

**QUẢN LÝ ĐỘI TÀU QUA ĐIỆN TOÁN BIÊN:
CƠ CHẾ ĐỒNG BỘ DỮ LIỆU BẤT ĐỒNG BỘ
MARITIME FLEET MANAGEMENT VIA EDGE COMPUTING:
AN ASYNCHRONOUS SYNCHRONIZATION APPROACH
VŨ ĐỨC TÌNH¹, BÙI TRUNG HIỆU¹, BÙI VIỆT HOÀNG¹, TRẦN ANH KHÔI²
LÊ QUYẾT TIẾN³, PHẠM TRUNG MINH^{3*}**

¹Sinh viên Viện Đào tạo Chất lượng cao, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Trường Công nghệ thông tin và Truyền thông, Đại học Bách Khoa Hà Nội

³Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: minhpt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1092>

Tóm tắt

Trong lĩnh vực hàng hải, truyền dữ liệu giữa tàu và bờ chủ yếu dựa vào hệ thống vệ tinh (Very Small Aperture Terminal - VSAT), vốn có chi phí cao, độ trễ lớn và tính ổn định hạn chế. Bài báo đề xuất kiến trúc điện toán biên tàu - bờ, trong đó dữ liệu được xử lý và lưu trữ cục bộ trên tàu, sau đó đồng bộ dữ liệu bất đồng bộ về trung tâm khi điều kiện mạng cho phép. Cơ chế đồng bộ được triển khai theo mô hình lưu trước rồi chuyển tiếp sau, với hàng đợi cục bộ ở phía tàu và hàng đợi phát ra ở phía bờ. Hệ thống đồng thời tích hợp các thành phần bảo đảm độ tin cậy như xử lý theo lô, thử lại có kiểm soát, chống xử lý lặp, xác nhận đã nhận dữ liệu và theo dõi trạng thái nút. Giải pháp được triển khai và kiểm thử trên các mạng LAN, 4G và VSAT. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống duy trì tỷ lệ đồng bộ thành công cao, hoạt động ổn định trong điều kiện mạng có độ trễ lớn và phù hợp với môi trường hàng hải có băng thông hạn chế, kết nối gián đoạn. Kết quả này cho thấy tính khả thi của kiến trúc đề xuất đối với các hệ thống quản lý tàu - bờ trong thực tế.

Từ khóa: Điện toán biên hàng hải, đồng bộ dữ liệu bất đồng bộ, tàu - bờ, VSAT, độ tin cậy.

Abstract

In maritime operations, ship-to-shore data transmission relies mainly on (Very Small Aperture Terminal - VSAT) satellite links, which are costly, high-latency, and unstable. This paper proposes a maritime Shore-Edge computing architecture in which data is processed and stored locally on board, then asynchronously synchronized to the shore center when network conditions allow. The synchronization mechanism follows a store-and-

forward model, using a local queue on the vessel and an outbox on the shore side. To improve reliability, the system integrates batch processing, controlled retry, idempotency, acknowledgement, and node-status monitoring. The proposed solution was implemented and evaluated under LAN, 4G, and VSAT network profiles. Experimental results show a high synchronization success rate and stable operation under high-latency conditions, demonstrating suitability for maritime environments with constrained bandwidth and intermittent connectivity. These findings confirm the feasibility of the proposed architecture for practical ship-to-shore management systems.

Keywords: Maritime edge computing, asynchronous data synchronization, ship-to-shore systems, VSAT, reliability.

1. Mở đầu

Ngành hàng hải đang trải qua quá trình chuyển đổi số mạnh mẽ với sự phát triển của các hệ thống Internet vạn vật hàng hải (Maritime Internet of Things), trí tuệ nhân tạo và các nền tảng phân tích dữ liệu [1]. Các công nghệ này tạo ra khối lượng dữ liệu lớn phục vụ cho giám sát vận hành, điều hướng và quản lý đội tàu theo thời gian thực. Tuy nhiên, việc triển khai các hệ thống xử lý dữ liệu tập trung dựa trên điện toán đám mây trong môi trường hàng hải còn gặp nhiều hạn chế do phụ thuộc vào hạ tầng truyền thông vệ tinh.

Trong thực tế, kết nối giữa tàu và bờ chủ yếu dựa trên các hệ thống vệ tinh như VSAT, vốn có độ trễ cao, băng thông hạn chế và chi phí vận hành lớn [2]. Điều này gây khó khăn cho các ứng dụng yêu cầu phản hồi nhanh hoặc truyền tải dữ liệu liên tục. Khi toàn bộ dữ liệu được gửi trực tiếp về đám mây để xử lý, hệ thống dễ gặp tình trạng tắc nghẽn băng thông, gián đoạn kết nối và làm giảm hiệu quả vận hành tổng thể.

Điện toán biên (Edge Computing) được xem là một hướng tiếp cận phù hợp nhằm khắc phục các hạn chế trên bằng cách đưa năng lực xử lý và lưu trữ đến gần nguồn dữ liệu hơn [3], chẳng hạn như tại các nút trên tàu hoặc các trạm ven bờ. Kiến trúc này giúp giảm độ trễ, tiết kiệm băng thông và nâng cao tính liên tục của dịch vụ, đặc biệt trong các điều kiện kết nối không ổn định [4].

Bên cạnh đó, nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến cho phép hệ thống tiếp tục hoạt động ngay cả khi mất kết nối mạng, bằng cách xử lý và lưu trữ dữ liệu cục bộ trước khi thực hiện đồng bộ khi điều kiện cho phép. Kết hợp với cơ chế đồng bộ dữ liệu bất đồng bộ, hệ thống có thể giảm sự phụ thuộc vào kết nối thời gian thực, đồng thời đảm bảo tính nhất quán dữ liệu giữa các thành phần [5].

Trên cơ sở đó, bài báo này đề xuất một kiến trúc điện toán biên theo mô hình xử lý phân tán cho hệ thống quản lý đội tàu [6]. Trong kiến trúc đề xuất, dữ liệu được xử lý và lưu trữ tại lớp biên trên tàu, sau đó được đồng bộ bất đồng bộ về lớp trung tâm thông qua cơ chế hàng đợi ưu tiên và mô hình lưu trữ và chuyển tiếp (store-and-forward). Ngoài ra, nghiên cứu còn tích hợp các kỹ thuật tối ưu như đồng bộ phần bù và cơ chế thử lại thích ứng nhằm giảm chi phí truyền tải trong môi trường mạng có độ trễ cao.

Đóng góp chính của bài báo bao gồm:

Thứ nhất, đề xuất kiến trúc xử lý phân tán Tàu - Bờ kết hợp nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến cho quản lý đội tàu.

Thứ hai, thiết kế cơ chế đồng bộ dữ liệu bất đồng bộ với hàng đợi ưu tiên và chiến lược thử lại thích ứng.

Thứ ba, xây dựng và đánh giá hệ thống trên các điều kiện mạng khác nhau nhằm chứng minh tính hiệu quả và khả thi của giải pháp.

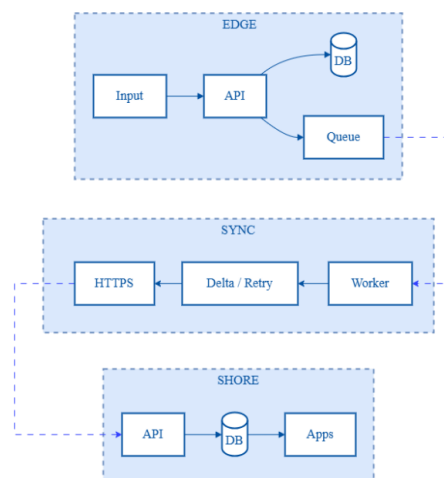
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Kiến trúc xử lý phân tán Tàu - Bờ

Hệ thống được thiết kế theo mô hình kiến trúc xử lý phân tán được mô tả trong Hình 1, trong đó năng lực xử lý và lưu trữ được phân tán giữa các nút trên tàu (Edge) và trung tâm điều hành tại bờ (Shore) [6]. Lớp Edge chịu trách nhiệm thu thập, xử lý và lưu trữ dữ liệu cục bộ phục vụ các nghiệp vụ vận hành, trong khi lớp Shore đảm nhiệm việc tổng hợp, giám sát và quản lý tập trung đội tàu.

Trong kiến trúc đề xuất, dữ liệu được xử lý trực tiếp tại tàu thay vì truyền toàn bộ về trung tâm. Điều này giúp giảm độ trễ xử lý và hạn chế phụ thuộc vào kết nối mạng vệ tinh. Khi điều kiện mạng cho phép,

dữ liệu được đồng bộ từ Edge về Shore thông qua cơ chế bất đồng bộ.

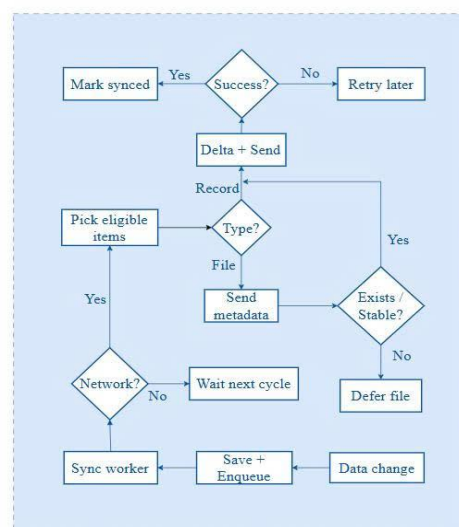


Hình 1. Kiến trúc tổng thể Shore-Edge của hệ thống quản lý tàu biển

2.2. Cơ chế đồng bộ dữ liệu bất đồng bộ

Hệ thống áp dụng nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến, trong đó mọi dữ liệu phát sinh tại tàu được lưu trữ trước trong cơ sở dữ liệu cục bộ [5]. Quá trình đồng bộ được thực hiện bất đồng bộ thông qua mô hình store-and-forward, cho phép tách biệt giữa xử lý nghiệp vụ và truyền tải dữ liệu.

Mỗi thay đổi dữ liệu được ghi nhận dưới dạng một phần tử trong hàng đợi đồng bộ (SyncQueue) như trong Hình 2. Các phần tử này chứa thông tin về loại dữ liệu, mức ưu tiên và trạng thái xử lý. Tiến trình nền sẽ lựa chọn các phần tử phù hợp để đồng bộ dựa trên điều kiện mạng và mức độ ưu tiên, đảm bảo các dữ liệu quan trọng được truyền trước.



Hình 2. Sơ đồ luồng xử lý của cơ chế SyncQueue

Để giảm tải băng thông, hệ thống sử dụng cơ chế đồng bộ chênh lệch, nghĩa là chỉ truyền phần dữ liệu thay đổi kể từ lần đồng bộ gần nhất [7]. Gọi D là toàn bộ dữ liệu và ΔD là tập dữ liệu thay đổi. Khi đồng bộ toàn phần, hệ thống phải truyền toàn bộ D , nên chi phí truyền tải tỷ lệ với kích thước của D , ký hiệu là $O(|D|)$. Trong khi đó, khi áp dụng đồng bộ chênh lệch, hệ thống chỉ cần truyền ΔD , nên chi phí truyền tải chỉ còn tỷ lệ với kích thước phần thay đổi, tức $O(|\Delta D|)$. Do trong đa số trường hợp thực tế, số dữ liệu thay đổi chỉ chiếm một phần nhỏ so với toàn bộ dữ liệu, nên $|\Delta D|$ nhỏ hơn nhiều so với $|D|$. Vì vậy, $O(|\Delta D|)$ nhỏ hơn đáng kể so với $O(|D|)$, từ đó giúp giảm lượng dữ liệu truyền đi và nâng cao hiệu quả sử dụng băng thông.

2.3. Cơ chế ưu tiên và thử lại thích ứng

Các phần tử trong hàng đợi được xử lý theo cơ chế ưu tiên nhiều mức, trong đó các dữ liệu quan trọng (ví dụ: Báo cáo vận hành hoặc cảnh báo) được truyền trước so với các dữ liệu ít quan trọng hơn. Cách tiếp cận này giúp hệ thống duy trì hoạt động ổn định trong điều kiện băng thông thấp.

Khi một yêu cầu đồng bộ thất bại, hệ thống áp dụng cơ chế thử lại với thời gian chờ tăng dần theo số lần thất bại theo công thức (1), trong đó $t_{wait}(n)$ là thời gian hệ thống phải chờ trước khi thực hiện lần thử lại thứ n (đơn vị: phút), n là thứ tự của lần thử lại sau khi yêu cầu thất bại ($n=1,2,3,\dots$), n^2 là hàm số bậc hai xác định tốc độ tăng trưởng của thời gian chờ, và ε_n là thành phần nhiễu ngẫu nhiên nhỏ được cộng vào mỗi lần chờ để tránh trùng pha thử lại giữa nhiều yêu cầu đồng bộ. Thời gian chờ được xác định theo hàm bậc hai nhằm hạn chế việc gửi lại liên tục trong điều kiện mạng kém, đồng thời tránh gây quá tải hệ thống [8].

$$t_{wait}(n) = n^2 + \varepsilon_n \text{ (phút)} \quad (1)$$

Dự án đã triển khai cơ chế thử lại (retry) và tiếp tục truyền (resume) cho quá trình truyền tệp (file transfer) khi kết nối bị gián đoạn, nhằm nâng cao độ tin cậy của đồng bộ tệp trong môi trường mạng không ổn định. Cụ thể, hệ thống sử dụng mô hình yêu cầu tạm hoãn (deferred request) để tạm dừng các yêu cầu truyền tệp chưa hoàn tất và thực hiện gửi lại vào thời điểm phù hợp, thay vì hủy bỏ toàn bộ tiến trình. Đồng thời, mỗi phiên truyền theo từng khối dữ liệu được gắn với một mã tiếp tục phiên (resume token) duy nhất, cho phép hai phía xác thực trạng thái phiên và tiếp tục truyền từ đúng vị trí trước đó sau khi kết nối được khôi phục. Trong quá trình này, dữ liệu nhận dở được ghi tạm vào tệp đệm trung gian (staging file), còn tiến độ

truyền được theo dõi thông qua chỉ số khối kế tiếp (next chunk index) và số byte đã ghi nhận (committed bytes), nhờ đó hệ thống không cần truyền lại toàn bộ tệp từ đầu. Cách tiếp cận này giúp giảm chi phí băng thông, hạn chế lặp lại dữ liệu không cần thiết và bảo đảm quá trình đồng bộ vẫn duy trì được tính liên tục và nhất quán ngay cả khi liên kết truyền thông bị ngắt tạm thời.

2.4. Tối ưu truyền tải tệp

Đối với dữ liệu dạng tệp, hệ thống sử dụng cơ chế đóng gói cùng với dữ liệu nghiệp vụ để đảm bảo tính nhất quán. Các tệp được mã hóa và truyền cùng bản ghi tương ứng, với kích thước giới hạn nhằm phù hợp với băng thông của mạng vệ tinh.

Ngoài ra, hệ thống áp dụng cơ chế ưu tiên siêu dữ liệu (metadata-first), trong đó chỉ thông tin mô tả tệp được truyền trước, còn nội dung tệp sẽ được đồng bộ khi cần thiết. Phương pháp này giúp giảm đáng kể tải trọng truyền tải ban đầu và tối ưu hóa việc sử dụng băng thông.

Đối với dữ liệu dạng tệp, tổng chi phí truyền tải không chỉ phụ thuộc vào kích thước nội dung tệp mà còn phụ thuộc vào việc có xảy ra truyền lại hay không. Gọi $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ là tập các tệp phát sinh tại Edge, chi phí truyền tệp theo phương pháp upload trực tiếp được tính bởi công thức (2), trong đó r_i là số lần truyền thực tế của tệp f_i bao gồm cả các lần retry.

$$C_{file}^{direct} = \sum_{i=1}^k (size(f_i) \cdot r_i) \quad (2)$$

Với cơ chế metadata-first kết hợp deferred file sync, chi phí được viết lại thành công thức (3), trong đó $size(m_i)$ là kích thước siêu dữ liệu đặc tả (metadata) của tệp i , còn h ($h \leq k$) là số tệp thực sự cần truyền tải nội dung sau khi kiểm tra trùng lặp và điều kiện mạng. Giá trị h càng nhỏ so với k chứng tỏ hiệu quả tiết kiệm của cơ chế đề xuất càng cao.

$$C_{file}^{proposed} = \sum_{i=1}^k size(m_i) + \sum_{j=1}^h (size(f_j) \cdot r_j) \quad (3)$$

Từ đó, tỷ lệ tiết kiệm chi phí đồng bộ tệp (η_f) được xác định bởi công thức (4)

$$\eta_f = \frac{(C_{file}^{direct} - C_{file}^{proposed})}{C_{file}^{direct}} \times 100\% \quad (4)$$

Trong cơ chế đồng bộ tệp của dự án, tính toán vẹn của tệp tin được xác nhận bằng cách tính giá trị băm SHA-256 cho nội dung tệp ở các thời điểm quan trọng như trước khi gửi, trong quá trình truyền theo từng khối dữ liệu và sau khi tệp được ghi hoàn tất tại phía

nhận, sau đó đối chiếu với giá trị băm kỳ vọng trong bản mô tả đồng bộ. Cách tiếp cận này cho phép phát hiện hiệu quả các trường hợp tệp bị thiếu dữ liệu, sai thứ tự khối, hỏng trong quá trình truyền hoặc bị thay đổi ngoài ý muốn. Về chi phí tính toán, SHA-256 có độ phức tạp tuyến tính theo kích thước dữ liệu, tức là thời gian băm tăng xấp xỉ theo kích thước tệp, nên trong thực tế chi phí này thường nhỏ hơn đáng kể so với chi phí truyền tệp qua mạng, đặc biệt trong các môi trường 4G hoặc VSAT có độ trễ và băng thông hạn chế. Về xác suất đụng chạm, do SHA-256 tạo ra đầu ra dài 256 bit, số lượng giá trị băm khả dĩ là 2256, nên xác suất hai tệp khác nhau cho cùng một giá trị băm là cực kỳ nhỏ gần như không đáng kể ở quy mô vận hành thông thường. Vì vậy, việc sử dụng SHA-256 trong đồng bộ tệp là một lựa chọn hợp lý, đạt được cân bằng tốt giữa hiệu quả tính toán và độ tin cậy trong kiểm tra toàn vẹn dữ liệu.

Bên cạnh đó, Mã băm còn được dùng để phát hiện trùng lặp. Nếu một tệp với cùng nội dung đã tồn tại ở phía Shore, hệ thống chỉ cập nhật tham chiếu siêu dữ liệu thay vì đồng bộ lại toàn bộ nội dung. Với các tệp có chỉnh sửa, hệ thống ưu tiên xác định phần thay đổi và nếu hạ tầng hỗ trợ, có thể đồng bộ theo khối thay vì truyền lại toàn bộ tệp.

2.5. Tính bảo mật của hệ thống

Trong phạm vi hiện tại, hệ thống đã triển khai một lớp bảo mật thực dụng cho kênh đồng bộ giữa thiết bị biên và trung tâm, tập trung vào xác thực nút và bảo vệ tính toàn vẹn dữ liệu trao đổi. Cụ thể, cơ chế đồng bộ có chữ ký số (Signed Sync) được áp dụng trên các luồng đồng bộ chính thông qua các thành phần như mã định danh nút (Node ID), dấu thời gian (Timestamp), số ngẫu nhiên dùng một lần (Nonce), phiên bản khóa (Key Version), giá trị băm nội dung (Content Hash) và chữ ký xác thực dựa trên mã kiểm tra thông điệp theo khóa HMAC (Hash-based Message Authentication Code) [9]. Nhờ đó, hệ thống có khả năng hỗ trợ phát hiện và ngăn chặn các rủi ro như giả mạo nút, phát lại bản tin và sửa đổi dữ liệu truyền. Bên cạnh đó, hệ thống đã bổ sung cơ chế thu hồi nút (Revoke Node), khoảng chuyển tiếp khi xoay vòng khóa (Grace Window), phục hồi khóa (Rollback Key) và nhật ký kiểm toán Audit Log cho các sự kiện từ chối đồng bộ.

Ngoài ra, dự án có sử dụng dịch vụ Mã hóa dữ liệu dựa trên thuật toán Advanced Encryption Standard - Galois/Counter Mode (AES - GCM) là một thuật toán mã hoá đối xứng được sử dụng để bảo vệ tính toàn vẹn và bảo mật dữ liệu trong giao tiếp trực tuyến bao gồm

khóa đồng bộ giữa Edge và Shore cùng các tệp nghiệp vụ như ảnh đại diện, chứng chỉ và tài liệu thuyền viên. Dịch vụ này cung cấp đồng thời tính bí mật và tính toàn vẹn của dữ liệu nhờ cơ chế mã hóa có xác thực (Authenticated Encryption with Associated Data - AEAD), sử dụng số chỉ dùng một lần (Nonce), thẻ xác thực (Authentication tag và dữ liệu xác thực bổ sung (Additional Authenticated Data - AAD) để phát hiện mọi thay đổi trái phép.

Tuy nhiên, đối chiếu với các định hướng bảo mật hiện đại như mô hình không tin cậy tuyệt đối Zero Trust, xác thực đa nhân tố Multi Factor Authentication và xác thực hai chiều bằng chứng chỉ số Mutual Transport Layer Security (mTLS), dự án hiện mới dừng ở mức bảo vệ có trọng tâm cho bài toán đồng bộ dữ liệu tàu bờ, chưa mở rộng thành một kiến trúc bảo mật toàn diện cho toàn bộ hệ thống [10].

2.6. Môi trường triển khai và kiểm thử

Hệ thống được triển khai trên nền tảng môi trường độc lập và tách biệt (container) với các nút Edge (tàu) và Shore (bờ) hoạt động độc lập. Một lớp mô phỏng mạng được sử dụng để tái hiện các điều kiện truyền thông khác nhau, bao gồm mạng cục bộ (LAN), mạng di động (4G) và mạng vệ tinh (VSAT). Các tham số như độ trễ (Delay), sự biến đổi không đều về thời gian truyền tải (jitter) và băng thông (BW) được cấu hình theo Bảng 1 nhằm phản ánh đặc điểm thực tế của từng loại mạng.

Bảng 1. Tham số mạng LAN, 4G, VSAT

Metric	LAN	4G	VSAT
Type	Wired	Cellular	GEO
Delay (ms)	~0	23/22	345
RTT (ms)	<1	~45	~690
Jitter (ms)	~0	~6	42/43
BW	∞	∞	250 kbps

Bảng 1 sử dụng các tham số mạng tiêu biểu để mô phỏng ba mức điều kiện truyền thông khác nhau: tốt, trung bình và khó khăn. LAN được chọn làm môi trường chuẩn vì gần như lý tưởng, 4G đại diện cho mạng di động phổ biến trong thực tế, còn VSAT đại diện cho môi trường truyền thông ngoài khơi với độ trễ cao và băng thông hạn chế. Việc lựa chọn các giá trị này giúp đánh giá hệ thống đồng bộ trong những điều kiện gần với thực tế vận hành, từ đó cho thấy khả năng hoạt động của hệ thống khi chất lượng mạng thay đổi.

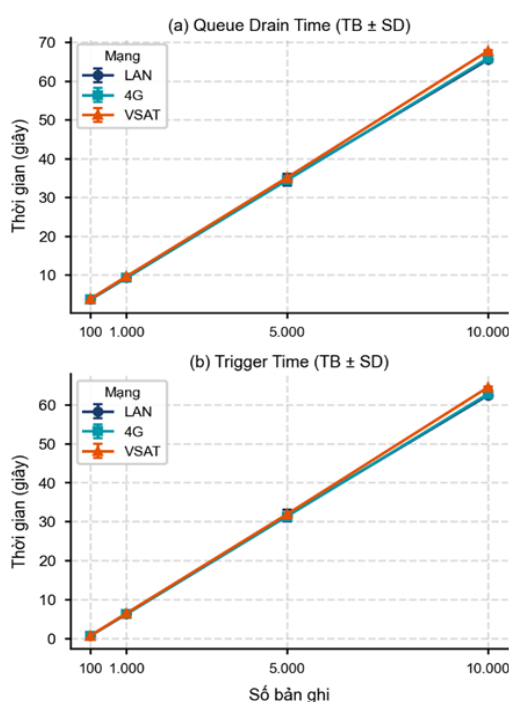
Các kịch bản thực nghiệm tập trung đánh giá ba khía cạnh chính: Thứ nhất là hiệu năng đồng bộ dữ

liệu, thứ hai là khả năng hoạt động trong điều kiện mạng gián đoạn, và cuối cùng là hiệu quả của các cơ chế tối ưu được đề xuất.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu năng đồng bộ dữ liệu

Kết quả thực nghiệm tại Hình 3 cho thấy hệ thống đạt tỷ lệ đồng bộ thành công tuyệt đối 100% trên tất cả các hồ sơ mạng (LAN, 4G, VSAT). Chỉ số Thời gian giải phóng hàng đợi (Queue Drain Time - Hình 3a) và Thời gian kích hoạt (Trigger Time - Hình 3b) đều tăng trưởng tuyến tính theo quy mô dữ liệu.



Hình 3. Queue Drain Time và Trigger Time theo quy mô dữ liệu và profile mạng (TB ± SD, n = 10/10/15 lần lặp)

Tại mức tải lớn nhất của thí nghiệm, tức 10.000 bản ghi, thời gian giải phóng hàng đợi đồng bộ chỉ dao động từ 65,5 giây trên mạng LAN đến 67,7 giây trên mạng VSAT. Chênh lệch tuyệt đối giữa hai điều kiện mạng tốt nhất và kém nhất chỉ vào khoảng 2,2 giây, tương ứng mức sai khác tương đối dưới 3,5%. Đây là một kết quả đáng chú ý, bởi về mặt đặc tính truyền thông, mạng VSAT có độ trễ lớn hơn rất nhiều so với LAN và thường được xem là môi trường bất lợi cho các hệ thống phụ thuộc vào trao đổi dữ liệu thời gian thực. Tuy nhiên, kết quả đo được cho thấy khi khối lượng dữ liệu tăng lên rất lớn, hiệu năng tổng thể của quá trình đồng bộ không còn bị chi phối chủ yếu bởi điều kiện mạng, mà chủ yếu phụ thuộc vào năng lực

xử lý hàng đợi, gom lô dữ liệu và thực thi tác vụ đồng bộ trong hệ thống.

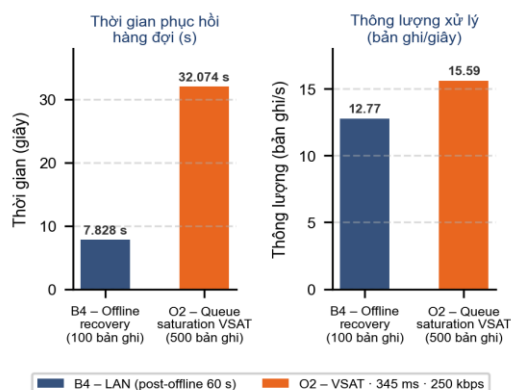
Việc các đường biểu đồ của ba loại mạng gần như chồng khít lên nhau cho thấy cơ chế hàng đợi đồng bộ SyncQueue đã phát huy đúng vai trò kiến trúc của nó. Cụ thể, thay vì để thao tác nghiệp vụ tại nút biên phụ thuộc trực tiếp vào thời gian phản hồi của kết nối mạng, hệ thống tách quá trình ghi nhận thay đổi ra khỏi quá trình truyền dữ liệu về phía Shore. Các thay đổi được đưa vào hàng đợi cục bộ trước, sau đó được xử lý bất đồng bộ theo lô, nhờ vậy độ trễ mạng chỉ còn ảnh hưởng hạn chế đến giai đoạn vận chuyển dữ liệu, chứ không tác động trực tiếp đến luồng xử lý nghiệp vụ mà người dùng đang thao tác. Nói cách khác, cơ chế này đã cô lập tương đối hiệu quả giữa lớp nghiệp vụ và lớp truyền thông, giúp hệ thống duy trì hành vi ổn định ngay cả khi điều kiện kết nối thay đổi mạnh.

Từ góc độ ứng dụng thực tiễn, kết quả này có ý nghĩa quan trọng đối với môi trường hàng hải, nơi chất lượng kết nối thường không ổn định và có thể thay đổi đáng kể giữa các vùng hoạt động. Nếu không có cơ chế đệm và xử lý theo hàng đợi, độ trễ cao của mạng vệ tinh sẽ dễ làm chậm toàn bộ vòng đời đồng bộ, thậm chí ảnh hưởng trực tiếp đến cảm nhận sử dụng của người dùng tại tàu. Ngược lại, kết quả thực nghiệm cho thấy với thiết kế hiện tại, hệ thống vẫn giữ được thời gian giải phóng hàng đợi gần tương đương giữa LAN, 4G và VSAT, qua đó chứng minh giải pháp có khả năng thích nghi tốt với môi trường mạng bất lợi. Điều này củng cố nhận định rằng kiến trúc đồng bộ dựa trên hàng đợi là phù hợp cho các bài toán điện toán biên hàng hải, nơi yêu cầu quan trọng không chỉ là đồng bộ thành công, mà còn là duy trì tính ổn định và khả năng sử dụng của hệ thống trong điều kiện kết nối hạn chế.

3.2. Khả năng hoạt động trong điều kiện mạng gián đoạn

Trong các kịch bản mô phỏng gián đoạn kết nối, hệ thống vẫn duy trì được tính ổn định nhờ nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến, theo đó dữ liệu phát sinh tại nút biên được lưu trữ cục bộ và chỉ được đồng bộ khi kết nối được khôi phục. Kết quả thực nghiệm ở kịch bản kiểm chứng tính nhất quán cuối cùng sau ngắt kết nối cho thấy, sau khi đường truyền bị cắt hoàn toàn trong 60 giây, hệ thống chỉ cần 7,828 giây để đồng bộ lại 100 bản ghi tồn đọng và đưa dữ liệu về trạng thái nhất quán. Kết quả này cho thấy cơ chế phục hồi sau gián đoạn hoạt động hiệu quả, đồng thời bảo đảm rằng sự cố kết nối tạm thời không làm gián đoạn quá trình ghi nhận dữ liệu tại phía biên.

Bên cạnh đó, kịch bản kiểm chứng bão hòa hàng đợi trong điều kiện mạng VSAT với 500 bản ghi tồn đọng, độ trễ 345ms và băng thông 250kbps, cho thấy hệ thống vẫn hoàn thành việc giải phóng hàng đợi trong 32,074 giây, tương ứng thông lượng xử lý ổn định khoảng 15 bản ghi/giây. Kết quả này cho thấy ngay cả trong điều kiện truyền dẫn bất lợi, hệ thống vẫn duy trì được năng lực xử lý đồng bộ ở mức chấp nhận được, không xuất hiện hiện tượng suy giảm hiệu năng đột ngột khi khối lượng dữ liệu chờ đồng bộ tăng cao.



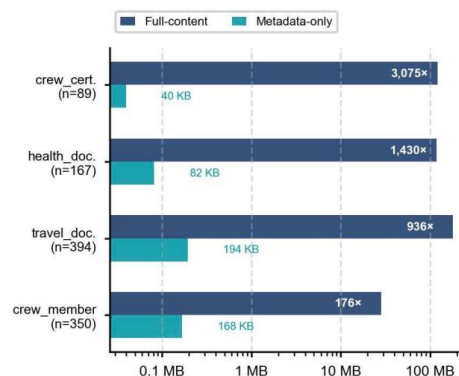
Hình 4. Thời gian phục hồi hàng đợi và thông lượng xử lý theo kịch bản mạng gián đoạn

Hình 4 trình bày so sánh trực quan giữa hai kịch bản tiêu biểu, gồm B4 là phục hồi sau gián đoạn kết nối với 100 bản ghi tồn đọng trên mạng LAN, và O2 là bão hòa hàng đợi trong điều kiện mạng VSAT. Hai kịch bản này được đánh giá theo hai chỉ số chính là thời gian phục hồi hàng đợi và thông lượng xử lý thực tế. Kết quả cho thấy mặc dù tải trọng trong kịch bản O2 lớn gấp 5 lần so với B4, thông lượng xử lý vẫn được duy trì ở mức tương đối tương đồng, dao động khoảng 12,77 đến 15,59 bản ghi/giây. Đồng thời, thời gian phục hồi hàng đợi tăng theo quy mô dữ liệu nhưng không kéo theo sự suy giảm đáng kể về hiệu suất xử lý tổng thể.

Những quan sát này cung cấp cơ sở thực nghiệm để khẳng định hiệu quả của mô hình lưu trữ và chuyển tiếp, trong đó hệ thống hấp thụ tải tăng đột biến thông qua cơ chế hàng đợi mà không làm gián đoạn luồng xử lý nghiệp vụ chính. Nhờ đó, dữ liệu không bị thất thoát trong thời gian mất kết nối, đồng thời hệ thống vẫn có khả năng đạt được trạng thái nhất quán cuối cùng ngay cả khi băng thông bị giới hạn nghiêm ngặt. Kết quả này đặc biệt có ý nghĩa đối với môi trường hàng hải, nơi gián đoạn kết nối và chất lượng truyền thông không ổn định là các điều kiện thường xuyên xảy ra.

3.3. Hiệu quả của các cơ chế tối ưu

Cơ chế đồng bộ phần bù, tức chỉ truyền phần dữ liệu thay đổi thay vì truyền lại toàn bộ nội dung, về mặt nguyên lý có tiềm năng làm giảm đáng kể khối lượng dữ liệu truyền tải. Tuy nhiên, trong phạm vi thực nghiệm của nghiên cứu này, hiệu quả được xác nhận rõ ràng nhất thuộc về cơ chế ưu tiên siêu dữ liệu, tức truyền thông tin mô tả trước nội dung tệp. Kết quả ở Hình 5 cho thấy việc tách biệt siêu dữ liệu giúp làm giảm tải trọng khởi tạo xuống mức rất thấp so với phương pháp truyền đầy đủ, và xu hướng này được thể hiện rõ trên thang đo logarit. Cụ thể, tổng tải trọng khởi tạo giảm từ 942,8 MB xuống còn 0,484 MB, tương ứng mức giảm 99,89%. Riêng đối với nhóm chứng chỉ thuyền viên, dung lượng truyền tải ban đầu giảm từ trên 100 MB xuống chỉ còn khoảng 40 KB. Kết quả này cho thấy hệ thống có thể nắm bắt trạng thái đồng bộ của số lượng lớn tệp mà chưa cần truyền ngay phần nội dung, qua đó giảm đáng kể mức sử dụng băng thông trên các liên kết truyền dẫn hạn chế.



Hình 5. So sánh payload khởi tạo: Full-content so với Metadata-only theo nhóm thực thể (corpus 1.000 tệp, thang logarithm)

Bảng 2. Kết quả của kịch bản đồng bộ tệp

Chỉ số đo lường	Kết quả
Dung lượng gốc (Byte)	1.023.525
Dung lượng sau xử lý (Byte)	943.138
Tỷ lệ giảm (%)	7,85
Thời gian kích hoạt (ms)	2.403,58

Bên cạnh các đánh giá về dữ liệu thô, các kịch bản thực nghiệm luồng tệp (file-flow) cũng cho thấy hiệu quả thực tế của các cơ chế tối ưu truyền tải, tiêu biểu là kết quả thu được từ Kịch bản F1: Đồng bộ tệp tin có áp dụng tiền xử lý nội dung. Như được trình bày chi tiết tại Bảng 2, tệp ảnh chứng chỉ trong kịch bản này đã được hệ thống tiền xử lý trước khi thực hiện

đồng bộ, dẫn đến việc giảm dung lượng từ 1.023.525 byte xuống còn 943.138 byte. Dữ liệu thực nghiệm xác nhận mức giảm này tương đương với 7,85% tổng dung lượng truyền tải, đồng thời ghi nhận thời gian kích hoạt đồng bộ chỉ mất 2.403,58ms. Kết quả này chứng minh rằng cơ chế tiền xử lý không chỉ góp phần tiết kiệm băng thông mà còn duy trì được tốc độ phản hồi tối ưu, phù hợp để triển khai trong các quy trình đồng bộ thực tế trên tàu.

3.4. Thảo luận

Các kết quả thực nghiệm cho thấy kiến trúc phân tán Tàu - Bờ kết hợp với nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến là một giải pháp phù hợp cho bài toán quản lý đội tàu trong môi trường hàng hải. Hệ thống duy trì được khả năng đồng bộ ổn định trên các cấu hình mạng LAN, 4G và VSAT, đồng thời bảo đảm tính toàn vẹn dữ liệu thông qua cơ chế xác minh bằng cách kiểm tra hàm băm SHA-256 và truyền tệp theo khối dữ liệu khi cần thiết. Bên cạnh đó, các cơ chế tối ưu truyền tải cũng cho thấy hiệu quả thực tế, như tiền xử lý tập tin giúp giảm dung lượng tệp trước khi truyền, và chiến lược ưu tiên truyền siêu dữ liệu trước nội dung giúp giảm đáng kể lưu lượng cần gửi ngay trong điều kiện mạng hạn chế.

Tuy nhiên, một số giới hạn vẫn cần được ghi nhận. Môi trường thực nghiệm hiện nay chủ yếu mô phỏng độ trễ, độ dao động trễ, băng thông và timeout thông qua Toxiproxy và chưa lượng hóa đầy đủ nguy cơ phát sinh độ trễ thêm khi SyncQueue trong bối cảnh mạng lưới vệ tinh độ cao thấp có độ trễ nhỏ, nên chưa phản ánh đầy đủ các hiện tượng thực tế như mất gói kéo dài hoặc nhiễu tín hiệu phức tạp trên biển. Cần phải giảm thời gian chờ trong hàng đợi ở mức phân vị 95% cho metadata nhưng vẫn giữ nguyên các thuộc tính tin cậy cốt lõi của SyncQueue. Khi chuyển sang mạng lưới vệ tinh độ cao thấp, SyncQueue không bị loại bỏ mà được tái cấu hình để cân bằng giữa độ trễ và độ tin cậy. Ngoài ra, đối với đồng bộ phân bù ở mức tệp, kết quả hiện tại mới xác nhận hệ thống truyền tệp thành công theo cơ chế truyền dự phòng đầy đủ tệp và truyền theo khối dữ liệu, chưa chứng minh đầy đủ được quá trình truyền các khối thay đổi thực sự và hệ thống mới chỉ được thiết kế và tối ưu chủ yếu cho đồng bộ bản ghi dữ liệu có kích thước nhỏ (mức Byte đến Kb), tập trung vào tính nhất quán giao dịch, có kiểm soát và độ tin cậy vận hành do đó chưa phải là một thiết kế chuyên biệt cho bài toán đồng bộ file vật lý dung lượng lớn (vài chục MB trở lên). Do đó, đây là nội dung cần tiếp tục được mở rộng và kiểm chứng sâu hơn trong các phiên bản tiếp theo.

Nhìn chung, kết quả thực nghiệm đã chứng minh được tính khả thi của giải pháp đề xuất cả ở góc độ đồng bộ dữ liệu, độ tin cậy truyền tệp và tối ưu sử dụng băng thông trong môi trường mạng không ổn định, đồng thời tạo nền tảng cho việc phát triển các hệ thống điện toán biên trong lĩnh vực hàng hải.

Mục tiêu tiếp theo là triển khai thử nghiệm thực tế, bao gồm cài đặt hệ thống trên hạ tầng vận hành tàu và tổ chức đánh giá trong điều kiện khai thác thật. Bước này giúp bổ sung bằng chứng thực nghiệm ngoài môi trường mô phỏng, qua đó nâng cao đồng thời tính khoa học (độ tin cậy dữ liệu kiểm chứng) và tính thực tiễn (khả năng áp dụng vận hành).

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một kiến trúc điện toán biên theo mô hình kiến trúc xử lý phân tán kết hợp nguyên lý ưu tiên ngoại tuyến cho bài toán quản lý đội tàu trong môi trường hàng hải. Giải pháp cho phép xử lý và lưu trữ dữ liệu cục bộ tại tàu, đồng thời thực hiện đồng bộ bất đồng bộ về bờ khi điều kiện mạng cho phép, qua đó giảm sự phụ thuộc vào kết nối vệ tinh.

Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đạt tỷ lệ đồng bộ thành công cao và duy trì hiệu năng ổn định trong các điều kiện mạng khác nhau, bao gồm cả môi trường có độ trễ cao như VSAT. Các cơ chế tối ưu như đồng bộ delta, hàng đợi ưu tiên và metadata-first góp phần giảm đáng kể tải trọng truyền tải và nâng cao hiệu quả sử dụng băng thông.

Những kết quả này khẳng định tính khả thi của kiến trúc đề xuất trong các ứng dụng quản lý đội tàu thực tế. Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng theo hướng đánh giá trên môi trường triển khai thực địa, tối ưu hóa cơ chế đồng bộ đối với dữ liệu dạng tệp kích thước lớn và tích hợp các giải pháp bảo mật nâng cao cho hệ thống phân tán trong lĩnh vực hàng hải.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.209**, là một phần không tách rời của sản phẩm khoa học công nghệ thuộc nhiệm vụ mã số **RD75-26**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Xuan, S. & Li, L. (2020), *Maritime Internet of Things: Challenges and Opportunities*, IEEE Access, Vol.8, pp.53926-53934.
Doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981262.
- [2] Flood, J. (2024), *The Future of Maritime Connectivity - 2025 Edition*, London, UK: Valour Consultancy, Retrieved from

- <https://valourconsultancy.com/maritime/>
- [3] Xuan, S., Li, L. & Wang, X. (2024), *Edge Computing for Smart Maritime: A Systematic Literature Review*, IEEE Access, Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/10438925>
- [4] Yang, Y., Yang, Z. & Wang, R. (2022), *Edge Computing for Smart Ships: A Survey*, IEEE Access, Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9693356>
- [5] Kleppmann, M. (2017), *Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems*, O'Reilly Media, Retrieved from <https://www.oreilly.com/library/view/designing-data-intensive-applications/9781449373321/>
- [6] Zhou, Z. & Wang, X. (2022), *A Cloud-Shore-Ship Collaboration Framework for Smart Maritime Operations*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.18(12), pp.8980-8989. Doi: 10.1109/TII.2022.3144453.
- [7] Li, J. & Zhang, Y. (2019), *Efficient Differential Data Synchronization for Mobile Edge Computing*, IEEE Access, Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/8892494>
- [8] Pelusi, L., Passarella, A. & Conti, M. (2006), *Opportunistic Networking: Data Forwarding in Disconnected Mobile Ad Hoc Networks*, IEEE Communications Magazine, Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/4012803>
- [9] Tam, K. & Jones, K. (2019), *Cyber Security in the Maritime Industry: A Systematic Survey*, IEEE Access, Vol.7, pp.30854-30868. Doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900986.
- [10] Liu, B., Zhu, L. & Wang, S. (2023), *A Zero-Trust Security Framework for Maritime IoT Networks*, Sensors, Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/21/8765>

Ngày nhận bài:	29/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	13/04/2026
Ngày duyệt đăng:	14/04/2026