

HỆ THỐNG QUẢN LÝ HỌC TẬP ƯU TIÊN NGOẠI TUYẾN CHO ĐÀO TẠO THUYỀN VIÊN

AN OFFLINE-FIRST LEARNING MANAGEMENT SYSTEM
WITH ADAPTIVE STREAMING FOR MARITIME TRAINING
NGHIÊM THỊ MỸ LINH^{1*}, NGUYỄN MẠNH HÙNG¹, PHẠM THỊ MINH HỒNG¹,
NGUYỄN THÙY LINH¹, PHẠM TRUNG MINH², LÊ QUYẾT TIẾN²

¹Sinh viên Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: linh95937@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1093>

Tóm tắt

Đào tạo thuyền viên trên biển thông qua hệ thống quản lý học tập trực tuyến đối mặt với ba rào cản: độ trễ vệ tinh tương đối cao (thường 500-800 ms), tỷ lệ mất gói tin lớn (có thể lên tới 80% khi thời tiết xấu), và chi phí băng thông cao (5-10 USD/GB). Nghiên cứu này đề xuất kiến trúc ba lớp ưu tiên ngoại tuyến, kết hợp ứng dụng web tiến bộ với thuật toán truyền phát thích ứng và bộ nhớ đệm đa tầng. Hệ thống tự động tải trước nội dung khi tàu cập cảng và phục vụ ngoại tuyến trên biển. Kết quả kiểm thử cho thấy phần phục vụ duy trì thời gian phản hồi phân vị thứ 95-95% yêu cầu được xử lý nhanh hơn ngưỡng này - dưới 78 ms ở mức 500 người dùng đồng thời, tỷ lệ trùng bộ nhớ đệm đạt trên 98%, thời gian khởi tạo video từ bộ đệm chỉ 0,2 giây, và kỹ thuật lưu đệm video không chiếm RAM (bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên) giảm 99% mức sử dụng bộ nhớ. Ước tính lý thuyết cho thấy kiến trúc có thể giảm tới 97% lưu lượng qua vệ tinh, tương đương mức tiết kiệm chi phí từ 104,6 xuống 2,4 USD mỗi thuyền viên mỗi tháng.

Từ khóa: Hệ thống quản lý học tập, ưu tiên ngoại tuyến, truyền phát thích ứng, vệ tinh khẩu độ rất nhỏ, ứng dụng web tiến bộ, đào tạo hàng hải.

Abstract

Training seafarers at sea through online learning management systems faces three barriers: relatively high satellite latency (typically 500-800 ms), significant packet loss rates (up to 80% in adverse weather), and considerable bandwidth costs (5-10 USD/GB). This study proposes a three-layer Offline-First architecture that combines a Progressive Web Application with adaptive bitrate streaming and multi-tier caching. The system automatically pre-fetches content

when the vessel is at port and serves it entirely offline at sea. Testing results show that the backend maintains a 95th-percentile response time-meaning 95% of requests are processed faster than this threshold-below 78 ms at 500 concurrent users, cache hit rate exceeds 98%, video startup from cache takes only 0.2 seconds, and a zero-RAM (Random Access Memory) video caching technique reduces memory usage by 99%. Theoretical estimation indicates that the architecture can reduce satellite data traffic by up to 97%, equivalent to a cost saving from 104.6 down to 2.4 USD per seafarer per month.

Keywords: Learning management system, offline-first, adaptive bitrate streaming, VSAT, progressive web application, maritime training.

1. Mở đầu

Ngành hàng hải vận chuyển khoảng 80% khối lượng hàng hóa toàn cầu [1]. Trong bối cảnh công nghệ ngày càng phức tạp, đào tạo và cập nhật kiến thức cho thuyền viên là yêu cầu bắt buộc theo Công ước quốc tế về tiêu chuẩn huấn luyện, cấp chứng chỉ và trực ca (Standards of Training, Certification and Watchkeeping - STCW). Hệ thống quản lý học tập (Learning Management System - LMS) là giải pháp được áp dụng rộng rãi nhằm đáp ứng nhu cầu này. Về mặt kiến trúc, một hệ thống LMS điển hình gồm hai thành phần: phần phục vụ nền (backend) đảm nhận quản lý tài khoản người dùng, nội dung khóa học, bài kiểm tra, theo dõi tiến trình học tập và chấm điểm, và phần giao diện người dùng (frontend) cung cấp màn hình truy cập học liệu, xem video bài giảng và thực hiện bài tập qua trình duyệt web.

Tuy nhiên, môi trường làm việc đặc thù của thuyền viên tạo ra những thách thức riêng biệt cho việc triển khai LMS. Về thời gian, thuyền viên làm việc theo ca kíp luân phiên, thời gian rảnh không cố định và

thường ngắn, đòi hỏi hệ thống phải sẵn sàng phục vụ bất kỳ lúc nào mà không cần chờ kết nối ổn định. Về thiết bị, thuyền viên chủ yếu sử dụng thiết bị cá nhân đa dạng gồm điện thoại thông minh, máy tính xách tay và máy tính bảng, do đó giải pháp dựa trên nền tảng web - có thể hoạt động trên mọi thiết bị có trình duyệt mà không cần cài đặt ứng dụng riêng - là lựa chọn phù hợp nhất. Về kết nối, kết nối internet trên tàu biển chủ yếu dựa vào hệ thống vệ tinh khẩu độ rất nhỏ (Very Small Aperture Terminal - VSAT), với ba hạn chế cốt lõi. Thứ nhất, độ trễ khứ hồi (Round-Trip Time - RTT) dao động 500-800 ms [2], cao gấp 20-40 lần so với mạng cáp quang thông thường. Thứ hai, tỷ lệ mất gói tin có thể đạt 80% trong thời tiết xấu [3]. Thứ ba, chi phí băng thông dao động 5-10 USD/GB [4]. Trên nhiều tuyến hải hành, kết nối hoàn toàn không khả dụng trong thời gian dài.

Từ thực tế trên, yêu cầu cốt lõi là: thuyền viên phải có thể học tập liên tục ngay cả khi mất kết nối hoặc kết nối có chất lượng kém. Các hệ thống LMS truyền thống yêu cầu kết nối thời gian thực để truyền phát video và đồng bộ dữ liệu, do đó không đáp ứng được yêu cầu này. Các nghiên cứu gần đây tập trung cải thiện thuật toán truyền phát thích ứng (Adaptive Bitrate Streaming - ABR) trên vệ tinh [3], [5] nhưng chưa giải quyết bài toán hiệu quả kinh tế. Ngược lại, các nền tảng học tập ngoại tuyến hiện có [6], [7] được thiết kế cho vùng nông thôn có mạng yếu nhưng ổn định, chưa thích ứng với đặc thù chuyển tiếp tín hiệu vệ tinh 15s trên biển.

Nghiên cứu này đề xuất kiến trúc LMS ưu tiên ngoại tuyến (Offline-First) kết hợp ABR, nhằm tách rời sự phụ thuộc giữa quá trình học tập và kết nối thời gian thực. Các đóng góp chính bao gồm:

- Kiến trúc ba lớp tích hợp ứng dụng web tiến bộ (Progressive Web App - PWA) với cơ chế tải trước tại cảng.
- Thang tốc độ bit và thuật toán điều chỉnh thích ứng tối ưu cho đặc thù vệ tinh hàng hải.
- Kỹ thuật lưu đệm video không chiếm RAM, giảm 99% mức sử dụng bộ nhớ trên thiết bị di động.
- Đánh giá hiệu năng trên năm hồ sơ mạng hàng hải mô phỏng.

2. Tổng quan nghiên cứu

2.1. Đào tạo ngoại tuyến và khoảng cách số

Trong [8] đã chỉ ra kết nối internet thiếu ổn định và hạn chế thiết bị là hai thách thức công nghệ hàng đầu cản trở tính công bằng trong giáo dục trực tuyến. Tổng quan hệ thống của [9] khẳng định đào tạo ngoại

tuyến mang lại kết quả tích cực về kiến thức và kỹ năng tại các khu vực hạ tầng internet thấp. Nghiên cứu [7] đề xuất nền tảng ngoại tuyến duy trì tính tương tác và phân tích dữ liệu, đồng bộ khi có kết nối trở lại. Các nghiên cứu [10], [11] khẳng định LMS ngoại tuyến khả thi cho vùng hạn chế kết nối và chỉ ra xu hướng cá nhân hoá trải nghiệm học dựa trên phân tích dữ liệu hành vi.

Tuy nhiên, các giải pháp trên được thiết kế cho vùng nông thôn trên đất liền - nơi mạng yếu nhưng ổn định về mặt vật lý. Môi trường hàng hải với chuyển tiếp tín hiệu vệ tinh mỗi 15s [3], [16] tạo ra kịch bản ngắt kết nối khác biệt hoàn toàn. Phân tích đa chiều trong nghiên cứu [17] xác nhận hiệu năng vệ tinh quỹ đạo thấp (Low Earth Orbit - LEO) phụ thuộc mật độ trạm mặt đất và điều kiện môi trường, khiến giải pháp ngoại tuyến càng cần thiết.

2.2. Nén video và truyền phát thích ứng

Sự tiến hóa từ chuẩn nén H.264/AVC (Advanced Video Coding - 2003) sang H.265/HEVC (High Efficiency Video Coding - 2013), AV1 (AOMedia Video 1 - 2018) và H.266/VVC (Versatile Video Coding - 2020) đã tiết kiệm băng thông đáng kể. [12] cho thấy VVC tiết kiệm tới 78% tốc độ bit so với H.264, AV1 (63%), và HEVC (53%) ở cùng mức chất lượng. [13] xác nhận AV1 giảm hơn 30% tốc độ bit so với VP9 (chuẩn nén video mã nguồn mở của Google).

Nghiên cứu [14] chỉ ra mặc dù HEVC vượt trội hơn H.264 khi mạng ổn định, H.264 lại cho chất lượng trải nghiệm tốt hơn khi tỷ lệ mất gói tin cao. Phát hiện này có ý nghĩa đặc biệt với hệ thống hàng hải, gợi ý rằng việc chọn chuẩn nén cần xem xét đồng thời hiệu suất nén và khả năng chịu lỗi mạng.

2.3. Ứng dụng web tiến bộ cho môi trường hạn chế

Nghiên cứu [6] khẳng định PWA là giải pháp phù hợp cho môi trường hạn chế tài nguyên nhờ khả năng hoạt động không cần kết nối thường trực. [15] cho thấy sự gia tăng kiến thức có ý nghĩa thống kê (xác suất kết quả xảy ra do ngẫu nhiên nhỏ hơn 0,001) khi triển khai PWA trong đào tạo y khoa, với điểm đánh giá tính khả dụng đạt 72,24/100.

2.4. Khoảng trống nghiên cứu

Từ tổng quan trên, bốn khoảng trống được xác định. Thứ nhất, các thuật toán truyền phát thích ứng trên vệ tinh [3], [5] giải quyết tính liên tục kỹ thuật nhưng chưa xét hiệu quả kinh tế. Thứ hai, chưa có kiến trúc tích hợp sâu Service Worker (trình xử lý nền của trình duyệt) của PWA với thang tốc độ bit tối ưu cho

lưu trữ cục bộ trên tàu. Thứ ba, thiếu mô hình kết hợp đồng thời tải trước tại cảng, truyền phát đa mức chất lượng, và đồng bộ siêu nhẹ qua vệ tinh. Thứ tư, các nền tảng LMS phổ biến như Moodle 4.x, Canvas và Coursera đều yêu cầu kết nối thường trực, chỉ hỗ trợ ngoại tuyến hạn chế, chưa có kiến trúc ưu tiên ngoại tuyến toàn diện cho môi trường hàng hải (so sánh chi tiết tại Bảng 7, Mục 5.4).

3. Kiến trúc hệ thống đề xuất

3.1. Kiến trúc ba lớp

Hệ thống được thiết kế theo mô hình ba lớp nhằm tách rời quá trình truyền tải dữ liệu khỏi quá trình học tập. Kiến trúc ba lớp của hệ thống LMS ưu tiên ngoại tuyến được minh họa tại Hình 1):

Lớp phục vụ nền đặt tại đất liền, gồm đường ống chuyển mã video tích hợp FFmpeg. Hệ thống nén video theo chuẩn H.264/AAC (Advanced Audio Coding) và phân đoạn thành các khối nhỏ theo giao thức HLS (HTTP Live Streaming), tạo nhiều phiên bản độ phân giải khác nhau. Đồng bộ dữ liệu học tập được quản lý qua giao diện lập trình ứng dụng theo kiểu chuyển giao trạng thái đại diện (Representational State Transfer - REST) với lưu lượng chỉ vài KB cho mỗi phiên.

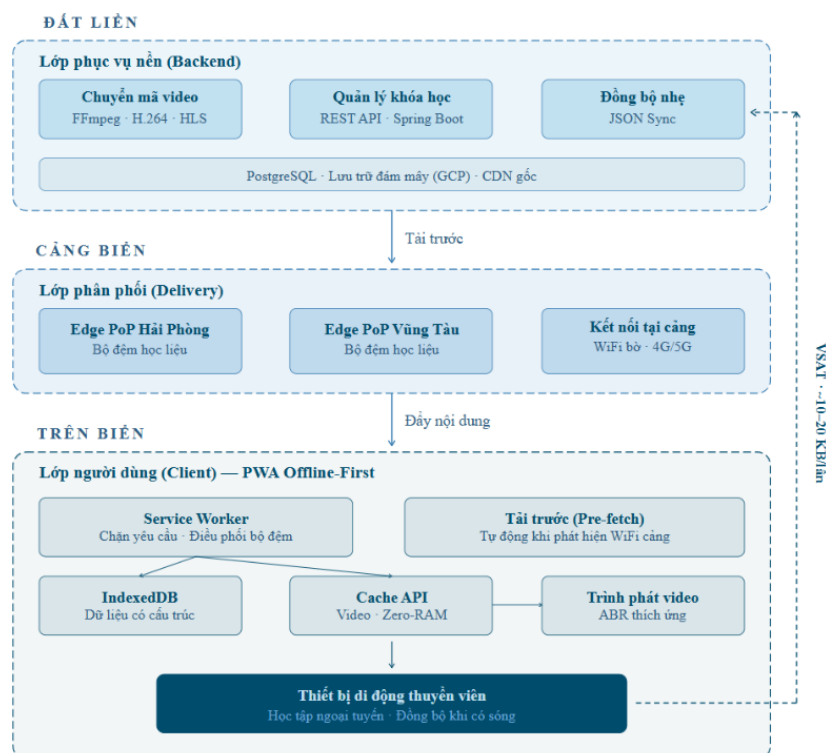
Lớp phân phối sử dụng các điểm hiện diện biên

(Edge Point of Presence) đặt tại các cảng biển lớn. Khi tàu cập cảng, hệ thống ưu tiên WiFi bờ hoặc mạng di động 4G/5G thay vì VSAT.

Lớp người dùng: xây dựng trên nền PWA. Service Worker (trình xử lý nền của trình duyệt) đóng vai trò đại diện nội bộ, quản lý yêu cầu mạng và điều phối dữ liệu từ IndexedDB - cơ sở dữ liệu phi quan hệ trên trình duyệt. Toàn bộ video và mã nguồn ứng dụng được lưu trữ cục bộ, cho phép truy cập tức thời không cần internet.

3.2. Lưu trữ đa tầng phía người dùng

Mỗi tầng lưu trữ được tối ưu cho một loại dữ liệu: LocalStorage cho dữ liệu phiên nhỏ (mã xác thực, tùy chọn cá nhân), IndexedDB qua thư viện Dexie.js phiên bản 6 cho dữ liệu có cấu trúc với khóa chính phức hợp [userId+id] nhằm cách ly dữ liệu giữa nhiều người dùng trên cùng thiết bị, và Cache API cho dữ liệu nhị phân (video). Về bảo mật, IndexedDB và Cache API tuân theo chính sách cùng nguồn gốc (Same-Origin Policy - SOP) của trình duyệt. Hệ thống triển khai cơ chế xác thực bốn trạng thái bao gồm ONLINE_AUTHENTICATED (truy cập đầy đủ), OFFLINE_AUTHENTICATED (ngoại tuyến với mã làm mới còn hạn), OFFLINE_DEGRADED (chỉ đọc nội dung đã lưu khi mã hết hạn), và UNAUTHENTICATED (không truy cập). Dữ liệu



Hình 1. Kiến trúc ba lớp của hệ thống LMS ưu tiên ngoại tuyến

được cô lập theo người dùng thông qua khóa tổ hợp userId và id. Hạn chế của SOP là không bảo vệ trước truy cập vật lý vào thiết bị. Đây là hạn chế chung của mọi ứng dụng web lưu dữ liệu ngoại tuyến.

Điểm then chốt là kỹ thuật lưu đệm không chiếm RAM. Thay vì tải toàn bộ video vào bộ nhớ rồi ghi vào bộ đệm - dễ gây lỗi tràn bộ nhớ trên thiết bị có RAM < 2 GB khi tải video trên 500 MB - hệ thống sử dụng luồng đọc tuần tự (ReadableStream) để chuyển từng khối dữ liệu trực tiếp từ mạng sang Cache API. Kết quả: giảm mức sử dụng RAM từ 500MB xuống 3-5 MB, cải thiện 99%.

3.3. Xác định quy mô hệ thống

Để đảm bảo tính khả thi vận hành, nghiên cứu thiết lập bộ chỉ tiêu theo mô hình chỉ số mức dịch vụ và mục tiêu mức dịch vụ (Service Level Indicator/Objective - SLI/SLO) dựa trên bốn tiêu chí: Tải đỉnh (khả năng chịu tải đồng thời), độ trễ (thời gian đến byte đầu tiên - Time to First Byte, TTFB), khả năng mở rộng (số người dùng tối đa), và dự phòng (tỷ lệ nội dung phục vụ được từ bộ đệm khi mất kết nối). Bảng 1 trình bày các chỉ tiêu cụ thể cho từng tiêu chí.

Năng lực máy chủ. Dựa trên kết quả kiểm thử bằng k6, hạ tầng hiện tại (Google Cloud Platform - GCP, e2-medium: 2 lõi xử lý ảo, 4 GB RAM) đáp ứng ổn định 50 người dùng hoạt động đồng thời, tối đa khoảng 200 người dùng. Độ trễ giao diện lập trình ứng dụng ở mức tải tối đa vẫn duy trì phân vị thứ 95 dưới 100 ms. Cơ chế giới hạn tốc độ truy cập cho phép mỗi địa chỉ giao thức Internet (Internet Protocol - IP) thực hiện 120-600 yêu cầu/phút tùy trạng thái xác thực.

Lộ trình mở rộng được đề xuất theo bốn mức: 1-50 người dùng sử dụng hạ tầng hiện tại, 50-200 người dùng cần nâng cấp lên e2-standard-4 (4 lõi, 16 GB), 200-1000 người dùng yêu cầu e2-standard-8 kết hợp bản sao đọc cơ sở dữ liệu, trên 5000 người dùng cần kiến trúc phân

tán với điều phối vùng chứa (Kubernetes), mạng phân phối nội dung và bộ đệm Redis.

3.4. Thiết kế thang tốc độ bit cho hàng hải

Khác với các thang tốc độ bit tiêu chuẩn của các nền tảng video phổ biến, hệ thống đề xuất thang ba mức cân bằng giữa chất lượng hình ảnh và dung lượng lưu trữ được mô tả trong Bảng 2. Thiết kế này dựa trên hai cơ sở. Trên màn hình di động 5-7 inch, độ phân giải ảnh hưởng ít đến cảm nhận người dùng do mật độ điểm ảnh cao và khoảng cách xem gần [14], cho phép sử dụng mức 480p mà vẫn duy trì chất lượng chấp nhận được. Với chuẩn HEVC, mức 480p@1 Mbps tiết kiệm 40-50% dung lượng so với H.264 ở cùng độ phân giải [12]. Mức 1080p chỉ được phép tải khi tàu có kết nối băng thông rộng tại cảng nhằm tránh lãng phí chi phí VSAT. Cụ thể, mức 240p với tốc độ bit 400kbps là mức tối thiểu cho tình huống VSAT yếu hoặc bộ nhớ thiết bị sắp đầy, mức 480p với 1000kbps là mức tiêu chuẩn phù hợp cho màn hình di động cá nhân, và mức 1080p với 5000kbps chỉ được phép tải khi tàu kết nối WiFi băng thông rộng tại cảng.

Dung lượng video được ước tính theo công thức $D = R \times T \times 450$, trong đó D là dung lượng (MB), R là tốc độ bit (Mbps), T là thời lượng (giờ), và hệ số 450 là giá trị xấp xỉ của phép chuyển đổi đơn vị $3600/8 \approx 450$ (MB trên mỗi Mbps mỗi giờ).

$$D = R \times T \times 450 \quad (1)$$

Thiết kế này dựa trên hai cơ sở. Trên màn hình di động 5-7 inch, độ phân giải ảnh hưởng ít đến cảm nhận người dùng do mật độ điểm ảnh cao và khoảng cách xem gần [14], cho phép sử dụng mức 480p mà vẫn duy trì chất lượng chấp nhận được. Với chuẩn HEVC, mức 480p@1 Mbps tiết kiệm 40-50% dung lượng so với H.264 ở cùng độ phân giải [12]. Mức 1080p chỉ được phép tải khi tàu có kết nối băng thông rộng tại cảng nhằm tránh lãng phí chi phí VSAT.

Bảng 1. Chỉ tiêu quy mô hệ thống theo SLI/SLO

Tiêu chí	SLI	SLO	Nguồn
Tải đỉnh	Người dùng đồng thời	≥ 200 VUs, $p95 < 100\text{ms}$	k6
Độ trễ	p50/p95/p99 TTFB	$p95 \leq 78\text{ms}$ (backend)	k6
Mở rộng	Người dùng tối đa	50-200 (e2-medium)	Quy hoạch
Dự phòng	Tỷ lệ trùng bộ đệm	$\geq 98\%$	PWA

Bảng 2. Thang tốc độ bit cho môi trường hàng hải

Mức	Tốc độ bit	Dung lượng/giờ	Điều kiện
240p	400 kbps	≈ 180 MB	VSAT yếu, bộ nhớ thiết bị sắp đầy
480p	1000 kbps	≈ 450 MB	Thiết bị di động
1080p	5000 kbps	≈ 2.2 GB	WiFi băng thông rộng tại cảng

3.5. Thuật toán điều chỉnh tốc độ bit thích ứng

Nghiên cứu đề xuất thuật toán theo nguyên tắc “hạ cấp nhanh, nâng cấp chậm” phù hợp với đặc thù VSAT. Các tham số gồm: $B(t)$ là mức bộ đệm tại thời điểm t (giây), $BW(t)$ là băng thông ước lượng (kbps), R_{ht} và R_{tt} là tốc độ bit hiện tại và tiếp theo, và $\mathcal{R} = \{400, 1000, 5000\}$ là tập các mức tốc độ bit r (tương ứng với các độ phân giải 240p, 480p, 1080p). Cấu hình bộ đệm của trình phát Shaka Player gồm thông số $bufferingGoal=30s$ (lượng video hệ thống chủ động tải trước, bộ đệm dự phòng chính), $rebufferingGoal=8s$ (ngưỡng tối thiểu để tiếp tục phát sau khi dừng), $switchInterval = 8s$ (khoảng cách tối thiểu giữa các lần chuyển chất lượng), và $defaultBandwidthEstimate=900Kbps$ (ước lượng băng thông ban đầu phù hợp VSAT hàng hải). Với bộ đệm 30s, hệ thống có dự phòng gấp đôi so với chu kỳ chuyển tiếp chùng 15s của vệ tinh LEO.

Hạ cấp được kích hoạt ngay khi băng thông giảm đột ngột hoặc bộ đệm cạn kiệt như công thức (2):

$$BW(t) < R_{ht} \times 1.2 \text{ hoặc } B(t) < 8s \quad (2)$$

Mức tốc độ bit tiếp theo được mô tả trong công thức (3):

$$R_{tt} = \max\{r \in \mathcal{R} \mid r < R_{ht}\} \quad (3)$$

Nâng cấp chỉ được thực hiện khi đường truyền ổn định bền vững thỏa mãn điều kiện (4):

$$BW(t) > R_{tt} \times 1.5 \text{ and}$$

$$B(t) > 30s \text{ and } stable(BW, 20s) \quad (4)$$

Hàm $stable(BW, d)$ trả về giá trị đúng nếu hệ số biến thiên của băng thông trong khoảng d thỏa mãn điều kiện (5). Giá trị $d=20s$ được chọn lớn hơn chu kỳ chuyển tiếp chùng 15s của vệ tinh LEO nhằm đảm bảo cửa sổ quan sát bao phủ ít nhất một lần chuyển tiếp hoàn chỉnh, loại bỏ nhiễu băng thông trước khi quyết định nâng cấp. Trong đó μ và σ lần lượt là trung bình và độ lệch chuẩn.

$$\frac{\sigma(BW_d)}{\mu(BW_d)} < 0.1 \quad (5)$$

Nguyên lý “hạ cấp nhanh” loại bỏ hiện tượng đứng hình khi xảy ra chuyển tiếp vệ tinh, “nâng cấp chậm” ngăn dao động chất lượng gây khó chịu khi tín hiệu chập chờn.

4. Phương pháp nghiên cứu

4.1. Môi trường kiểm thử

Thực nghiệm gồm hai phần: kiểm thử phần phục vụ nền bằng công cụ Grafana k6 phiên bản 1.6.1, và kiểm thử PWA ngoại tuyến bằng Chrome DevTools. Máy chủ sử dụng phiên bản e2-medium trên Google

Cloud Platform (2 lõi xử lý ảo, 4 GB RAM), vùng asia-southeast1-b.

4.2. Kịch bản tải

Bốn kịch bản tải được thiết kế theo mức tải tăng dần được mô tả trong Bảng 3. Kịch bản “Khói” với 1 người dùng ảo (Virtual Users - VUs) trong 30 giây kiểm tra tính đúng đắn cơ bản của hệ thống. Kịch bản “Tải thấp” và “Tải trung bình” mô phỏng lần lượt 10 và 100 người dùng ảo, tương ứng với tải vận hành thường ngày. Kịch bản “Tải cao” với 500 người dùng ảo trong 11 phút đánh giá giới hạn chịu tải của hạ tầng.

Bảng 3. Kịch bản tải kiểm thử

Kịch bản	Người dùng ảo	Thời lượng	Thông lượng
Khói	1	30s	0.38 req/s
Tải thấp	10	3m	2.68 req/s
Tải trung bình	100	6m	23.4 req/s
Tải cao	500	11m	92.4 req/s

4.3. Mô phỏng mạng hàng hải

Năm hồ sơ mạng được mô phỏng dựa trên thông số kỹ thuật của Liên minh Viễn thông Quốc tế [2] và các nghiên cứu đo lường thực tế trên vệ tinh quỹ đạo thấp (Low Earth Orbit - LEO) [3] trong Bảng 4. Hồ sơ “Bình thường” (cáp quang, không trễ) dùng làm đường cơ sở. “Ven bờ” mô phỏng kết nối 4G/LTE khi tàu gần đất liền với 150ms trễ và 0,5% mất gói. “VSAT” phản ánh điều kiện vệ tinh điển hình với 500 ms trễ và 2% mất gói. “Sóng ngắn” và “Bão” mô phỏng các tình huống suy giảm nghiêm trọng với trễ lên tới 2000ms và mất gói 10%:

Bảng 4. Hồ sơ mạng hàng hải mô phỏng

Hồ sơ	Điều kiện	Trễ	Rung	Mất gói
Bình thường	Cáp quang	0ms	0ms	0%
Ven bờ	4G/LTE	150ms	±50ms	0.5%
VSAT	Vệ tinh	500ms	±100ms	2%
Sóng ngắn	Suy giảm	1500ms	±500ms	5%
Bão	Thời tiết xấu	2000ms	±800ms	10%

4.4. Đo lường hiệu năng PWA ngoại tuyến

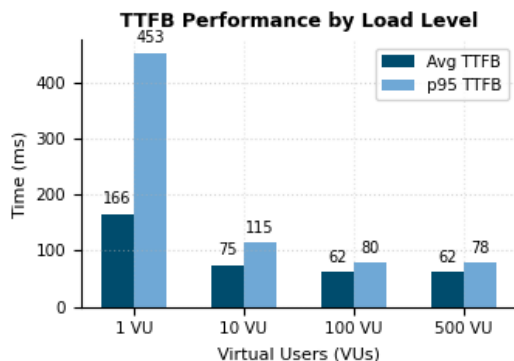
Các chỉ số hiệu năng PWA được đo lường trực tiếp

trên hệ thống đã triển khai bằng công cụ Chrome DevTools phiên bản 122. Quy trình đo gồm ba bước: Trước tiên, tải ứng dụng lần đầu qua mạng để ghi nhận thời gian tải khung ứng dụng và kích hoạt Service Worker, tiếp theo, tải trước toàn bộ nội dung khóa học (bao gồm video 500MB) vào bộ đệm cục bộ, cuối cùng, ngắt hoàn toàn kết nối mạng và đo thời gian tải trang, khởi tạo video, cùng mức sử dụng RAM trong chế độ ngoại tuyến. Mỗi phép đo được lặp lại 5 lần và lấy giá trị trung vị.

5. Kết quả

5.1. Hiệu năng phản phục vụ nền

Hình 2 trình bày thời gian đến byte đầu tiên (Time to First Byte - TTFB) theo mức tải. Ở mức 1 người dùng ảo (khởi động ngẫu nhiên), giá trị trung bình đạt 166ms và phân vị thứ 95ms lên tới 453ms. Khi tải tăng, hiệu năng cải thiện đáng kể: Giá trị trung bình giảm xuống 62-75 ms ở các mức 10-500 người dùng ảo, và phân vị thứ 95 giảm xuống 78-115 ms. Thông lượng tổng đạt 92,4 yêu cầu/giây ở mức 500 người dùng ảo, trong đó 42 yêu cầu/giây thành công, các yêu cầu thất bại chủ yếu do cơ chế giới hạn tốc độ truy cập khi toàn bộ người dùng ảo chạy từ cùng địa chỉ IP - hành vi bảo mật được thiết kế có chủ đích.



Hình 2. Thời gian đến byte đầu tiên theo mức tải

Hiện tượng thời gian phản hồi giảm khi tải tăng được giải thích bởi ba yếu tố: Thứ nhất, tối ưu hóa biên dịch tức thời (Just-In-Time compilation - JIT) của máy ảo Java HotSpot. Thứ hai, tổng hợp kết nối cơ sở dữ liệu hoạt động hiệu quả hơn dưới tải, và thứ ba tái sử dụng kết nối. Điểm cuối cải thiện rõ rệt nhất: từ 499ms (1 người dùng ảo) xuống 60ms (500 người dùng ảo), giảm khoảng 88%.

Hình 2 minh họa xu hướng này: Ở mức 1 người dùng, khoảng cách giữa giá trị trung bình (166ms) và phân vị thứ 95 (453ms) rất lớn, cho thấy hiệu năng chưa ổn định do máy ảo Java (Java Virtual Machine -

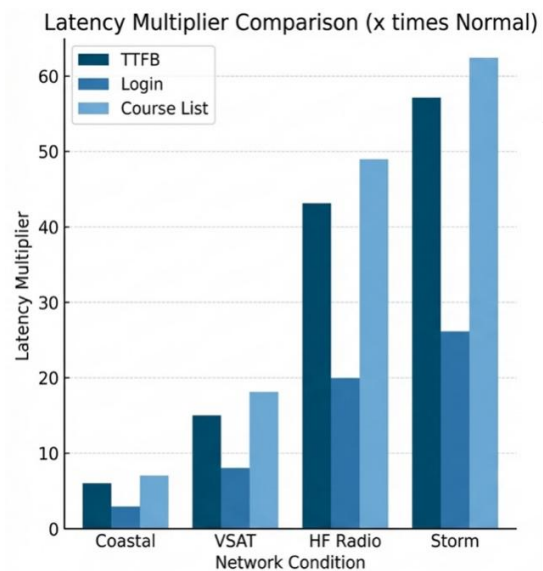
JVM) chưa được khởi động đầy đủ. Từ mức 10 người dùng trở lên, hai đường gần như hội tụ (chênh lệch còn 13-40 ms), minh chứng hệ thống đạt trạng thái ổn định và phù hợp cho vận hành thực tế.

5.2. Hiệu năng trên mạng hàng hải mô phỏng

Bảng 5 tổng hợp kết quả trên các hồ sơ mạng hàng hải với hệ số trễ thể hiện số lần thời gian phản hồi tăng so với điều kiện cáp quang bình thường (75ms) và tỷ lệ lỗi cho biết tỷ lệ phần trăm yêu cầu bị thất bại hoàn toàn do hết thời gian chờ hoặc mất gói tin. Ở điều kiện VSAT điển hình, hệ thống vẫn sử dụng được với tỷ lệ thành công 98,75%, dù tải trang chậm hơn 15 lần. Ở điều kiện bão, hệ thống gần như không thể sử dụng trực tuyến - đây là kịch bản mà kiến trúc Offline-first được thiết kế nhằm khắc phục.

Bảng 5. Hiệu năng hệ thống trên các hồ sơ mạng hàng hải

Hồ sơ	Thời gian/yêu cầu	Hệ số trễ	Tỷ lệ lỗi
Bình thường	75ms	1x	0%
Ven bờ	400ms	5x	0%
VSAT	1.1s	15x	1.25%
Sóng ngắn	3s	40x	3.8%
Bão	4-5s	60x	13.9%



Hình 3. Hệ số trễ so với điều kiện bình thường trên các hồ sơ mạng hàng hải

Hình 3 cho thấy mức độ suy giảm tăng phi tuyến theo điều kiện mạng với ba loại thao tác được đo riêng: TTFB, đăng nhập, và tải danh sách khóa học. Đáng chú ý, thao tác đăng nhập chịu ảnh hưởng nặng

Bảng 6. Chỉ số hiệu suất PWA

Chỉ số	Trực tuyến	Ngoại tuyến
Tải khung ứng dụng (lần đầu)	2.1s	-
Tải khung ứng dụng (từ bộ đệm)	0.4s	0.4s
Tải trang khóa học	-	0.08s
Khởi tạo video	-	0.2s
Đồng bộ lô 10 mục (qua vệ tinh)	3.2s	-
RAM khi tải video 500 MB	3-5 MB	-

Bảng 7. So sánh hệ thống đề xuất với LMS trực tuyến truyền thống

Tiêu chí	Moodle/Canvas	Coursera	Hệ thống đề xuất
Kiến trúc	Trực tuyến	Trực tuyến	Ưu tiên ngoại tuyến
Hỗ trợ ngoại tuyến	Hạn chế (plugin)	Tải xuống từng bài	Toàn bộ (PWA + Cache API)
Truyền phát video	Nhúng ngoài (YouTube)	Truyền phát riêng	ABR tích hợp, 3 mức
Tải trước tại cảng	Không	Không	Tự động qua WiFi/4G
Đồng bộ qua vệ tinh	Kết nối liên tục	Kết nối liên tục	Siêu nhẹ (10–20 KB)
Chi phí VSAT/tháng	~104 USD	~104 USD	~2,4 USD (ước tính)

nhất do yêu cầu nhiều vòng trao đổi xác thực - mỗi vòng đều chịu thêm độ trễ vệ tinh. Ở điều kiện bão, hệ số trễ đăng nhập lên tới 62 lần, trong khi TTFB chỉ ở mức 57 lần. Kết quả này củng cố lập luận rằng kiến trúc Offline-first - loại bỏ nhu cầu xác thực liên tục trên biển - là giải pháp phù hợp hơn so với việc tối ưu hóa giao thức truyền tải.

5.3. Hiệu năng PWA ngoại tuyến

Bảng 6 trình bày các chỉ số hiệu năng PWA.

Khi nội dung đã được tải trước, thời gian tải trang khóa học chỉ 0,08s và video bắt đầu phát sau 0,2s - nhanh hơn 40-50 lần so với truyền phát trực tiếp trên VSAT. Chi phí dữ liệu mỗi lần đồng bộ chỉ 10-20 KB, cho phép hàng trăm lần đồng bộ mỗi ngày mà không ảnh hưởng đáng kể đến chi phí băng thông.

5.4. Thảo luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy nút thất cô chai trên biển nằm ở đường truyền vệ tinh (độ trễ, rung, mất gói) chứ không phải năng lực xử lý phần phục vụ nền. Phần phục vụ nền chỉ cần đạt ngưỡng phân vị thứ 95 dưới 100ms, trọng tâm tối ưu cần hướng vào chiến lược bộ đệm và tải trước.

Thời điểm rủi ro nhất là khi tàu cập cảng - nhiều thuyền viên đồng thời tải học liệu. Kỹ thuật lưu đệm không chiếm RAM cho phép nhiều người dùng tải đồng thời mà không gây quá tải thiết bị.

Kiến trúc offline-first có thể giảm tới 97% lưu lượng VSAT so với truyền phát trực tuyến truyền thống, tương đương mức tiết kiệm từ 104,6 xuống 2,4 USD mỗi thuyền viên mỗi tháng. Trong trường hợp tải trước chỉ đạt 80% nội dung, mức giảm vẫn đáng kể: khoảng 78%.

Bảng 7 so sánh hệ thống đề xuất với các LMS trực tuyến truyền thống trên sáu tiêu chí. Các nền tảng như Moodle 4.x, Canvas và Coursera đều yêu cầu kết nối thường trực và chỉ hỗ trợ ngoại tuyến hạn chế. Hệ thống đề xuất khác biệt cơ bản là kiến trúc ưu tiên ngoại tuyến ngay từ thiết kế, truyền phát video ABR tích hợp cho vệ tinh hàng hải, và triển khai PWA không cần cài đặt. Ưu điểm lớn nhất về kinh tế là giúp chi phí VSAT giảm từ hơn 100 USD xuống hơn 2 USD cho mỗi thuyền viên mỗi tháng nhờ cơ chế tải trước nội dung và đồng bộ.

So với các thuật toán truyền phát thích ứng hiện có, cách tiếp cận của hệ thống đề xuất có điểm khác biệt rõ ràng. Các thuật toán BBA (Buffer-Based Approach) [18] và BOLA (Buffer Occupancy based Lyapunov Algorithm) [19] tối ưu hóa dựa trên mức bộ đệm, MPC (điều khiển dự báo mô hình - Model Predictive Control) [20] dự đoán bằng thông tương lai, còn Pensieve [21] sử dụng học tăng cường để ra quyết định. Tuy nhiên, các phương pháp này được thiết kế cho mạng mặt đất ổn định. Hệ thống đề xuất phân loại độ trễ khứ hồi thành các hồ sơ mạng hàng hải (cảng, ven bờ, VSAT, bão) rồi điều chỉnh ngưỡng bộ đệm theo từng hồ sơ, ưu tiên ổn định phát lại hơn tối đa hoá chất lượng. Điều này phù hợp môi trường nơi tín hiệu vệ tinh dễ bị gián đoạn, ảnh hưởng trải nghiệm học.

Tuy nhiên, các thực nghiệm được tiến hành trên môi trường mô phỏng, không phải trên tàu biển thực tế. Phần phục vụ nền chỉ được kiểm thử trên một phiên bản máy chủ duy nhất (e2-medium), và nghiên cứu chưa bao gồm đánh giá với thuyền viên thực tế - điều này cần được kiểm chứng qua thử nghiệm thực địa.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và đánh giá kiến trúc LMS ưu tiên ngoại tuyến kết hợp truyền phát thích ứng cho môi trường hàng hải. Các kết quả chính gồm: phần phục vụ nền duy trì thời gian phản hồi phân vị thứ 95 dưới 78 ms ở 500 người dùng ảo, tỷ lệ trúng bộ đệm đạt trên 98%, thời gian khởi tạo video từ bộ đệm 0,2s, và kỹ thuật lưu đệm không chiếm RAM giảm 99% mức sử dụng bộ nhớ. Ước tính lý thuyết cho thấy kiến trúc giảm tới 97% lưu lượng VSAT so với truyền phát trực tuyến truyền thống. Hướng phát triển tiếp theo gồm: triển khai thử nghiệm thực địa trên nhóm thuyền viên, tích hợp mã hóa nội dung ngoại tuyến, và áp dụng hệ thống tệp riêng nguồn gốc (Origin Private File System) cho lưu trữ video hiệu quả hơn. Ngoài ra, nhóm tác giả đề xuất bổ sung tầng mã hoá nội dung qua Web Crypto API với thuật toán mã hóa tiêu chuẩn nâng cao 256-bit chế độ Galois/Counter (AES-256-GCM) với khoá dẫn xuất từ mật khẩu người dùng, kết hợp giấy phép ngoại tuyến có thời hạn (mặc định 30 ngày cho hải trình) nhằm tăng cường bảo mật học liệu trên thiết bị cá nhân mang theo. Định hướng tới đây của nghiên cứu là việc thực nghiệm dự kiến triển khai trên 10-15 thuyền viên của 2 tàu (1 tàu VSAT, 1 tàu Starlink) trong 4 tuần, đo các chỉ số tỷ lệ hoàn thành tải, thời lượng học ngoại tuyến, tỷ lệ xung đột đồng bộ và điểm thang đo khả dụng hệ thống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.43**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] UNCTAD (2024), *Review of Maritime Transport 2024*, United Nations Conference on Trade and Development, Retrieved from <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024>.
- [2] ITU (2020), *Performance Objectives and Availability Targets for Satellite Systems*, ITU-R Recommendation S.1062-2, Geneva, Thụy Sĩ.
- [3] Fang, H., et al. (2024), *Robust Live Streaming over LEO Satellite Constellations: Measurement, Analysis, and Handover-Aware Adaptation*, Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Multimedia, MM '24, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, pp.5958-5966, Doi: 10.1145/3664647.3680712.
- [4] Starlink (2026), *Starlink Maritime Service Plans*, Retrieved from <https://www.starlink.com/maritime>.
- [5] Zhao, J., et al. (2024), *Low-Latency Live Video Streaming over a Low-Earth-Orbit Satellite Network with DASH*, Proc. 2024 Int. Conf. Satellite Communications.
- [6] Mohammed, N., Jarde, A., Mackenzie, G., D'Alessandro, U. & Jeffries, D. (2022), *Deploying Machine Learning Models Using Progressive Web Applications*, Front. Public Health, Vol.10, pp.845610, Doi: 10.3389/fpubh.2022.845610.
- [7] Hillier, M. (2018), *Bridging the digital divide with off-line e-learning*, Expanding Horizons in Open and Distance Learning, pp.1-12.
- [8] Ferri, F., Grifoni, P. & Guzzo, T. (2020), *Online Learning and Emergency Remote Teaching: Opportunities and Challenges in Emergency Situations*, Societies, Vol.10(4), p.86. Doi: 10.3390/soc10040086.
- [9] Rasmussen, K., et al. (2014), *Offline eLearning for undergraduates in health professions: A systematic review of the impact on knowledge, skills, attitudes and satisfaction*, J. Glob. Health, Vol.4(1). Doi: 10.7189/jogh.04.010405.
- [10] Maro, S., Kondoro, A., Haßler, B., Mtebe, J. & Proctor, J. (2023), *Deployment of Offline Learning Management Systems: Comparing the Performance of Selected Micro-servers in Tanzania*, J. Learn. Dev., Vol.10, pp.280-296. Doi: 10.56059/jl4d.v10i2.835.
- [11] Pan, Z., Biegley, L., Taylor, A. & Zheng, H. (2024), *A Systematic Review of Learning Analytics-Incorporated Instructional Interventions on Learning Management Systems*, J. Learn. Anal., Vol.11, pp.1-21. Doi: 10.18608/jla.2023.8093.
- [12] Uhrina, M., Sevcik, L., Bienik, J. & Smatanova, L. (2024), *Performance Comparison of VVC, AV1, HEVC, and AVC for High Resolutions*, Electronics, Vol.13(2), p.345. Doi: 10.3390/electronics13020345.
- [13] Han, J., et al. (2021), *A Technical Overview of AV1*, Proc IEEE, Vol.109(9), pp.1435-1462. Doi: 10.1109/JPROC.2021.3058710.
- [14] Nawaz, O., Fiedler, M. & Khatibi, S. (2024), *QoE-Based Performance Comparison of AVC*,

- HEVC, and VP9 on Mobile Devices with Additional Influencing Factors*, Electronics, Vol.13(3), p.512.
 Doi: 10.3390/electronics13030512.
- [15] Yuliawan, D., Widyandana, D. & Hidayah, R. N. (2020), *Utilization of Nursing Education Progressive Web Application (NEPWA) Media*, JMIR Nurs., Vol.3(1), e21145.
 Doi: 10.2196/21145.
- [16] Ma, S., Chou, Y. C., Zhao, H., Chen, L., Ma, X. & Liu, J. (2023), *Network Characteristics of LEO Satellite Constellations: A Starlink-Based Measurement from End Users*, IEEE INFOCOM 2023-IEEE Conference on Computer Communications, pp.1-10.
 Doi: 10.1109/INFOCOM53939.2023.10228912.
- [17] Mohan, N., Ferguson, A. E., Cech, H., Bose, R., Renatin, P. R., Marina, M. K. & Ott, J. (2024), *A Multifaceted Look at Starlink Performance*, Proceedings of the ACM Web Conference 2024 (WWW '24), Singapore: Association for Computing Machinery, pp.2723-2734.
 Doi: 10.1145/3589334.3645328.
- [18] Huang, T.-Y., Johari, R., McKeown, N., Trunnell, M. & Watson, M. (2014), *A Buffer-Based Approach to Rate Adaptation: Evidence from a Large Video Streaming Service*, Proc. ACM SIGCOMM 2014, pp.187-198.
 Doi: 10.1145/2619239.2626296.
- [19] Spiteri, K., Urgaonkar, R. & Sitaraman, R. K. (2016), *BOLA: Near-Optimal Bitrate Adaptation for Online Videos*, IEEE INFOCOM 2016, pp.1-9.
 Doi: 10.1109/INFOCOM.2016.7524428.
- [20] Yin, X., Jindal, A., Sekar, V. & Sinopoli, B. (2015), *A Control-Theoretic Approach for Dynamic Adaptive Video Streaming over HTTP*, Proc. ACM SIGCOMM 2015, pp.325-338.
 Doi: 10.1145/2785956.2787486.
- [21] Mao, H., Netravali, R. & Alizadeh, M. (2017), *Neural Adaptive Video Streaming with Pensieve*, Proc. ACM SIGCOMM 2017, pp.197-210.
 Doi: 10.1145/3098822.3098843.

Ngày nhận bài:	29/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	14/04/2026
Ngày duyệt đăng:	16/04/2026