

PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TRẢI NGHIỆM DỮ LIỆU ĐA PHƯƠNG TIỆN TRÊN MẠNG KHÔNG DÂY

Ngô Hải Anh^{1*}

¹Viện Công nghệ thông tin, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

* Email: ngohaianh@ioit.ac.vn

Ngày nhận bài: 23/7/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/10/2022

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2022

TÓM TẮT

Với xu hướng phát triển nhanh chóng của internet và các công nghệ mạng có liên quan, mạng không dây và dữ liệu đa phương tiện ngày càng đóng vai trò lớn trong các hoạt động đời thường. Rất nhiều người dùng thiết bị di động sử dụng các dịch vụ như VoIP, các ứng dụng mạng xã hội có hỗ trợ trao đổi tin nhắn, cuộc gọi thoại, cuộc gọi video dựa trên kết nối internet, do đó truyền dữ liệu đa phương tiện trên mạng không dây có một vai trò then chốt đối với người dùng internet hiện nay. Đánh giá chất lượng dịch vụ mạng kiểu này thường dựa trên các tiêu chí QoS (Quality of Service) vốn mang nhiều đặc tính kỹ thuật như độ trễ, độ mất gói tin, băng thông, thông lượng. Tuy nhiên, với sự phát triển bùng nổ của các dịch vụ đa phương tiện hiện nay, yếu tố chất lượng trải nghiệm (Quality of Experience – QoE) cũng đóng vai trò ngày càng nổi bật bởi nó liên quan đến cảm nhận trực tiếp của người dùng cụ thể với một loại dịch vụ đa phương tiện cụ thể, mang yếu tố định tính nhiều hơn định lượng. Đánh giá QoE do vậy cũng có cách tiếp cận khác so với đánh giá QoS truyền thống. Trong bài báo này, chúng tôi phân tích một số yếu tố liên quan đến đánh giá QoE đối với dữ liệu đa phương tiện và sử dụng bộ phần mềm mô phỏng ns-3 để đánh giá QoE với một số kịch bản truyền dữ liệu đa phương tiện trên mạng không dây.

Từ khóa: đa phương tiện, mạng không dây, mô phỏng, ns-3, QoE, QoS.

EXPERIENCE QUALITY ANALYSIS AND EVALUATION FOR MULTIMEDIA DATA ON WIRELESS NETWORKS

ABSTRACT

With the rapid development of the Internet and related network technologies, wireless networks and multimedia data play an increasingly large role in daily life activities. Numerous mobile device users use services such as VoIP, social networking applications that support the exchange of messages, voice calls, and video calls based on the Internet connection. Therefore, transmitting multimedia data on wireless networks plays a pivotal role for today's Internet users. Evaluation of this type of network service is usually based on QoS (Quality of Service) criteria, which have many technical characteristics such as delay, packet loss, bandwidth, and throughput. However, with the explosive development of multimedia services today, the Quality of Experience (QoE) criteria is becoming increasingly important because it is related to the direct perception of the user, specifically with a particular type of multimedia service, with more qualitative than quantitative factors. QoE evaluation therefore also has a different approach than traditional QoS evaluation. In this paper, we analyze some factors related to QoE evaluation for multimedia data and use the ns-3 simulation software to evaluate QoE with some scenarios of multimedia data transmission over a wireless network.

Keywords: multimedia, ns-3, QoE, QoS, simulation, wireless.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chất lượng dịch vụ hay QoS (Quality of Service) là một lĩnh vực đã được nghiên cứu khá nhiều từ lâu nay. Theo Liên minh viễn thông quốc tế ITU (International Telecommunication Union) tại các tài liệu (ITU, 2008, 2020), QoS được định nghĩa là “*Tổng thể các đặc điểm của dịch vụ viễn thông có khả năng đáp ứng các nhu cầu đã được cho biết và đã được nói rõ của người sử dụng dịch vụ.*”

Như vậy có thể thấy, QoS dựa nhiều vào yếu tố kỹ thuật của dịch vụ do các hãng cung cấp tới khách hàng dựa trên thỏa thuận (kỹ thuật) hai bên, các thỏa thuận này dễ thấy và dễ được lượng hóa thông qua các con số kỹ thuật cụ thể. Còn với *chất lượng trải nghiệm*, hay QoE (Quality of Experience), chúng ta trước tiên cần chú ý rằng nhận thức (perception) là quá trình xử lý thông tin cảm nhận được với đối tượng con người tiếp xúc, sự nhận thức này được giả định bao gồm hai giai đoạn xử lý kế tiếp nhau trước khi một nhận thức cuối cùng xuất hiện trong thế giới nhận thức của con người, cụ thể là: chuyển đổi các kích thích thông qua các cơ quan cảm giác sinh lý tương ứng thành các tín hiệu thần kinh; xử lý và truyền các tín hiệu thần kinh này trong hệ thống thần kinh trung ương đến vỏ não, cuối cùng dẫn đến sự xuất hiện của các khái niệm cụ thể trong thế giới tri giác của con người. Với cách nhìn trên, có thể định nghĩa *sự trải nghiệm* (experiencing) “*là dòng nhận thức riêng lẻ (về cảm giác, nhận thức, cảm tính, và khái niệm) xảy ra trong một tình huống quy chiếu cụ thể.*”

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để đi đến công nhận chính thức một tiêu chuẩn cho các mạng không dây như IEEE 802.11 (IEEE, 2012) cần trải qua quá trình đánh giá thử nghiệm nhằm chứng minh hiệu quả. Việc đánh giá các thông số mạng nói chung là khó khăn, đặc biệt với mạng không dây do tính đa dạng của phần cứng, phần mềm, thông số mạng và khó có một phương pháp tối ưu nào cho việc đánh giá tất cả các thông số mạng. Một số phương pháp chính

thường được thực hiện như: mô hình hóa (modeling), mô phỏng (simulation) và giả lập (emulator).

Phương pháp mô hình hóa có ưu điểm là dễ đưa thêm tham số, kết quả chính xác do có thể chứng minh bằng toán học, mô hình có tính tổng quát hóa rất cao. Tuy nhiên, nhược điểm là khó triển khai do môi trường thực tế mạng thường có nhiều yếu tố tác động.

Phương pháp mô phỏng có ưu điểm là chi phí thấp, các thông số mạng có thể dễ dàng thay đổi, quan sát nhờ việc thiết lập giá trị trong phần mềm mô phỏng. Nhược điểm của phương pháp này là khó chứng minh chính xác như phương pháp mô hình và các yếu tố đánh giá dù sao vẫn là do phần mềm mô phỏng thiết lập nên vẫn không đạt được mức độ giống các mạng chạy trong thực tế.

Phương pháp giả lập, hay nói cách khác là sử dụng thiết bị thật để giả lập một môi trường mạng gần giống như thực tế để đánh giá thử nghiệm, phương pháp này có ưu điểm hơn hẳn hai phương pháp mô hình và mô phỏng về tính chất giống thật, nhưng cũng có khó khăn do chi phí đầu tư thiết bị, chỉ giả lập một phần của mạng chứ không giống toàn bộ một mạng trong thực tế (do có nhiều thiết bị, nhiều người dùng).

Trong khuôn khổ bài báo này, chúng tôi sẽ sử dụng phương pháp mô phỏng và áp dụng để phân tích, đánh giá chất lượng trải nghiệm của dịch vụ dữ liệu đa phương tiện thông qua một số kịch bản truyền dữ liệu đa phương tiện trong mạng không dây.

Theo một số nghiên cứu đánh giá, so sánh các giải pháp phần mềm mô phỏng mạng (Khan và cs., 2012; Zhou & Tian, 2016) thì bộ công cụ mô phỏng ns-2 (VINT – Virtual Inter Network Testbed, 2011) là một trong những phần mềm được sử dụng rộng rãi nhất trong nhiều nghiên cứu thuộc lĩnh vực đánh giá hiệu năng và chất lượng mạng không dây với nhiều loại hình dữ liệu, do tính chất miễn phí, mã nguồn mở, được đông đảo cộng đồng nghiên cứu cùng tham gia trao đổi chia sẻ. Do được cộng đồng sử dụng nhiều nên ít nhiều việc mô phỏng bằng ns-2 có tính tin cậy cao.

Tuy nhiên, với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ mạng, đặc biệt là mạng không dây, các thiết bị đã trở nên rẻ hơn, bắt đầu có một số công cụ mô phỏng mạng mới hơn có thể tương tác phần nào với các thiết bị thật, ví dụ phần mềm ns-3 (nnsam, 2022). Các giải pháp như vậy có sự tin cậy tốt hơn ns-2, xét về ý nghĩa thực tế. Do vậy, nghiên cứu trong bài báo này sẽ sử dụng ns-3 để mô phỏng một số kịch bản nhằm đánh giá chất lượng trải nghiệm mạng không dây với dữ liệu đa phương tiện.

3. CÁC KỊCH BẢN MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Do việc phân phối đa phương tiện qua mạng internet ngày càng phổ biến, nhu cầu đảm bảo chất lượng hình ảnh và âm thanh được gửi đi cũng ngày càng tăng theo. Để đáp ứng những yêu cầu này cần có những công cụ hỗ trợ lập kế hoạch và đánh giá để có thể đưa ra những thiết kế mạng phù hợp. Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào việc tìm hiểu về chất lượng trải nghiệm mức độ hài lòng của người dùng trên mạng dữ liệu đa phương tiện và khai thác một module phần mềm mã nguồn mở mới là QoE Monitor phát triển bởi Saladino và cs., (2013) để dự đoán cách người dùng cuối sẽ tiếp nhận chất lượng video và/hoặc âm thanh. Trong phần này của bài báo, chúng tôi mô tả chi tiết về công cụ mô phỏng và một số kết quả đánh giá hiệu suất phát trực tuyến video, cũng như cho thấy sự hiệu quả của nó đối với phân tích chất lượng trải nghiệm. Module này hoạt động

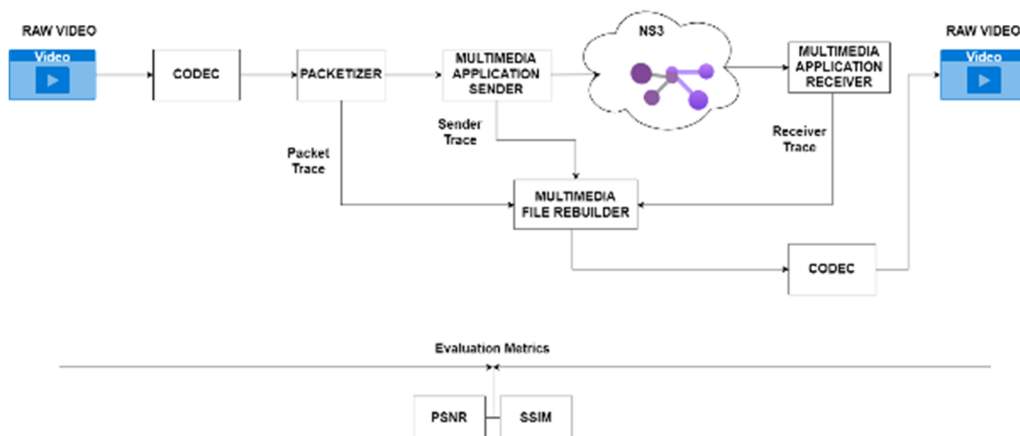
như một thành phần tích hợp vào bộ mô phỏng mạng ns-3 được phát triển để cung cấp một nền tảng mô phỏng mạng mở.

3.1. Thiết lập môi trường mô phỏng

Môi trường mô phỏng được chúng tôi xây dựng trên cấu hình phần cứng và phần mềm: máy tính Intel(R) Core(TM) i5-2540M CPU 2.60GHz RAM 8GB; hệ điều hành Ubuntu 12.04; phần mềm mô phỏng mạng ns-3.13 có cài thêm module QoE Monitor. Cần biên dịch lại mã nguồn ns-3 cũng như cài đặt thêm thư viện FFmpeg (FFmpeg, 2022) để xử lý các tệp video trong kịch bản mô phỏng.

3.2. Xây dựng kịch bản mô phỏng

Do việc phân phối đa phương tiện qua internet ngày càng lớn nên việc đảm bảo truyền tải nội dung âm thanh và video chất lượng cao ngày càng trở nên cần thiết. Trong quá trình xử lý và truyền tải video, quá trình mã hoá/ giải mã và truyền đi có thể tạo ra một số biến dạng hoặc tạo tác (artifacts) trong cả nội dung video và âm thanh đã nhận. Dựa vào lý do trên, dự án được phát triển bởi Saladino và cs., (2013) tập trung vào việc triển khai một framework hoàn chỉnh, cho phép đánh giá chất lượng video và âm thanh cảm nhận được bởi người dùng cuối bằng cách sử dụng các công cụ mô phỏng số và chi tiết hơn là định lượng tác động của mạng giao tiếp với một cấu hình cụ thể và của codec được sử dụng đến chất lượng của video và/hoặc âm thanh đã nhận.



Hình 1. Kịch bản mô phỏng

Hình 1 mô tả kiến trúc và thiết kế kịch bản mô phỏng. Nguyên lý hoạt động chung như sau:

- Với mục tiêu dự đoán xem video được truyền qua mạng mô phỏng sẽ được người xem cảm nhận như thế nào, một video thô tham chiếu (không nén) được mã hóa bằng codec cụ thể và gửi đi (H.264, với việc sử dụng FFmpeg).

- Video sau khi mã hoá được đóng gói bởi thành phần **Packetizer**, ngoài ra còn tạo ra truy vết gói chứa các thông tin sau: ID của gói, kích thước và dấu thời gian của gói.

- Các gói trên sẽ được truyền qua mạng mô phỏng được tạo bởi NS-3 bằng thành phần **MultimediaApplicationSender**. Thành phần này có nhiệm vụ tạo các gói tin theo giao thức Truyền Thời gian thực (RTP) để truyền theo luồng dữ liệu UDP và tạo ra một *truy vết* (trace file) gửi, chứa ID các gói và dấu thời gian (timestamp) tương ứng.

- Ở phía nhận, các gói tin được nhận bởi thành phần **MultimediaApplicationReceiver**, nó trích xuất thông tin tiêu đề của mỗi gói và tái tạo lại truy vết nhận chứa ID các gói và dấu thời gian tương ứng.

- Các truy vết gói, truy vết gửi và nhận được thành phần **MultimediaApplicationRebuilder** sử dụng để dựng lại video, thường sẽ có sự biến dạng nhất định. Chất lượng của video được tái tạo lại phụ thuộc vào số lượng gói đã được nhận và các thông số mạng như độ trễ gói, độ nhiễu (jitter) và tỉ lệ lỗi.

- Cuối cùng, video mới được tái tạo sẽ được giải mã và xuất ra ở bên nhận. Lúc này, có thể so sánh video nhận được với tham chiếu sử dụng các chỉ số **PSNR** và **SSIM** để đưa ra dự đoán về chất lượng video cảm nhận được, từ đó xác định ảnh hưởng của việc truyền video qua mạng mô phỏng.

Về các chỉ tiêu đánh giá chất lượng video, bài báo này sử dụng hai thông số là **PSNR** và **SSIM** là các chỉ số đánh giá chất lượng trải nghiệm phổ biến đặc biệt đối với loại hình dữ liệu đa phương tiện (Setiadi, 2021).

Tỉ số tín hiệu cực đại trên nhiễu (PSNR – Peak Signal-to-Noise Ratio) là một thuật ngữ kỹ thuật để chỉ tỷ lệ giữa công suất tối đa có thể của tín hiệu và công suất của nhiễu làm ảnh hưởng đến độ trung thực của biểu diễn tín hiệu. Bởi vì nhiễu tín hiệu có dải động rất rộng, PSNR thường được biểu thị dưới dạng đại lượng logarithmic trên thang đo decibel. PSNR thường được sử dụng để định lượng chất lượng tái tạo cho hình ảnh và video chịu nén mất dữ liệu (lossy).

Phép đo chỉ số tương đồng về cấu trúc (SSIM – Structural Similarity Index Measure) là một phương pháp để dự đoán chất lượng cảm nhận của truyền hình kỹ thuật số và điện ảnh, cũng như các loại hình ảnh và video kỹ thuật số khác. SSIM được sử dụng để đo mức độ giống nhau giữa hai hình ảnh. SSIM là một mô hình dựa trên nhận thức coi sự suy giảm hình ảnh là sự thay đổi thông tin cấu trúc được nhận thức, đồng thời kết hợp các hiện tượng cảm nhận quan trọng, bao gồm cả che độ sáng và che độ tương phản. Sự khác biệt với các kỹ thuật khác như MSE hoặc PSNR là các phương pháp này ước tính sai số tuyệt đối. Thông tin cấu trúc là ý tưởng cho rằng các pixel có sự phụ thuộc lẫn nhau mạnh mẽ, đặc biệt khi chúng gần nhau về mặt không gian. Những phụ thuộc này mang thông tin quan trọng về cấu trúc của các đối tượng trong cảnh trực quan. Che độ sáng (luminance masking) là hiện tượng mà các biến dạng hình ảnh (trong bối cảnh này) có xu hướng ít nhìn thấy hơn khi ở các vùng sáng, trong khi che độ tương phản (contrast masking) là hiện tượng mà các biến dạng trở nên ít nhìn thấy hơn ở những vùng có biến động đáng kể hoặc “kết cấu” trong hình ảnh.

Module QoE Monitor sử dụng hai lớp **PsnrMetric** và **SsimMetric** để tính toán hai chỉ số PSNR và SSIM nói trên.

Lớp **PsnrMetric** tính giá trị PSNR giữa video tham chiếu và video nhận, sau đó với video được tái dựng. Giá trị này có thể thay đổi từ 0 đến vô cùng (ở đây coi 99 là giá trị lớn nhất): giá trị càng lớn tương ứng với chất lượng càng cao. Với mỗi khung hình của từng video, thành phần này so sánh bằng cách tính

tỉ lệ tín hiệu – nhiễu từ đó rút ra sự khác biệt giữa hai khung hình. Điều này ngụ ý rằng chỉ số PSNR phân tích tất cả các vùng của video theo cùng một cách mà không tính đến việc mỗi vùng có tầm quan trọng trực quan khác nhau. Có thể kết luận rằng PSNR chỉ đơn giản là phát hiện lỗi giữa hai hình ảnh (phân tích bằng nhau các pixel tổng thể) mà không ước tính tất cả các đặc điểm nhận thức thực của con người: giá trị PSNR thấp có thể chủ quan tương ứng với một hình ảnh chất lượng cao.

Lớp **SsimMetric** đã được triển khai nhằm khắc phục các nhược điểm của PSNR được mô tả ở trên. Thước đo SSIM xem xét đến các đặc điểm của hệ thống thị giác con người (Human Visual System – HVS) để trích xuất thông tin cấu trúc hình ảnh (vì các pixel gần nhau về mặt không gian sẽ có tương quan chặt chẽ và có sự phụ thuộc lẫn nhau mạnh mẽ) và đặc biệt tái tạo tính năng này để dự đoán tốt hơn chất lượng video theo mắt người cảm nhận được. Giá trị SSIM có dải từ 0 đến 1: giá trị càng lớn tương ứng với chất lượng càng cao, với giá trị lớn hơn 0.9 đại diện cho sự khác biệt mắt người gần như không thấy được.

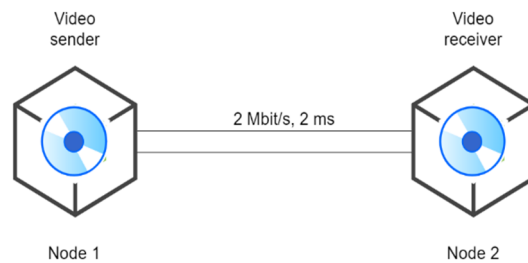
Đánh giá QoE thông qua chỉ số SSIM được đặc trưng bởi độ phức tạp tính toán lớn hơn PSNR, bởi vì cần sử dụng cửa sổ trượt kích thước $N \times N$ (thường là $N = 8$), được dịch từng pixel một từ góc trên trái đến góc dưới phải với mỗi khung hình. Do đó, lấy từng khung hình của hai video, đối với mỗi khối $N \times N$, SsimMetric tính giá trị trung bình, phương sai và hiệp phương sai của hai khối. Cuối cùng, chỉ số SSIM được tính toán.

Như vậy, với chỉ số SSIM, ta có thể định lượng được sự mất mát của thông tin cấu trúc hình ảnh, từ đó cung cấp một ước lượng gần đúng về độ biến dạng cảm nhận được của video.

3.3. Các kịch bản mô phỏng

3.3.1. Kịch bản 1: Phát video trực tuyến qua liên kết lossy

Kịch bản này gồm một mạng đơn giản với 2 nút kết nối với nhau bằng liên kết điểm – điểm (point-to-point) có tốc độ 2 Mbit/s, độ trễ 2 ms được thể hiện như Hình 2.



Hình 2. Phát video trực tuyến qua liên kết lossy

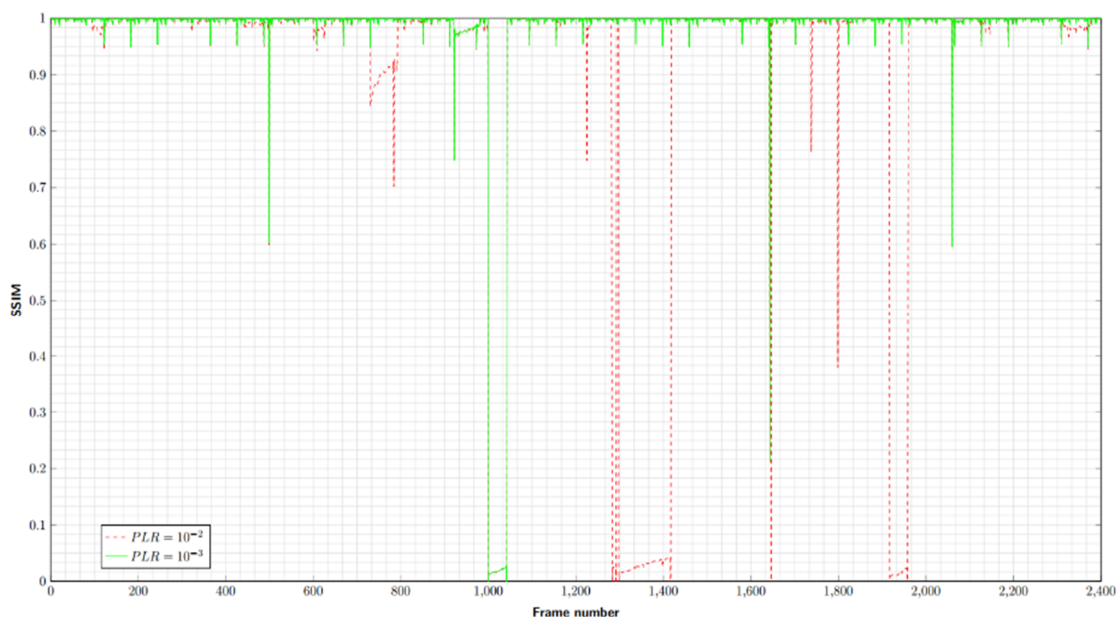
Mục tiêu của thiết lập này là hiển thị, trước hết trong một topology đơn giản, đánh giá QoE khách quan bằng số liệu PSNR và SSIM của một luồng video được mã hóa H.264 thông qua một liên kết lossy. Giá trị PacketLossRate của liên kết có thể thay đổi tùy ý phụ thuộc vào video và thời gian mô phỏng. Ở đây chọn PLR lần lượt là 10^{-2} và 10^{-3} để cung cấp các kết quả thống kê có ý nghĩa. Trong ns-3, các mô hình **Error Model** sau thường được liên kết với các mô hình **NetDevice**, được duy trì như một phần của module **network**: RateErrorModel, ListErrorModel, ReceiveListErrorModel, BurstErrorModel.

Các mô hình lỗi được sử dụng để đánh dấu rằng một gói nên được coi là bị lỗi, theo mô hình lỗi ngẫu nhiên thống kê hoặc thực nghiệm. Có hai loại mô hình lỗi được cung cấp là:

- Mô hình ngẫu nhiên thống kê (stochastic model): Trong trường hợp này, các gói bị lỗi theo một biến phân phối ngẫu nhiên. Ví dụ: RateErrorModel.

- Mô hình thực nghiệm (empirical model): Các gói bị lỗi theo một mô hình quy định cụ thể. Ví dụ: ListErrorModel cho phép người dùng chỉ định danh sách các gói bị lỗi bằng cách liệt kê UID cụ thể.

Lớp **ns3::RateErrorModel** làm lỗi các gói theo một biến phân phối ngẫu nhiên, theo mặc định là một biến UniformRandomVariable có giá trị phân phối giữa 0.0 và 1.0. Tốc độ lỗi và đơn vị lỗi (bit, byte hoặc gói) được người dùng đặt. Chẳng hạn, bằng cách đặt **ErrorRate = 0.1** và **ErrorUnit = "EU_PKT"** thì trung bình khoảng 10% các gói tin sẽ bị mất.



Hình 3. Kết quả SSIM với PLR khác nhau

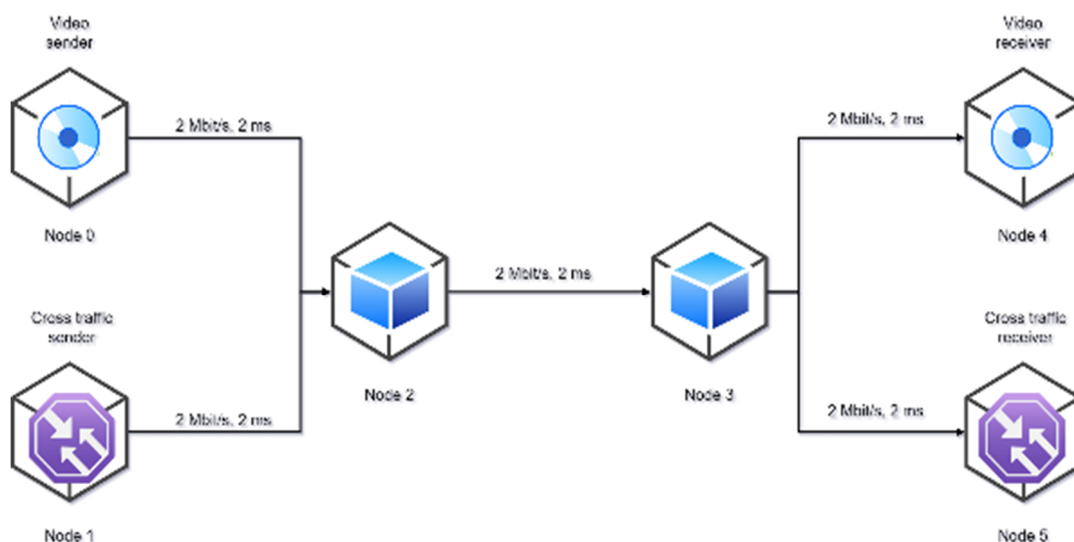
Nhìn kết quả mô phỏng ở trên, có thể thấy, số liệu PSNR và SSIM khác nhau đối với hai trường hợp, điều này cho thấy rõ ràng rằng trường hợp đầu tiên khi $PLR = 0.001$ sẽ có trải nghiệm QoE tốt hơn nhiều so với trường hợp thứ hai $PLR = 0.01$.

3.3.2. Kịch bản 2: Phát video trực tuyến với sự hiện diện của lưu lượng truy cập chéo (cross-traffic)

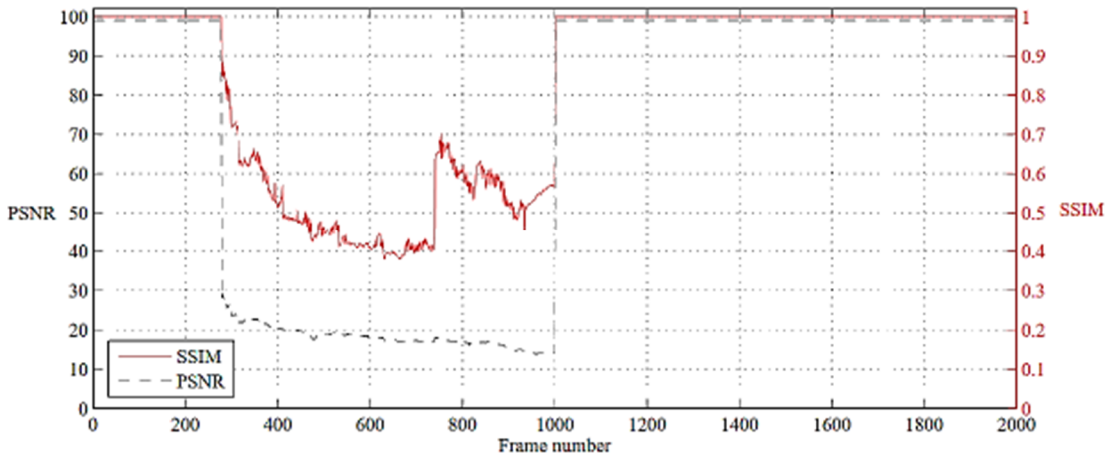
Kịch bản này gồm một mạng phức tạp

hơn với 6 nút kết nối với nhau bằng liên kết điểm – điểm (point-to-point) có tốc độ 2 Mbit/s, độ trễ 2 ms được thể hiện như trong Hình 4. Trong đó: Node 0 là nút gửi video và Node 4 là nút nhận; Node 1 chứa một nguồn cross-traffic đơn giản và Node 5 là nút nhận tương ứng.

Với thiết lập trên có thể đánh giá chất lượng đường truyền với sự hiện diện của lưu lượng truy cập chéo.



Hình 4. Phát video trực tuyến với sự hiện diện của cross-traffic



Hình 5. PSNR và SSIM với kịch bản lưu lượng UDP chéo

Kết quả mô phỏng kịch bản 2 được thể hiện trong Hình 5. Trong đó, ảnh hưởng của nguồn lưu lượng chéo UDP đối với QoE mà người dùng cảm nhận. Có thể thấy, sự hiện diện của lưu lượng truy cập chéo (cross-traffic) rất lớn làm tăng đột ngột tỷ lệ mất gói, tương quan với việc QoE giảm đột ngột.

Như vậy, qua các kết quả trình bày ở trên, có thể thấy QoE Monitor (Saladino và cs., 2013) là một công cụ linh hoạt, có thể khai thác để thực hiện đánh giá chất lượng trải nghiệm (QoE) đa dạng trên các mạng khác nhau. Các kết quả thu được bằng cách mô phỏng các tình huống đơn giản được xem xét đã chứng minh tính hợp lệ của module QoE này, để dự đoán chính xác chất lượng mà người xem cảm nhận được, biến nó thành một công cụ hữu ích để giúp thiết kế các mạng truyền thông video hiệu quả.

4. KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ bài báo, chúng tôi đã tìm hiểu về vấn đề chất lượng trải nghiệm (QoE) đối với truyền dữ liệu đa phương tiện trên mạng không dây. Nghiên cứu cũng triển khai đánh giá hai kịch bản mô phỏng theo module QoE của Saladino và cs. (2013). Kết quả cho thấy sự hợp lệ của module này khi đánh giá tệp video được mã hóa và truyền trong các tình huống khác nhau, có thể tương ứng với nhận thức thực của mắt người, rất phù hợp cho việc đánh giá QoE.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được thực hiện một phần trong khuôn khổ đề tài VAST01.09_22-23 của Viện Công nghệ thông tin (Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- FFmpeg. (2022). *A complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video*. <https://ffmpeg.org/>
- IEEE. (2012). *IEEE Standards Association*. IEEE Standards Association. <https://standards.ieee.org>
- ITU. (2008). *E.800: Definitions of terms related to quality of service*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>
- ITU. (2020). *P.10: Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.10>
- Khan, A. R., Bilal, S. M., & Othman, M. (2012). A performance comparison of open source network simulators for wireless networks. *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 34–

38. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.-2012.6487111>
- nsnam. (2022). *Network Simulator Ns-3*. <https://www.nsnam.org/>
- Saladino, D., Paganelli, A., & Casoni, M. (2013). A tool for multimedia quality assessment in NS3: QoE Monitor. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 32, 30–41. <https://doi.org/10.-1016/j.simpat.2012.11.011>
- Setiadi, D. R. I. M. (2021). PSNR vs SSIM: Imperceptibility quality assessment for image steganography. *Multimedia Tools and Applications*, 80(6), 8423–8444. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10035-z>
- VINT – Virtual Inter Network Testbed. (2011). *The Network Simulator—Ns-2*. <https://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- Zhou, X., & Tian, H. (2016). Comparison on Network Simulation Techniques. *2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT)*, 313–316. <https://doi.org/10.1109/PD-CAT.2016.073>