi trường nhiễu cao.

Trong bối cảnh đó, bài báo này đề xuất một phương pháp lọc tín hiệu kết hợp giữa Median bậc 7 và EMA với $\alpha=0,3$, được triển khai trên vi điều khiển STM32H743ZIT tích hợp bộ chuyển đổi tương tự - số (ADC) 24-bit ADS125H02 và hệ điều hành thời gian thực FreeRTOS. Giải pháp được đánh giá trên hệ thống cân bằng tải thực tế tại nhà máy nhiệt điện nhằm kiểm chứng khả năng giảm nhiễu, nâng cao độ ổn định tín hiệu và giảm độ trễ xử lý, đáp ứng yêu cầu đo lường liên tục trong môi trường nhiễu công nghiệp phức tạp.

2. Cơ sở lựa chọn bộ lọc

Trong hệ thống cân bằng tải, cảm biến tải trọng có nhiệm vụ đo lực tác dụng từ vật liệu di chuyển trên băng tải, sau đó chuyển đổi lực này thành tín hiệu điện tương ứng. Tuy nhiên, trong môi trường công nghiệp, tín hiệu đầu ra từ load cell thường bị nhiễu bởi các yếu tố như dao động cơ học, nhiễu điện từ (EMI) từ động cơ, nhiễu nguồn và biến thiên nhiệt độ. Những yếu tố này gây biến động tín hiệu và ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của phép đo trọng lượng tức thời [1, 2].

Theo S. Haykin (2014) [10], tín hiệu từ load cell có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$x(t)=s(t)+n(t) \quad (1)$$

trong đó: $x(t)$: tín hiệu đo được; $s(t)$: tín hiệu thực tế từ tải trọng; $n(t)$: nhiễu tổng hợp [1, 4].

Nhiễu $n(t)$ bao gồm các thành phần:

$$(i) \text{ Nhiễu trắng Gaussian: } n_g(t) \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

trong đó: $n_g(t)$: tín hiệu nhiễu trắng Gaussian tại thời điểm t ; $N(0, \sigma^2)$: phân bố chuẩn với trung bình 0 và phương sai σ^2 ; σ^2 : phương sai (mức cường độ nhiễu).

$$(ii) \text{ Nhiễu xung: } n_i(t) = \sum_k a_k \delta(t - t_k) \quad (3)$$

trong đó: $n_i(t)$: tín hiệu nhiễu xung tại thời điểm t ; a_k : biên độ xung thứ k ; $\delta(t - t_k)$: hàm Dirac delta, biểu diễn xung xảy ra tại thời điểm t_k ; t_k : thời điểm xuất hiện xung thứ k .

$$(iii) \text{ Nhiễu tần số thấp: } n_f(t) = A \sin(2\pi f_i t + \phi) \quad (4)$$

trong đó: $n_f(t)$: tín hiệu nhiễu tần số thấp tại thời điểm t ; A : biên độ của nhiễu; f_i : tần số thấp của nhiễu; t : thời gian; ϕ : pha ban đầu của sóng sin.

Để loại bỏ các thành phần nhiễu và khôi phục tín hiệu mang ý nghĩa vật lý, các kỹ thuật xử lý tín hiệu số (Digital signal processing - DSP) được áp dụng, trong đó các bộ lọc số là công cụ then chốt. Một số bộ lọc phổ biến gồm [3, 4, 10]:

Bộ lọc trung bình cộng: Bộ lọc tuyến tính đơn giản, lấy trung bình một cửa sổ mẫu trượt. Để triển khai nhưng phản hồi chậm trước tín hiệu thay đổi nhanh.

Bộ lọc Median: Bộ lọc phi tuyến, hiệu quả cao trong loại bỏ nhiễu xung hoặc đột biến, bằng cách lấy giá trị trung vị trong tập mẫu. Phù hợp với tín hiệu có nhiều nhiễu ngẫu nhiên [2, 7].

Bộ lọc EMA: Bộ lọc tuyến tính đệ quy, làm mịn tín hiệu bằng công thức:

$$y[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha)y[n - 1] \quad (5)$$

trong đó: α ($0 < \alpha < 1$) là hệ số làm mịn, quyết định mức độ phản ứng của bộ lọc; y là giá trị tín hiệu sau khi đã qua bộ lọc EMA. EMA đơn giản, nhẹ tài nguyên, phù hợp với vi điều khiển [11].

Bộ lọc Kalman: Bộ lọc tối ưu theo nghĩa bình phương tối thiểu, hiệu quả cao trong môi trường có mô hình động học rõ ràng. Tuy nhiên, việc thiết lập tham số phù hợp đòi hỏi hiểu biết sâu về hệ thống [11].

Bộ lọc LMS (Least Mean Squares Filter): Bộ lọc tự thích nghi, điều chỉnh trọng số dựa trên sai số giữa đầu ra và tín hiệu mong muốn. Tuy mạnh trong môi trường có nhiều thay đổi, LMS cần có tín hiệu “desired” xác định - điều khó đảm bảo trong đo tải trọng thời gian thực [12].

2.1. Đánh giá các bộ lọc

Độ phức tạp tính toán và tài nguyên hệ thống của các bộ lọc được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. So sánh đặc tính các bộ lọc [2-6, 8, 10, 11].

Bộ lọc	Số phép tính mỗi mẫu	Yêu cầu bộ nhớ (RAM)	Đặc điểm tính toán
Median (bậc 7)	~20 phép so sánh + sắp xếp	7 mẫu (buffer 1 chiều)	Phi tuyến, cần sắp xếp lại dữ liệu mỗi chu kỳ
EMA ($\alpha=0,3$)	1 phép nhân + 1 phép cộng	1 mẫu trước đó + 1 hệ số α	Tuyến tính, nhẹ tài nguyên, không cần buffer
Trung bình cộng (bậc 7)	6 phép cộng + 1 chia	7 mẫu (buffer)	Tuyến tính, đơn giản, nhưng có độ trễ lớn
Kalman	~10-20 phép nhân/ cộng + 1 phép nghịch đảo ma trận (tùy mô hình)	~10 biến trạng thái (ma trận + vector)	Tính toán phức tạp, cần xử lý ma trận
LMS	~2N phép nhân + 2N phép cộng (N=số hệ số)	N hệ số + N giá trị mẫu	Tự thích nghi, cần nhiều RAM khi N lớn

Các thông số trong bảng 1 được xác định dựa trên nguyên lý hoạt động của từng bộ lọc và số phép toán cần thực hiện để xử lý một mẫu dữ liệu. Việc ước lượng này được tham khảo từ công thức tính toán đặc trưng của từng bộ lọc.

Kết quả đánh giá hiệu quả lọc nhiễu của các bộ lọc được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. So sánh các bộ lọc số dùng trong xử lý tín hiệu load cell [2-9].

Bộ lọc	Ưu điểm	Nhược điểm	Độ phức tạp tính toán	Yêu cầu tài nguyên	Khả năng loại nhiễu xung	Khả năng làm mịn tín hiệu
Median (bậc 7)	Loại bỏ tốt nhiễu xung, không làm biến dạng biên tín hiệu	Có độ trễ pha, không thích hợp với nhiễu tần thấp liên tục	Trung bình	Thấp	★★★★★	★★★★☆
EMA ($\alpha=0,3$)	Làm mịn tốt, nhẹ tài nguyên, dễ tính toán	Không xử lý hiệu quả nhiễu xung lớn	Thấp	Rất thấp	★★★☆☆	★★★★★
Kalman	Tối ưu hoá dựa trên mô hình hệ thống, loại nhiễu tốt	Cần mô hình chính xác, phức tạp khi triển khai thực tế	Cao	Trung bình	★★★★☆	★★★★★
LMS	Tự thích nghi theo môi trường thay đổi, tốt cho tín hiệu biến thiên	Cần tín hiệu mong muốn (desired), khó có trong thời gian thực	Cao	Cao	★★★☆☆	★★★★☆
Trung bình cộng	Đơn giản, hiệu quả với nhiễu tần thấp	Độ trễ pha lớn, kém hiệu quả với nhiễu xung	Thấp	Thấp	★★☆☆☆	★★★★☆

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã khảo sát nhiều thuật toán và lựa chọn hai bộ lọc phù hợp cho hệ thống cân bằng tải: Median bậc 7 và EMA với $\alpha=0,3$ với những lý do sau đây:

2.2. Bộ lọc Median bậc 7 [2, 4, 7, 9]

Lý do chọn bậc 7: i) Cửa sổ 7 mẫu cho phép loại bỏ nhiễu xung ngắn hiệu quả (có thể loại bỏ tối đa 3 mẫu nhiễu liên tiếp); ii) Thời gian đáp ứng khoảng 75 ms (với tần số lấy mẫu 40 Hz) - phù hợp với yêu cầu thời gian thực; iii) Độ trễ pha cố định và có thể dự đoán được; iv) Tốn ít tài nguyên tính toán hơn so với bậc cao hơn.

Hiệu suất: i) Loại bỏ hiệu quả nhiễu xung có biên độ lớn; ii) Bảo toàn các cạnh tín hiệu tốt hơn so với bộ lọc trung bình cộng; iii) Không làm biến dạng tín hiệu gốc.

2.3. Bộ lọc EMA với $\alpha=0,3$ [8, 10, 11]

Lý do chọn $\alpha=0,3$:

- Thời gian đáp ứng: $\tau_{resp}^{95\%} \approx 3 \times \frac{1-\alpha}{\alpha} \times T_s = 175 \text{ ms}$.
- Độ trễ tín hiệu đặc trưng: $\sim 29 \text{ ms}$.
- Băng thông: $f_c \approx \frac{\alpha}{2\pi(1-\alpha)} \times f_s \approx 2,73 \text{ Hz}$.
- Cân bằng tốt giữa độ ổn định và thời gian đáp ứng.

v) Phù hợp với tần số thay đổi tải trọng thực tế trên băng tải.

Đặc điểm:

- i) Làm mịn tín hiệu hiệu quả.
- ii) Đáp ứng nhanh với thay đổi tải trọng.
- iii) Tốn ít bộ nhớ (chỉ cần lưu 1 giá trị trước đó).
- iv) Tính toán đơn giản, phù hợp với vi điều khiển.

2.4. Kết hợp hai bộ lọc [2, 6, 8]

Thứ tự xử lý: Median → EMA.

Lợi ích: Median loại bỏ nhiễu xung trước; EMA làm mịn tín hiệu sau; độ trễ tín hiệu tổng hợp: ~104 ms; tổng thời gian đáp ứng: ~275-300 ms; độ ổn định cao với nhiễu đa dạng.

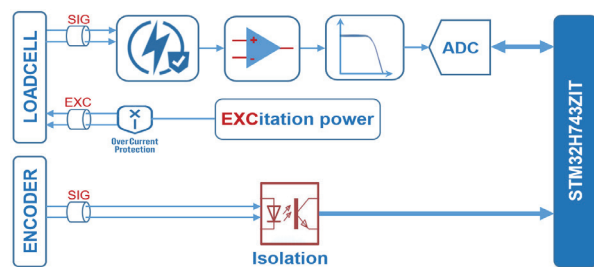
Hiệu suất tổng thể: giảm nhiễu xung: ~68%; giảm nhiễu tần số thấp: >70%; độ ổn định tín hiệu: ±0,1% fs; thời gian đáp ứng: phù hợp với yêu cầu thực tế.

Việc kết hợp tuần tự hai bộ lọc này giúp tận dụng ưu điểm của từng phương pháp - Median loại bỏ nhiễu đột biến hiệu quả, trong khi EMA ổn định tín hiệu theo thời gian. Từ đó, hình thành chuỗi lọc có khả năng loại nhiễu tốt, đảm bảo tín hiệu đầu ra vừa ổn định vừa đáp ứng nhanh với biến động trọng lượng.

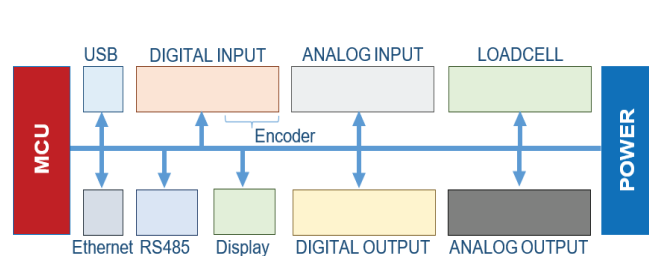
3. Phương pháp và thiết kế hệ thống

3.1. Kiến trúc phần cứng

Hệ thống được thiết kế nhằm thực hiện xử lý tín hiệu tải trọng theo thời gian thực, đáp ứng yêu cầu chính xác và độ ổn định cao trong môi trường công nghiệp. Cấu hình phần cứng chính (hình 1, 2) bao gồm:



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống.



Hình 2. Sơ đồ khối và mạch phần cứng thiết bị.

Vi điều khiển STM32H743ZIT: Vi điều khiển hiệu năng cao của STMicroelectronics với nhân ARM Cortex-M7 @480 MHz, RAM 1 MB, hỗ trợ xử lý tín hiệu số và hệ điều hành thời gian thực FreeRTOS [12-15].

Bộ chuyển đổi ADC ADS125H02: Chuyển đổi tín hiệu từ load cell với độ phân giải 24-bit và độ nhiễu thấp, đảm bảo tín hiệu đo có độ chính xác cao [16-18].

Load cell: Cảm biến tải trọng kiểu cầu điện trở strain gauge, nối trực tiếp đến ADC thông qua mạch khuếch đại.

Cảm biến tốc độ: Được gắn trên trục quay hoặc băng tải để đo tốc độ chuyển động, từ đó tính toán lưu lượng vật liệu.

Giao tiếp RS485/Modbus và Modbus TCP: Truyền dữ liệu đã xử lý đến hệ thống giám sát và HMI.

3.2. Luồng xử lý tín hiệu

Hệ thống xử lý tín hiệu theo chu kỳ lấy mẫu cố định (10-20 ms), sử dụng FreeRTOS để phân chia và quản lý luồng dữ liệu:

Xử lý tín hiệu tải trọng:

B1: ADC ADS125H02 lấy mẫu tín hiệu analog từ load cell.

B2: Bộ lọc Median bậc 7 loại bỏ nhiễu xung đột biến.

B3: Bộ lọc EMA ($\alpha=0,3$) làm mịn và ổn định tín hiệu.

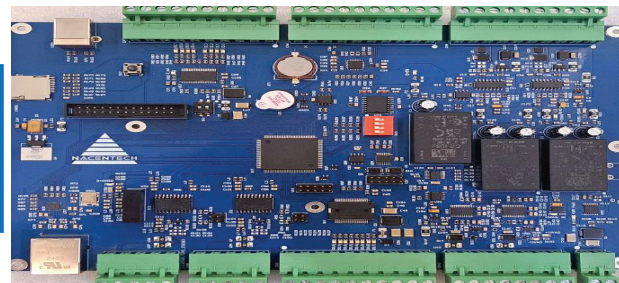
B4: Kết quả lọc được hiệu chuẩn để tính ra khối lượng tức thời (kg).

Xử lý tín hiệu tốc độ:

B1: Bộ định thời (TIM3) đếm số xung từ cảm biến tốc độ.

B2: Cứ sau T ms (cho phép cài đặt, mặc định 100 ms), hệ thống tính tốc độ băng tải theo công thức:

$$v = \frac{N_{xung} \times C}{T} \quad (6)$$



trong đó: N_{xung} : số xung đếm được trong thời gian T ; C : hệ số quy đổi từ xung sang mm.

B3: Tốc độ này được dùng để tính lưu lượng vật liệu:

$$Q = \text{khối lượng tức thời} \times v \quad (7)$$

3.3. Quản lý đa tác vụ với FreeRTOS

FreeRTOS được sử dụng để thực hiện song song với các chức năng chính của hệ thống (bảng 3).

Bảng 3. Tác vụ FreeRTOS được sử dụng để thực hiện các chức năng chính của hệ thống.

Tác vụ	Chức năng chính
Task_ADC	Đọc tín hiệu từ ADS125H02, lọc, hiệu chuẩn
Task_SpeedSensor	Đếm xung tốc độ, tính vận tốc bằng tải
Task_Calculation	Tính lưu lượng (kg/s, tấn/h), tổng tấn, lưu trữ dữ liệu
Task_Communication	Gửi dữ liệu lên HMI/máy tính qua TCP/Modbus
Task_Monitor	Giám sát lỗi cảm biến, bảo động, reset hệ thống...

Việc phân chia rõ ràng giúp hệ thống hoạt động ổn định, dễ mở rộng và tăng cường khả năng giám sát - điều khiển quan trọng trong ứng dụng công nghiệp liên tục.

4. Thực nghiệm và đánh giá kết quả

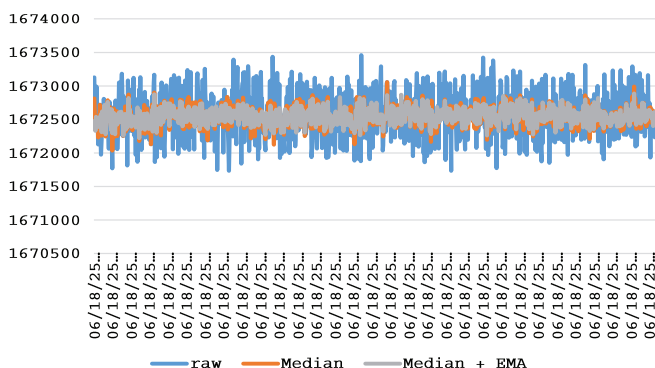
4.1. Môi trường thực nghiệm

Hệ thống được triển khai và kiểm thử tại cân băng 4B dây chuyền 2 - Công ty Cổ phần Nhiệt điện Phả Lại. Thử nghiệm nhằm đánh giá khả năng lọc nhiễu, độ ổn định tín hiệu, thời gian đáp ứng và sai số đo khối lượng trong điều kiện công nghiệp thực tế (rung động, nhiễu điện từ, biến thiên nhiệt độ).

Thông số cài đặt: tốc độ lấy mẫu: 40 Hz; bộ lọc Median: cửa sổ 7 mẫu; EMA: hệ số $\alpha=0,3$; thời gian cập nhật tốc độ: 100 ms.

4.2. Đồ thị tín hiệu và nhận xét ban đầu

Tập dữ liệu gồm 1.000 mẫu được thu thập từ cảm biến tải trọng trong trạng thái vận hành ổn định. Hình 3 minh họa tín hiệu gốc (raw), sau lọc Median và sau chuỗi lọc Median + EMA.



Hình 3. Tín hiệu cảm biến tải trọng.

Kết quả cho thấy, tín hiệu sau lọc có độ dao động thấp hơn, loại bỏ hiệu quả nhiễu xung và dao động không mong muốn, trong khi vẫn giữ được đặc trưng vật lý của tải trọng.

4.3. So sánh định lượng tín hiệu

Bảng 4 trình bày các chỉ số thống kê gồm: giá trị trung bình, độ lệch chuẩn, phương sai, giá trị cực trị, các tứ phân vị và hệ số biến thiên (CV).

Bảng 4. Chỉ số thống kê số liệu.

Chỉ số thống kê	Raw	Median 7 mẫu	Median 7+EMA ($\alpha=0,3$)
Số lượng mẫu (n)	1.000	1.000	1.000
Trung bình (Mean)	1.672.563,93	1.672.541,12	1.672.543,70
Độ lệch chuẩn (Std)	333,11	139,53	111,63
Phương sai (Var)	110.960,32	19.467,41	12.460,58
Min	1.671.733	1.672.034	1.672.219
Q1 (25%)	1.672.324	1.672.445	1.672.472
Median (50%)	1.672.554	1.672.540	1.672.539
Q3 (75%)	1.672.791	1.672.633	1.672.616
Max	1.673.461	1.673.058	1.672.887
CV (%)	0,0199	0,0083	0,0067

Độ lệch chuẩn sau lọc giảm hơn 62%, CV (%) giảm từ 0,0199 xuống 0,0067, thể hiện tín hiệu trở nên ổn định và tin cậy hơn.

Độ trễ của chuỗi lọc được xác định khoảng ~104 ms, nằm trong giới hạn yêu cầu của cân băng tải công nghiệp.

4.4. Phân tích chất lượng tín hiệu

Để đánh giá hiệu quả lọc tín hiệu, các chỉ số nâng cao được sử dụng (bảng 5).

Bảng 5. Đánh giá tổng hợp chất lượng tín hiệu sau lọc.

Chỉ số đánh giá	Raw	Median 7 mẫu	Median+EMA ($\alpha=0,3$)
Giảm nhiễu xung ($\sum \Delta y $)	380.392	150.146	120.348
Giảm nhiễu tần số thấp (Std)	333,11	139,53	111,63
Độ mượt (zigzag)	658	641	636 (mượt nhất)
Tương quan với r (với raw)	1,000	0,364	0,219

Chuỗi lọc Median+EMA mang lại độ mượt tốt nhất (zigzag giảm), loại bỏ nhiễu xung đến 68%, đồng thời vẫn duy trì đáp ứng thời gian thực.

4.5. Độ chính xác và thời gian đáp ứng của hệ thống cân

Hệ thống được so sánh với cân thương mại đã hiệu chuẩn, kết quả cho thấy sai số trung bình duy trì ở mức $\pm 1,2\%$ so với giá trị chuẩn, trong khi biến thiên tín hiệu trong 5 phút vận hành liên tục nhỏ hơn 0,5 kg. Về động học tín hiệu, sau khi áp dụng chuỗi lọc Median bậc 7 và EMA ($\alpha=0,3$), tín hiệu ổn định trong khoảng 275-300 ms kể từ khi xảy ra biến động tải trọng, trong đó độ trễ do

quá trình lọc chỉ khoảng ~104 ms. Khoảng thời gian này đáp ứng yêu cầu phản hồi kịp thời cho vận hành thực tế của cân băng tải công nghiệp.

Ngoài ra, hệ thống sử dụng tín hiệu từ cảm biến tốc độ để tính lưu lượng tức thời theo công thức:

$$Q(t) = m(t) \times v(t) \quad (8)$$

trong đó: $m(t)$ là khối lượng tức thời và $v(t)$ là tốc độ băng tải.

Tín hiệu tốc độ được lọc nhẹ bằng EMA với hệ số $\alpha=0,2$ nhằm loại bỏ dao động ngắn hạn, giảm sai lệch và đảm bảo độ ổn định của giá trị lưu lượng.

5. Kết luận

Giải pháp lọc kết hợp Median bậc 7 và EMA ($\alpha=0,3$) đã cải thiện rõ rệt độ ổn định và độ chính xác của tín hiệu cân băng tải công nghiệp, đồng thời đáp ứng yêu cầu thời gian thực và dễ triển khai trên phần cứng vi điều khiển STM32H743ZIT trong môi trường nhiễu cao.

Trong thời gian tới, nhóm nghiên cứu sẽ tập trung vào việc tối ưu thuật toán nhằm giảm hơn nữa độ trễ xử lý, nghiên cứu phần cứng hiệu năng cao nhưng tiết kiệm năng lượng, và mở rộng sang các thuật toán lọc thích nghi hoặc lai ghép để nâng cao khả năng chống nhiễu trong nhiều điều kiện vận hành khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Hernández (2006), "Improving the response of a load cell by using optimal filtering", *Sensors*, **6(7)**, pp.697-711, DOI: 10.3390/s6070697.
- [2] Í. Yabanova (2017), "Digital signal processing-based dynamic mass measurement system for egg weighing process", *Measurement & Control*, **50(4-5)**, pp.101-111, DOI: 10.1177/0020294017713768.
- [3] D. Richiedei, A. Moro, A. Padovani (2022), "Adaptive shaper-based filters for fast dynamic filtering of load cell measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **188**, DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.108541.
- [4] F. Liang, Q. Ou (2021), "Design of weighing system based on improved moving average filter algorithm", *Journal of Artificial Intelligence Practice*, **4**, pp.74-77, DOI: 10.23977/jaip.2020.040212.
- [5] B. Sun, Z. Teng, Q. Hu, et al. (2021), "A novel LMS-based self-adaptive noise cancellation (SANC) for conveyor belt-type checkweigher", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70(1)**, DOI: 10.1109/TIM.2020.3019618.

- [6] M. Meller, M. Niedźwiecki, P. Pietrzak (2014), "Adaptive filtering approach to dynamic weighing: A checkweigher case study", *Proceedings of The 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, pp.2355-2360, DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00395.

- [7] L. Xiong (2024), "Research on filtering algorithm of vehicle dynamic weighing signals", *World Electric Vehicle Journal*, **15(6)**, DOI: 10.3390/wevj15060254.

- [8] M. Pereira, E. Espindola, M. Pinto (2024), "Evaluation of different filtering methods devoted to magnetometer data denoising", *Electronics*, **13(11)**, DOI: 10.3390/electronics13112006.

- [9] Q. Zhang, L. Xu, J. Jia (2014), "100+ times faster weighted median filter", *Proceedings of The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.2830-2837, DOI: 10.1109/CVPR.2014.362.

- [10] S. Haykin (2014), *Adaptive Filter Theory*, Pearson Education, 889pp.

- [11] G. Welch, G. Bishop (2006), *An Introduction to The Kalman Filter*, University of North Carolina at Chapel Hill, 16pp.

- [12] STMicroelectronics (2023a), *STM32H742xI/G*, *STM32H743xI/G*, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743vi.pdf>, accessed 15 March 2025.

- [13] STMicroelectronics (2023b), *STM32Cube MCU Package for STM32H7 series (HAL, Low-Layer APIs and CMSIS, USB, TCP/IP, File System, RTOS, Graphic - and Examples Running on ST Boards)*, <https://www.st.com/en/embedded-software/stm32cube7.html>, accessed 15 March 2025.

- [14] STMicroelectronics (2024), *UM1718 User Manual*, https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00104712-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf, accessed 15 March 2025.

- [15] STMicroelectronics (2025), *UM2609 User manual*, https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf, accessed 15 March 2025.

- [16] Texas Instruments (2019), *ADS125H02 ±20-V Input, 2-Channel, 40-kSPS, 24-Bit, Delta-Sigma ADC With PGA and Voltage Reference*, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads125h02.pdf>, accessed 15 March 2025.

- [17] Texas Instruments (2023), *Digital Filter Types in Delta-Sigma ADCs*, <https://www.ti.com/lit/an/sbaa230a/sbaa230a.pdf>, accessed 15 March 2025.

- [18] Texas Instruments (2024), *Calculating Conversion Latency and System Cycle Time for Delta-Sigma ADCs*, <https://www.ti.com/lit/an/sbaa535a/sbaa535a.pdf>, accessed 15 March 2025.