Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Số chuyên đề: Công nghệ chiến lược - Động lực phát triển Đồng bằng sông Cửu Long (SDMD)
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.247

ĐỀ XUẤT KIẾN TRÚC VÀ MÔ PHỎNG NÚT CẢM BIẾN THÔNG MINH HỖ TRỢ QUY TRÌNH DMRV TẠI HỆ SINH THÁI CARBON XANH RỪNG NGẬP MẶN

Mai Hoàng Long*
Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Vĩnh Long, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): longmh@vlute.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 25/07/2026
Sửa bài (Revised): 26/08/2026
Duyệt đăng (Accepted): 11/11/2026

Title: *Proposed architecture and simulation of a smart sensor node supporting dMRV in mangrove blue-carbon ecosystems*

Author(s): *Mai Hoang Long**

Affiliation(s): *Vinh Long University of Technology Education, Viet Nam*

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đề xuất kiến trúc và đánh giá mô phỏng nút cảm biến thông minh tích hợp vi điều khiển ESP32 và LoRa P2P để thu thập dữ liệu môi trường bổ trợ cho quy trình đo lường, báo cáo, xác minh kỹ thuật số (dMRV) tại rừng ngập mặn. Thay vì chế tạo phần cứng truyền thống, điện toán biên đã được ứng dụng để thiết lập nền tảng dữ liệu minh bạch, được thiết kế theo hướng hỗ trợ các yêu cầu của dMRV. Kiến trúc thu thập thông số vật lý (áp suất thủy tĩnh, pH, độ dẫn điện) đóng vai trò như các chỉ báo môi trường hỗ trợ (environmental covariates) cho chu kỳ ngập nước (hydroperiod), làm tham chiếu đánh giá điều kiện sinh thái bảo tồn carbon. Thông qua mô phỏng bằng chứng khái niệm, thuật toán trung bình động hàm mũ nhúng tại biên cho thấy khả năng lọc nhiễu và tối ưu dung lượng gói tin. Kết quả bàn thử ghi nhận tỷ lệ nhận gói tin qua LoRa P2P đạt trên 92,4% ở cự ly 1.000 m, cùng mức tiêu thụ năng lượng lý thuyết thấp. Kiến trúc bước đầu tạo cơ sở cho việc đánh giá khả năng tích hợp vào hệ thống dMRV trong các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: *dMRV, điện toán biên, LoRa P2P, tín chỉ carbon*

ABSTRACT

This study proposes the architecture and evaluates the simulation of a smart sensor node integrating an ESP32 microcontroller and LoRa P2P to collect supplementary environmental data for the digital Measurement, Reporting, and Verification (dMRV) process in mangroves. Instead of traditional hardware manufacturing, this research applies edge computing to establish a transparent data platform designed to support dMRV requirements. The architecture collects physical parameters (hydrostatic pressure, pH, electrical conductivity) as environmental covariates to support the assessment of the hydroperiod related to carbon conservation. Through Proof-of-Concept simulation, the exponential moving average algorithm embedded at the edge demonstrates capabilities in noise filtering and payload optimization. Benchtop results record a LoRa P2P packet delivery ratio (PDR) exceeding 92.4% at a distance of 1,000 m, alongside low theoretical energy consumption. The architecture initially proves feasible in providing supplementary dMRV data, serving as a directional basis for future field and material trials.

Keywords: *Blue carbon, dMRV, Edge computing, LoRa P2P*

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh nỗ lực giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu toàn cầu, việc bảo vệ và phát triển các hệ sinh thái lưu trữ carbon đang trở thành ưu tiên hàng đầu. Rừng ngập mặn, với khả năng hấp thụ, chuyển hóa và lưu giữ lượng khí CO_2 khổng lồ (carbon xanh - blue carbon) vào trầm tích ven biển trong thời gian dài, đóng vai trò then chốt trong chu trình carbon toàn cầu và chiến lược tiến tới trung hòa carbon (Zhu & Yan, 2022). Tại Việt Nam, Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) là khu vực sở hữu diện tích rừng ngập mặn rộng lớn, mang lại cơ hội chiến lược không chỉ trong việc thích ứng với nước biển dâng mà còn tạo ra nguồn tài chính từ các quỹ khí hậu quốc tế. Tuy nhiên, rào cản lớn để thương mại hóa sinh thái này nằm ở khâu minh bạch hóa dữ liệu đo lường.

Để một dự án carbon xanh được công nhận và phát hành tín chỉ, các tổ chức quốc tế đòi hỏi sự tuân thủ nghiêm ngặt theo Hướng dẫn của Ủy ban Liên chính phủ về biến đổi khí hậu và các tiêu chuẩn khắt khe như Verified Carbon Standard của tổ chức Verra (2023). Các đánh giá sinh thái toàn cầu đã chứng minh sự phân bổ carbon trong rừng ngập mặn có sự chênh lệch rất đặc thù: chỉ khoảng 30% carbon được lưu giữ ở sinh khối trên mặt đất, trong khi hơn 70% (thậm chí lên tới 90% ở các rừng rậm) khối lượng carbon được bảo lưu dưới lòng đất trong hệ rễ và nền trầm tích (Donato et al., 2011; Alongi, 2014). Trong một kiến trúc Đo lường Báo cáo và Xác minh kỹ thuật số (digital Measurement, Reporting, and Verification-dMRV) toàn diện, nếu như phần sinh khối bề nổi thường được đo lường và lập bản đồ hiệu quả thông qua công nghệ viễn thám hoặc thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) thì việc bảo chứng cho phần lớn kho lưu trữ ngầm dưới nền trầm tích lại đòi hỏi một cơ chế giám sát tại chỗ khắt khe hơn. Cụ thể, để khối lượng carbon khổng lồ này không bị oxy hóa và phát thải ngược ra môi trường, hệ sinh thái nền đáy bắt buộc phải được duy trì ở trạng thái yếm khí. Đặc biệt, đối với hệ sinh thái rừng ngập mặn, kết quả nghiên cứu thực nghiệm hiện trường của Doodee et al. (2025) đã chứng minh rằng chế độ ngập triều và độ mặn là những yếu tố vật lý chi phối trực tiếp đến năng lực lưu trữ carbon hữu cơ trong trầm tích. Sự biến động của chu kỳ ngập nước thiết lập ranh giới các đới yếm khí, từ đó định hình cấu trúc mạng lưới vi sinh vật nền đáy và ức chế sự phân hủy carbon (Hou et al., 2024). Tuy nhiên, một thách thức lớn trong việc định giá carbon hiện nay là sự nhầm lẫn giữa việc chỉ sử dụng UAV đo lường tốc độ hấp thụ bề nổi mà bỏ qua việc giám sát năng lực lưu trữ thực tế dưới nền trầm tích (Körner, 2026). Điều này đòi hỏi một hệ thống đo lường, báo cáo và xác minh (measurement, reporting, and verification - MRV) liên tục. Khái niệm dMRV đã ra đời như một tiêu chuẩn số hóa tất yếu nhằm tích hợp đồng bộ cả dữ liệu viễn thám và dữ liệu cảm biến mặt đất để đáp ứng các bộ tiêu chí quốc tế này (World Bank, 2022; Gold Standard, 2023; Körner et al., 2025).

Mặc dù vậy, việc triển khai quy trình dMRV tại các khu vực rừng ngập mặn đang phải đối mặt với những rào cản kỹ thuật rất lớn. Các phương pháp thu thập mẫu thủ công truyền thống phụ thuộc vào con người thường dẫn đến sai số, đứt gãy dữ liệu thời gian thực và khó đáp ứng độ tin cậy đối với các tổ chức thẩm định quốc tế. Hơn nữa, đặc thù địa hình ngập nước phức tạp, tán rừng rậm rạp, cùng với sự thiếu vắng hạ tầng điện lưới khiến các trạm quan trắc thông thường gặp rào cản về suy hao năng lượng và băng thông truyền tải. Gần đây, việc dịch chuyển khối lượng tính toán xuống các thiết bị biên (Edge nodes) kết hợp với giao thức vô tuyến tầm xa LoRaWAN đã được chứng minh hiệu quả trong việc giảm thiểu áp lực truyền dẫn và duy trì tính ổn định của mạng lưới quan trắc môi trường diện rộng (Bicamumakuba et al., 2025).

Kế thừa các nền tảng kỹ thuật và sinh thái học nêu trên, nghiên cứu này được tiến hành nhằm đề xuất kiến trúc và đánh giá mô phỏng một nút cảm biến thông minh (Smart Sensor Node – SSN) đóng vai trò hỗ trợ thu thập dữ liệu môi trường bổ trợ cho quy trình dMRV. Tính mới của nghiên cứu không nằm ở việc phát minh ra điện toán biên hay trực tiếp đo lường lượng carbon, mà ở việc tiên phong đề xuất một khung kiến trúc chuyên biệt cho dMRV, sử dụng thông số vật lý làm chỉ báo sinh thái. Sự khác biệt của kiến trúc này so với các mô hình trạm quan trắc truyền thống được thể hiện qua ba khía cạnh:

● **Thứ nhất, về kiến trúc phần cứng:** Cấu hình đo lường tích hợp cảm biến áp suất thủy tĩnh, pH và độ dẫn điện được đề xuất. Các thông số này đóng vai trò như các chỉ báo môi trường hỗ trợ (environmental covariates) nhằm xác định chu kỳ ngập nước (hydroperiod) – một yếu tố tham chiếu trong việc đánh giá điều kiện sinh thái liên quan đến bảo tồn carbon.

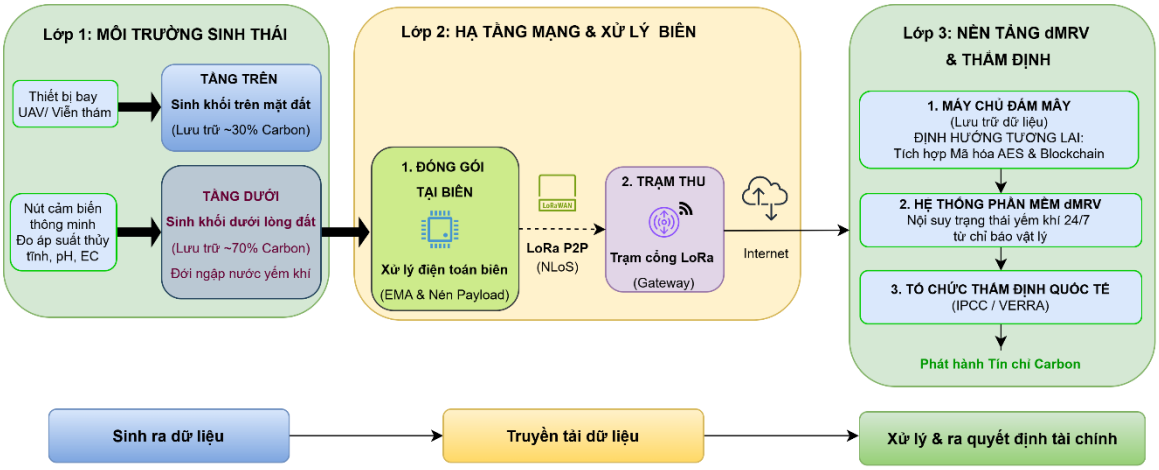
● **Thứ hai, về tối ưu hóa viễn thông và năng lượng:** Công nghệ điện toán biên được ứng dụng bằng cách đề xuất nhúng thuật toán trung bình động hàm mũ (exponential moving average - EMA) lên vi điều khiển ESP32. Việc mô phỏng lọc nhiễu tín hiệu và đóng gói dữ liệu tại chỗ kết hợp với giao thức

LoRa P2P cho thấy tiềm năng vượt qua rào cản lõm sóng dưới tán rừng và tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ.

• **Thứ ba, về định hướng ứng dụng:** Kiến trúc thiết bị được đề xuất được thiết kế theo hướng hỗ trợ các yêu cầu của quy trình dMRV và cung cấp dữ liệu môi trường bổ trợ cho các dự án tín chỉ carbon tại khu vực ĐBSCL trong tương lai.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để hiện thực hóa mục tiêu số hóa quy trình giám sát sinh thái, một kiến trúc tổng quát đặt nút biên thông minh đã được đề xuất làm trung tâm của hệ thống dMRV (Hình 1). Điểm mấu chốt của kiến trúc này nằm ở việc thiết bị không trực tiếp đo lường sinh khối carbon hoặc lượng phát thải – một nhiệm vụ nằm ngoài khả năng của các thiết bị IoT hiện trường – mà đóng vai trò thu thập các thông số vật lý và hóa học đặc trưng (áp suất thủy tĩnh, pH, độ dẫn điện). Dữ liệu này đóng vai trò như một bộ chỉ báo không gian thiết yếu, cung cấp dữ liệu môi trường nền tảng để hỗ trợ các mô hình ước lượng carbon và đối chiếu trạng thái yếm khí theo yêu cầu của quy trình dMRV.



Hình 1. Kiến trúc tổng thể hệ thống dMRV đề xuất, minh họa sự phân lớp dữ liệu và vai trò bổ trợ của nút cảm biến thông minh (SSN) trong việc giám sát chỉ báo yếm khí dưới lòng đất

2.1. Kiến trúc phần cứng đề xuất cho SSN

Để giải quyết bài toán giám sát liên tục trong môi trường khắc nghiệt không có điện lưới và sóng viễn thông truyền thống, một thiết kế kiến trúc phần cứng hoạt động độc lập đã được đề xuất làm nút mạng biên. Hệ thống bao gồm ba khối chức năng chính:

2.1.1. Khối thu thập dữ liệu

Giao tiếp với các cảm biến hóa lý đặc thù nhằm phác họa bức tranh sinh thái của rừng ngập mặn. Các thông số nền tảng bao gồm độ pH và độ dẫn điện (Electrical Conductivity - EC) để nội suy ra độ mặn. Đặc biệt, kiến trúc yêu cầu tích hợp cảm biến áp suất thủy tĩnh thả chìm ngầm để đo chiều cao cột nước. Trong sinh thái học đất ngập nước, áp suất thủy tĩnh là một thông số hỗ trợ đánh giá chế độ ngập nước (hydroperiod). Cần lưu ý rằng, chu kỳ ngập nước không đồng nghĩa trực tiếp với trạng thái yếm khí của trầm tích, do trạng thái oxy hóa - khử và khả năng lưu trữ carbon còn chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố phức tạp khác như tính chất trầm tích, hàm lượng khoáng, nhiệt độ và hoạt động vi sinh (Cooray et al., 2026). Do đó, các thông số áp suất thủy tĩnh, pH và EC trong nghiên cứu này được định vị là các chỉ báo môi trường hỗ trợ. Trong nghiên cứu thực địa tiếp theo, việc bổ sung các thông số đo thế oxy hóa - khử (ORP/Eh), lượng oxy hòa tan (DO) và đối chứng hàm lượng carbon hữu cơ trong đất (SOC/TOC) sẽ được thực hiện để thiết lập mối quan hệ định lượng đáng tin cậy. Do đó, thông số thủy tĩnh kết hợp cùng pH và EC tạo thành một bộ tham số đầu vào quan trọng cho các mô hình đánh giá dMRV.

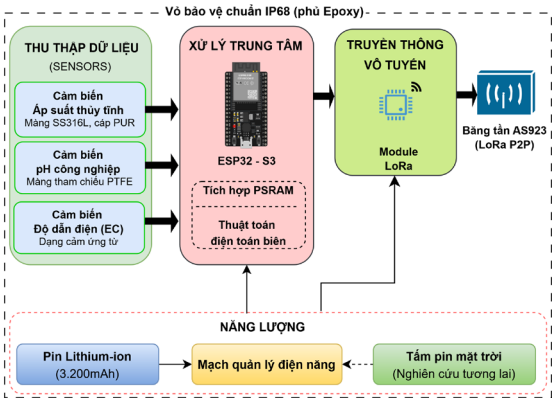
2.1.2. Khối xử lý trung tâm

Vi điều khiển họ ESP32 (cụ thể là dòng ESP32-S3 tích hợp PSRAM) đã được sử dụng. Đây là thành phần cốt lõi đóng vai trò thực thi các thuật toán lọc nhiễu tín hiệu và đóng gói dữ liệu (data packaging) tại chỗ.

2.1.3. Khối truyền thông vô tuyến và thiết kế vỏ bọc vật lý

Hệ thống tích hợp module LoRa (ví dụ: SX1262) hoạt động ở băng tần AS923, phù hợp với quy hoạch mạng LoRaWAN tại Việt Nam.

Để đảm bảo module viễn thông và vi điều khiển hoạt động ổn định trong điều kiện môi trường ngập nước, toàn bộ hệ thống mạch được đề xuất đặt trong một thiết kế vỏ bọc vật lý chuyên dụng. Cụ thể, nhằm hướng tới việc triển khai thực địa trong tương lai, các tiêu chuẩn vật liệu vật lý dành cho hệ thống cảm biến đã được đề xuất. Cụ thể, vi điều khiển trung tâm cần được bảo vệ trong vỏ hộp chuẩn IP68 phủ epoxy. Đối với hệ thống đầu dò, kiến trúc đề xuất sử dụng cảm biến độ dẫn điện dạng cảm ứng từ nhằm giảm thiểu hiện tượng ăn mòn điện hóa, cảm biến pH công nghiệp với màng tham chiếu PTFE chống tắc nghẽn và cảm biến áp suất thủy tĩnh với màng đo bằng thép không gỉ SS316L kết hợp cáp PUR chống đứt (Hình 2). Việc thử nghiệm độ bền của các cấu hình vật liệu này dưới tác động thực tế của sự ăn mòn và bám sinh học (biofouling) sẽ được hoạch định trong giai đoạn nghiên cứu thực địa tiếp theo.



Hình 2. Sơ đồ khối kiến trúc phần cứng thiết bị biên (SSN) với cấu hình cảm biến đặc thù và định hướng vật liệu bảo vệ chuẩn IP68

2.2. Thuật toán điện toán biên và đóng gói dữ liệu

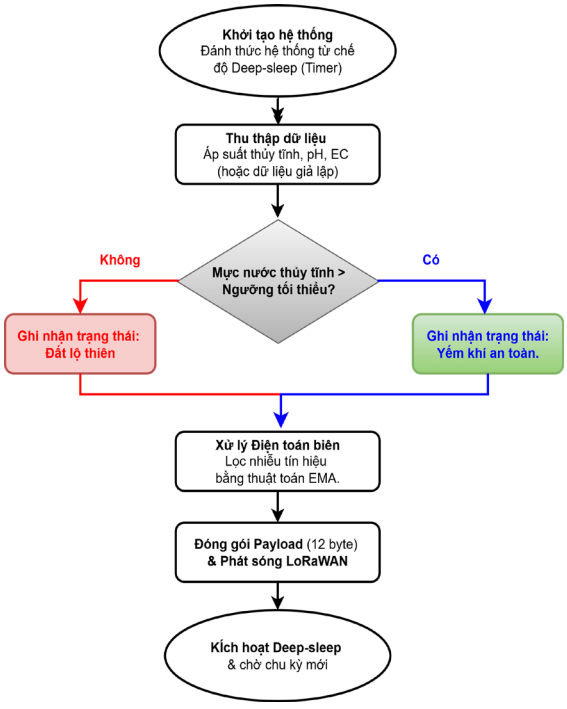
Trong các hệ thống đo lường truyền thống, dữ liệu thô thường chứa nhiều nhiễu do sự dao động của dòng chảy hoặc bọt khí. Việc truyền trực tiếp toàn bộ chuỗi dữ liệu thô này qua mạng vô tuyến không chỉ gây lãng phí băng thông mà còn tiêu hao năng lượng. Do đó, kỹ thuật điện toán biên được tùy biến bằng cách nhúng thuật toán Trung bình động hàm mũ (Exponential Moving Average - EMA) trực tiếp lên vi điều khiển ESP32 để làm mượt tín hiệu trước khi gửi (Hình 3). Thuật toán EMA được lựa chọn do đặc tính yêu cầu bộ nhớ tính toán cực thấp, phù hợp với vi điều khiển có tài nguyên hạn chế, được biểu diễn qua phương trình:

$$S_t = \alpha \cdot Y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} \quad (1)$$

Trong đó:

- S_t: giá trị tín hiệu đã được lọc nhiễu tại thời điểm t,
- Y_t: giá trị tín hiệu thô đọc từ cảm biến tại thời điểm t,
- S_{t-1}: giá trị tín hiệu đã lọc ở chu kỳ trước đó $(t-1)$,
- α: hệ số làm mượt $(0 < \alpha < 1)$.

Trong thiết lập mô phỏng của nghiên cứu này, tần số lấy mẫu (sampling frequency) được giả định ở mức 1 mẫu/phút. Dựa trên tính chất biến thiên tương đối chậm của môi trường nước ngập mặn, hệ số α được cấu hình tĩnh ở mức 0,2. Giá trị này ưu tiên triệt tiêu các xung nhiễu đột biến ngắn hạn, tuy nhiên tác giả ghi nhận rằng bộ lọc có thể gây ra độ trễ pha nhất định đối với các biến thiên thực sự của môi trường. Sau khi làm mượt tín hiệu bằng thuật toán EMA, để tối ưu băng thông truyền tải, hệ thống tiếp tục áp dụng cơ chế giảm tần số lấy mẫu (downsampling) và trích xuất giá trị đại diện. Chính quá trình tổng hợp và lấy mẫu thưa này giúp nén dung lượng gói tin (payload) xuống mức 12 byte.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán kiểm tra điều kiện ngập nước và mượt hóa tín hiệu bằng thuật toán trung bình động hàm mũ (EMA) tại biên

2.3. Thiết lập thực nghiệm mô phỏng

Do giới hạn của giai đoạn nghiên cứu đề xuất kiến trúc (Phase 1), thay vì đánh giá bằng cảm biến vật lý tại thực địa, bằng chứng khái niệm (Proof-of-Concept - PoC) được thiết lập dựa trên nền tảng mô phỏng bàn thử (benchtop test). Việc đánh giá được thực hiện tập trung vào luồng xử lý dữ liệu viễn thông và ước lượng năng lượng.

2.3.1. Đánh giá viễn thông

Trong nghiên cứu, việc lập trình vi điều khiển ESP32 sinh ra các chuỗi dữ liệu giả lập có chèn nhiễu trắng phi chuẩn được tiến hành nhằm kiểm tra khả năng thực thi thuật toán EMA. Dữ liệu mô phỏng dao động trong các ngưỡng sinh thái: Độ pH từ 6,5 đến 7,5; độ mặn từ 15 đến 30 ppt; độ dẫn điện từ 25 đến 45 mS/cm; áp suất thủy tĩnh biến thiên từ 0 đến 1,5 m.

Sau khi đóng gói, dữ liệu được truyền qua kết nối vô tuyến. Cần làm rõ rằng, trong khuôn khổ Bằng chứng khái niệm (PoC) ban đầu, kết nối vô tuyến mới chỉ được thiết lập mô phỏng và thử nghiệm theo cấu trúc truyền nhận điểm-điểm (LoRa P2P) thay vì một mạng LoRaWAN hoàn chỉnh tích hợp Gateway và Network Server. Các thông số vô tuyến được cấu hình chi tiết như sau: băng tần AS923, băng thông (Bandwidth) 125 kHz, hệ số lan truyền (SF) SF9, tỷ lệ mã hóa (Coding Rate) 4/5 và công suất phát (Tx Power) 14 dBm. Thông điệp được gửi dưới dạng bản tin không xác nhận (unconfirmed uplink message) để tối ưu năng lượng. Trạm thu cục bộ được thiết lập với anten đẳng hướng có độ lợi 3 dBi, đặt ở độ cao 2 mét so với mặt đất. Tại mỗi kịch bản khoảng cách và điều kiện vật cản, mô phỏng thực hiện lặp lại 3 lần đo, mỗi lần truyền liên tục 100 gói tin. Quá trình truyền tin được đánh giá thông qua tỷ lệ nhận gói tin thành công (PDR), chỉ số cường độ tín hiệu (RSSI) và tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR).

2.3.2. Đánh giá năng lượng

Thiết bị đo lường chuyên dụng được sử dụng để đo dòng điện tiêu thụ (I) thực tế của cụm bo mạch vi điều khiển ESP32 và module LoRa ở ba trạng thái hoạt động chính: ngủ sâu (Deep Sleep), đánh thức xử lý và phát sóng vô tuyến (Tx). Cần lưu ý, việc đánh giá này chỉ là ước lượng lý thuyết (theoretical estimation) dựa trên mức tiêu hao của khối xử lý trung tâm, chưa bao gồm dòng tiêu thụ thực tế của các đầu dò công nghiệp pH và EC vốn cần dòng khởi động lớn. Từ số liệu đo được, vòng đời hoạt động sơ bộ của nút biên được tính toán ngoại suy dựa trên dung lượng pin khả dụng.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiệu năng lọc nhiễu mô phỏng của điện toán biên

Thông qua việc nhúng thuật toán trung bình động hàm mũ trực tiếp lên vi điều khiển ESP32, kết quả mô phỏng cho thấy nút mạng biên có khả năng giảm thiểu hiệu quả các nhiễu động giả lập. Trong môi trường thực tế tại ĐBSCL, sự lên xuống của thủy triều và bọt khí lẫn trong bùn lầy rễ cây đước thường làm sai lệch cảm biến đo pH và độ mặn. Thuật toán EMA (với hệ số $\alpha = 0{,}2$) đã làm mượt chuỗi dữ liệu thô, loại bỏ phần lớn các xung nhiễu đột biến trước khi đóng gói. Việc xử lý tại biên giúp giảm thiểu dung lượng gói tin truyền đi xuống chỉ còn 12 byte cho mỗi chu kỳ đo, góp phần tối ưu hóa băng thông vô tuyến, qua đó đáp ứng nguyên tắc dữ liệu tinh gọn của quy trình dMRV.

Mặc dù EMA (với α cố định) được lựa chọn vì sự đơn giản và tiết kiệm tài nguyên bộ nhớ nhưng thuật toán này vẫn tồn tại những hạn chế nhất định. Cụ thể, nó có thể tạo ra độ trễ pha (phase delay) và làm phẳng các biến thiên thực sự của môi trường nếu thủy triều thay đổi quá đột ngột. Để vượt qua giới hạn của các bộ lọc tuyến tính truyền thống, xu hướng công nghệ hiện nay là tích hợp các mô hình học máy không giám sát (như thuật toán Isolation Forest) trực tiếp lên thiết bị biên nhằm tự động nhận diện và loại trừ các điểm dữ liệu bất thường (anomaly detection) với độ chính xác cao (Fahaad Almufareh et al., 2024). Đây là cơ sở quan trọng để nâng cấp phần sụn (firmware) của vi điều khiển ESP32 trong các phiên bản thiết kế tiếp theo, nhằm tự động phát hiện sớm các sự cố sai lệch đầu dò mà không cần can thiệp thủ công. Do giới hạn của nghiên cứu ở giai đoạn bằng chứng khái niệm (Phase 1) chưa có điều kiện thu thập bộ dữ liệu thô thực tế có nhiễu tại hiện trường, việc đánh giá định lượng hiệu quả lọc nhiễu (thông qua các chỉ số RMSE, MAE, SNR hoặc độ giảm phương sai) được triển khai chi tiết ở các nghiên cứu tiếp theo (Phase 2).

3.2. Độ tin cậy truyền tin LoRa P2P trong điều kiện mô phỏng cản trở

Đặc thù của rừng ngập mặn ĐBSCL là tán lá vô cùng rậm rạp và độ ẩm không khí rất cao, gây suy hao nghiêm trọng tín hiệu viễn thông. Để kiểm chứng khả năng vượt rào cản của giao thức LoRa P2P, thực nghiệm mô phỏng đã thiết lập các trạm phát có vật cản nhân tạo (bê tông, tán cây đa lớp) nhằm đánh giá tỷ lệ nhận gói tin thành công (PDR) và chỉ số cường độ tín hiệu nhận (RSSI).

Kết quả tại Bảng 1 cho thấy ngay cả trong điều kiện mô phỏng môi trường bị che khuất hoàn toàn (NLoS) ở khoảng cách 1.000 m, hệ thống vẫn duy trì tỷ lệ PDR đạt trên 92,4%. Sự đánh đổi giữa thời gian phát sóng của hệ số SF9 và độ nhạy thu cho thấy tiềm năng duy trì kết nối của kiến trúc so với các chuẩn giao tiếp di động truyền thống. Kết quả mô phỏng này hoàn toàn tương đồng với các thực nghiệm triển khai mạng LoRaWAN tích hợp điện toán biên trong môi trường nông nghiệp rậm rạp gần đây, vốn ghi nhận tỷ lệ mất gói tin (packet loss rate) luôn duy trì ở mức ổn định dưới 5% (Jabbar et al., 2024). Tuy nhiên, cần lưu ý rằng suy hao tín hiệu thực tế có thể phức tạp hơn rất nhiều do tác động của độ ẩm lá, mật độ cây và tình trạng nước phủ quanh thiết bị, do đó cần được kiểm chứng thêm thông qua các thực nghiệm hiện trường quy mô lớn.

Bảng 1. Tỷ lệ nhận gói tin LoRa P2P thành công theo điều kiện cản trở

Khoảng cách (m)	Điều kiện mô phỏng vật cản	Chỉ số RSSI (dBm)	Tỷ lệ PDR (%)
100	Trực diện, không vật cản (LoS)	-65	100
500	Xuyên tán cây thưa	-92	98,5
1.000	Xuyên vật cản đặc, đa lớp (NLoS)	-115	92,4

3.3. Ước lượng lý thuyết về tiêu thụ năng lượng

Khả năng "sống sót" độc lập không cần bảo trì là điều kiện quan trọng để cụm thiết bị được xem xét ứng dụng trong các dự án tín chỉ carbon tự nguyện. Cấu hình dòng điện tiêu thụ của mạch vi điều khiển và module vô tuyến được đo đạc và tổng hợp chi tiết bằng thiết bị đo chuyên dụng (Bảng 2).

Bảng 2. Cấu hình tiêu thụ năng lượng thực nghiệm của SSN

Trạng thái hoạt động	Dòng điện tiêu thụ (I)	Thời gian chu kỳ (t)
Ngủ sâu	12 µA	59 phút 50 giây
Thức dậy và đọc cảm biến	45 mA	5 giây
Lọc nhiễu	52 mA	2 giây
Phát sóng LoRa	115 mA	3 giây

Dòng điện tiêu thụ trung bình (I_{avg}) của khối điều khiển và vô tuyến được ước tính theo công thức:

$$I_{avg} = \frac{I_{active} \times T_{active} + I_{sleep} \times T_{sleep}}{T_{total}} \quad (2)$$

Dựa vào dữ liệu từ Bảng 2, mạch điều khiển dành hơn 99% thời gian trong trạng thái ngủ sâu. Giả định tần suất gửi dữ liệu là 1 lần/giờ, mức tiêu thụ dòng điện trung bình của cụm MCU và LoRa ước tính khoảng 0,2 mA. Với nguồn pin dung lượng 3.200 mAh, thời gian hoạt động lý thuyết có thể đạt trên 12 tháng. Tuy nhiên, cần nhấn mạnh đây thuần túy là ước lượng năng lượng lý thuyết cho cụm MCU-Radio (theoretical MCU-radio energy estimation). Thời gian hoạt động thực tế của toàn bộ nút cảm biến sẽ thấp hơn do chưa tính đến hao hụt từ hiệu suất chuyển đổi của bộ nguồn, dòng rò, sự tự phóng điện của pin, ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường và đặc biệt là mức tiêu thụ năng lượng lớn của các đầu dò pH và EC công nghiệp.

Vì vậy, tương tự như các mô hình trạm quan trắc tự hành hiện đại (Jabbar et al., 2024; Satyendra et al., 2026), cấu trúc thiết bị hoàn chỉnh trong tương lai cần được tích hợp thêm tấm pin năng lượng mặt trời (solar panel) cùng mạch quản lý điện năng để đảm bảo tính liên tục của chuỗi dữ liệu.

3.4. Tiềm năng hỗ trợ quy trình dMRV trong thị trường Carbon

Kết quả mô phỏng viễn thông và ước lượng năng lượng cho thấy kiến trúc SSN đề xuất có tính khả thi ban đầu để trở thành một thành phần phụ trợ đắc lực cho hệ thống dMRV. Thay vì các báo cáo đánh giá sinh thái được lập thủ công tiềm ẩn nhiều rủi ro đứt gãy số liệu, nút biên này cung cấp một cơ chế thu thập chỉ báo yếm khí liên tục 24/7. Việc xử lý tín hiệu và đóng gói ngay tại biên giúp giảm thiểu đáng kể rủi ro can thiệp vật lý tại hiện trường.

Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng bản thân thuật toán EMA và giao thức LoRa P2P không tự động đảm bảo tính bất biến (immutability) hay tính pháp lý của dữ liệu. Để xây dựng một hệ thống dMRV hoàn chỉnh và ngăn chặn rủi ro thao túng số liệu trên máy chủ lưu trữ, kiến trúc phần mềm trong tương lai bắt buộc phải được nâng cấp các cơ chế mã hóa tiên tiến như chuẩn AES-128 kết hợp với nền tảng chuỗi khối (blockchain) – vốn đã được chứng minh hiệu quả trong việc loại bỏ khâu trung gian, xây dựng nền tảng giám sát dMRV minh bạch, tin cậy, không thể giả mạo và hỗ trợ kết nối trực tiếp với thị trường tín chỉ carbon (Woo et al., 2020; 2021).

Bên cạnh những ưu việt về mặt kỹ thuật, giá trị chiến lược của thiết kế SSN còn nằm ở khả năng tương thích và hỗ trợ đáp ứng các hành lang pháp lý mới nhất về thị trường carbon. Kế thừa nền tảng nguyên tắc giám sát từ Nghị định 06/2022/NĐ-CP (Chính phủ, 2022), Chính phủ (2026a) đã ban hành

Nghị định 29/2026/NĐ-CP tạo lập khung quản lý đối với sàn giao dịch các-bon trong nước. Đặc biệt, Nghị định 112/2026/NĐ-CP đã chính thức đưa hoạt động "giảm phát thải và tăng hấp thụ khí nhà kính đối với rừng ngập mặn" vào danh mục khuyến khích chuyển giao quốc tế (Chính phủ, 2026b). Sự hoàn thiện nhanh chóng của các khung pháp lý khắt khe nêu trên đòi hỏi nguồn dữ liệu đầu vào phục vụ giao dịch phải đạt độ minh bạch cao.

Với cách tiếp cận sử dụng các thông số vật lý để nội suy trạng thái ngập nước yếm khí, kiến trúc SSN thể hiện tiềm năng to lớn trong việc cung cấp dữ liệu môi trường bổ trợ. Kiến trúc này tạo cơ sở cho việc đánh giá khả năng tích hợp vào hệ thống dMRV trong các nghiên cứu tiếp theo, hỗ trợ các dự án carbon xanh tại ĐBSCL đáp ứng các tiêu chuẩn số hóa của các tổ chức kiểm định quốc tế (European Commission, 2018; Clean Energy Regulator, 2023), qua đó từng bước tham gia vào thị trường carbon trong nước và toàn cầu.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu được thực hiện đã hoàn thành việc đề xuất kiến trúc và đánh giá mô phỏng một nút cảm biến thông minh (SSN) hỗ trợ cung cấp dữ liệu môi trường bổ trợ cho hệ thống dMRV tại các hệ sinh thái rừng ngập mặn. Bằng chứng khái niệm (PoC) được thực hiện thông qua việc thiết lập luồng dữ liệu giả lập, nhúng thuật toán lọc EMA lên vi điều khiển ESP32, đóng gói dữ liệu và truyền tải qua giao thức LoRa P2P. Kết quả thử nghiệm trên bàn thử cùng với ước lượng lý thuyết về mức tiêu thụ năng lượng cho thấy tiềm năng của kiến trúc trong việc giảm thiểu rủi ro can thiệp vật lý và duy trì tính liên tục của chuỗi dữ liệu. Kiến trúc đề xuất bước đầu tạo nền tảng định hướng công nghệ, có tiềm năng hỗ trợ các dự án carbon xanh đáp ứng các yêu cầu số hóa dữ liệu, bám sát chủ trương Chuyển đổi số quốc gia và đóng góp vào mục tiêu phát thải ròng bằng "0" (Net Zero).

Trong thời gian tới, hướng nghiên cứu tiếp theo (Phase 2) sẽ tập trung vào việc chế tạo hoàn thiện cụm phần cứng vật lý với các vật liệu chống ăn mòn. Các thử nghiệm đánh giá độ bền (chống ngấm nước, bám sinh học) sẽ được tiến hành trong các bể nước có kiểm soát và đối chứng sự tương quan dữ liệu với các phương pháp phân tích chuẩn trong phòng thí nghiệm. Đồng thời, việc triển khai thực địa quy mô lớn tại ĐBSCL sẽ được thực hiện nhằm nâng cấp và tối ưu hóa các mô hình học máy tại biên (ví dụ: mô hình Isolation Forest như đã được kiểm chứng tính hiệu quả trong các mạng IoT nông nghiệp chính xác (Fahaad Almufareh et al., 2024)).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Alongi, D. M. (2014). Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forests. *Annual Review of Marine Science*, *6*(1), 195–219. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020

Bicamumakuba, E., Habineza, E., Samsuzzaman, Reza, M. N., & Chung, S.-O. (2025). IoT-enabled LoRaWAN gateway for monitoring and predicting spatial environmental parameters in smart greenhouses: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*, *7*(1), 28–46. https://doi.org/10.22765/PASTJ.20250003

Chính phủ. (2022). *Nghị định số 06/2022/NĐ-CP Quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-zôn.* https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Nghi-dinh-06-2022-ND-CP-giam-nhe-phat-thai-khi-nha-kinh-bao-ve-tang-o-zon-500057.aspx

Chính phủ. (2026a). *Nghị định số 29/2026/NĐ-CP Quy định Sàn giao dịch các-bon trong nước. https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Nghi-dinh-29-2026-ND-CP-quy-dinh-san-giao-dich-cac-bon-trong-nuoc.aspx*

Chính phủ. (2026b). *Nghị định số 112/2026/NĐ-CP về trao đổi quốc tế kết quả giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và tín chỉ các-bon.* https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Nghi-dinh-112-2026-ND-CP-trao-doi-quoc-te-ket-qua-giam-nhe-phat-thai.aspx

Clean Energy Regulator. (2023). *Digital tools and MRV for the Australian Carbon Credit Unit (ACCU) scheme.* Australian Government.

Cooray, I. G., Chalmers, G., & Chittleborough, D. (2026). Impact of soil legacy on soil organic carbon partitioning in mangrove wetlands: A density-based fractionation and X-ray photoelectron spectroscopy study. *Environmental Research*, *303*, 124729. https://doi.org/10.1016/j. envres.2026.124729

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, *4*(5), 293–297. https://doi.org/10.1038/ngeo1123

Doodee, M. D. D., Rughooputh, S. D. D. V., & Jawaheer, S. (2025). Mangrove biomass productivity and sediment carbon storage assessment at selected sites in Mauritius: The effect of tidal inundation, forest age and mineral availability. *Environmental Research*

Communications, *7*(1), 015037. https://doi.org/10.1088/2515-7620/adacac

European Commission. (2018). *Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2066 of 19 December 2018 on the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions.* Official Journal of the European Union, L 334, 1-93.

Fahaad Almufareh, M., Humayun, M., Ahmad, Z., & Khan, A. (2024). An Intelligent LoRaWAN-Based IoT Device for Monitoring and Control Solutions in Smart Farming Through Anomaly Detection Integrated With Unsupervised Machine Learning. *IEEE Access*, *12*, 119072–119086. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3450587

Gold Standard. (2023). *Digitising MRV: Guidelines for the application of digital technologies in carbon project certification.* Gold Standard Foundation.

Hou, N., Yang, X., Wang, W., Sardans, J., Yin, X., Jiang, F., Song, Z., Li, Z., Tian, J., Ding, X., Zhou, J., Tariq, A., & Peñuelas, J. (2024). Mangrove wetland recovery enhances soil carbon sequestration capacity of soil aggregates and microbial network stability in southeastern China. *Science of The Total Environment*, *951*, 175586. https://doi.org/10.1016/ j.scitotenv.2024.175586

Jabbar, W. A., Mei Ting, T., I. Hamidun, M. F., Che Kamarudin, A. H., Wu, W., Sultan, J., Alsewari, A. A., & Ali, M. A. H. (2024). Development of LoRaWAN-based IoT system for water quality monitoring in rural areas. *Expert Systems with Applications*, *242*, 122862. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122862

Körner, C. (2026). Conceptual pitfalls in the forest carbon debate: Comment solicited by Prof. Yiping (Rocky) Wu, 30 Aug. 2025, revised Dec. 2025. *Carbon Balance and Management*, *21*(1), 59. https://doi.org/10.1186/s13021-026-00412-w

Körner, M.-F., Leinauer, C., Ströher, T., & Strüker, J. (2025). Digital Measuring, Reporting, and Verification (dMRV) for Decarbonization. *Business & Information Systems Engineering*, *67*(5), 753–765. https://doi.org/10. 1007/s12599-025-00953-3

Satyendra, Asoria, S. K., & Vijay, R. (2026). Up-flow floating surface constructed wetland for municipal wastewater treatment: A novel approach. *Journal of Environmental Management*, *407*, 129856. https://doi.org/10.1016/j. jenvman.2026.129856

Verra. (2023). *Digital measurement, reporting, and verification (dMRV) concept and roadmap.* Verra Standard.

Woo, J., Kibert, C. J., Newman, R., Kachi, A. S. K., Fatima, R., & Tian, Y. (2020). A New Blockchain Digital MRV (Measurement, Reporting, and Verification) Architecture for Existing Building Energy Performance. *2020 2nd Conference on Blockchain Research & Applications for Innovative Networks and Services (BRAINS),* 222–226. https://doi.org/10.1109/BRAINS49436.2020.9223302

Woo, J., Fatima, R., Kibert, C. J., Newman, R. E., Tian, Y., & Srinivasan, R. S. (2021). Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*, *205*, 108199. https://doi.org/10.1016/ j.buildenv.2021.108199

World Bank. (2022). *Digitalizing measurement, reporting, and verification (dMRV) systems: A framework for climate markets.* World Bank Group.

Zhu, J.-J., & Yan, B. (2022). Blue carbon sink function and carbon neutrality potential of mangroves. *Science of The Total Environment*, *822*, 153438. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153438