

ĐỊNH TUYẾN QoS SỬ DỤNG THÔNG TIN NỘI BỘ ĐẢM BẢO TRỄ END-TO-END

Nguyễn Chiến Trinh*, Nguyễn Thị Thu Hằng*

* Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Tóm tắt: Định tuyến QoS đảm bảo các chỉ tiêu trễ đầu cuối cho các ứng dụng Internet là một trong những giải pháp đảm bảo chất lượng dịch vụ quan trọng, đặc biệt là cho các ứng dụng thời gian thực như đa phương tiện. Trong thời gian gần đây định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ đã được đề xuất với nhiều ưu thế so với định tuyến truyền thống sử dụng thông tin toàn cục trên mạng IP. Giải pháp này giảm được quá trình duy trì, giám sát thông tin tại các nút mạng, nâng cao hiệu năng định tuyến. Định tuyến QoS với đảm bảo trễ đòi hỏi tìm đường truyền đầu cuối đáp ứng các ràng buộc về trễ end-to-end, thường là bài toán khó hơn đảm bảo băng thông chỉ liên quan đến yêu cầu của từng liên kết. Trong bài báo này đề xuất giải thuật định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ đảm bảo trễ (Localized Delay-Constrained QoS Routing - LDCQR) kết hợp dự báo trễ (Delay Prediction - DP) đảm bảo chỉ tiêu trễ đầu cuối trong suốt thời gian tồn tại luồng lưu lượng với độ chính xác và cải thiện hiệu năng. Giải thuật LDCQR-DP được kiểm chứng thông qua mô phỏng số, khẳng định hiệu quả định tuyến QoS và tỉ lệ đảm bảo trễ yêu cầu.

Từ khóa: Định tuyến QoS, trễ đầu cuối, định tuyến sử dụng thông tin nội bộ, dự báo trễ.

I. GIỚI THIỆU

Trên Internet các dịch vụ khác nhau được triển khai với các yêu cầu khác nhau. Các dịch vụ này yêu cầu các ràng buộc xác định bằng các chỉ tiêu QoS như băng thông, độ trễ. Giải thuật định tuyến đóng vai trò then chốt để đáp ứng các ràng buộc này bằng cách thỏa mãn chỉ tiêu QoS trên đường định tuyến được chọn khi truyền luồng lưu lượng từ nguồn đến đích. Đảm bảo QoS cho luồng nghĩa là đảm bảo chỉ tiêu QoS không vượt quá ngưỡng cho trước [1]. Do vậy định tuyến QoS về bản chất là tìm đường có đủ tài nguyên đáp ứng các ràng buộc QoS. Với mục tiêu nâng cao hiệu năng mạng truyền thông và đảm bảo chất lượng dịch vụ, đặc biệt là các ứng dụng thời gian thực như đa phương tiện liên quan đến thoại, video, âm thanh, hình ảnh, định tuyến QoS đảm bảo các chỉ tiêu trễ đầu cuối là một trong những vấn đề phải giải quyết. Quá trình định tuyến thường bao gồm hai giai đoạn: thu thập thông tin trạng thái mạng tại thời điểm xác định và tìm các thông tin trạng thái cho đường khả dụng đáp ứng yêu cầu QoS. Việc tìm đường khả dụng đáp ứng yêu cầu QoS chủ yếu phụ thuộc vào việc thông tin trạng thái được thu thập như thế nào và lưu giữ ở đâu. Dựa trên thông tin được duy trì, xử lý và đường định tuyến được chọn như thế nào, quá trình định tuyến thường

được phân loại định tuyến nguồn, định tuyến phân tán và định tuyến phân cấp.

Các ứng dụng thời gian thực thường có các yêu cầu chất lượng dịch vụ nghiêm ngặt, được thỏa thuận giữa nhà cung cấp và người sử dụng. Các ứng dụng nhạy cảm trễ, như đa phương tiện, yêu cầu dòng lưu lượng phải đến đích trong giới hạn thời gian nhất định (trễ end-to-end). Đảm bảo QoS là một vấn đề rất nan giải do trên mạng có nhiều loại ứng dụng với các đặc tính lưu lượng khác nhau hoặc tích hợp nhiều loại dịch vụ. Trong các giải pháp định tuyến sử dụng thông tin toàn cục, thông tin trạng thái toàn mạng sử dụng để tính toán định tuyến phải được giám sát tại mỗi nút mạng và phải cập nhật liên tục. Tuy nhiên, do cấu trúc mạng và khả năng sẵn sàng của tài nguyên luôn thay đổi, duy trì giám sát trạng thái mạng chính xác là không thể thực hiện, ngoài ra giải pháp này còn tạo thêm lưu lượng đáng kể cũng như làm phức tạp quá trình xử lý trên mạng. Mặt khác, quyết định định tuyến được tiến hành mà không xem xét đến trạng thái mới nhất của tài nguyên mạng có thể dẫn đến việc định tuyến trên đường không thỏa mãn các yêu cầu QoS [1]. Do vậy, có thể dẫn đến giảm hiệu năng mạng và các tuyến khác có đủ tài nguyên nhưng lại không được sử dụng.

Khác với các giải pháp định tuyến QoS sử dụng thông tin toàn cục, gần đây các giải pháp định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ [2-4] đã được đề xuất để khắc phục vấn đề phải duy trì và giám sát thông tin trạng thái tại mỗi nút mạng. Tại các nút mạng, các giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ lấy thông tin thông kê (thu thập qua quá trình định tuyến và truyền luồng) tại nút mạng đó, và từ đó tính toán, đưa ra quyết định định tuyến. Giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ giúp giảm khối lượng tính toán tuyến truyền tại các nút mạng, giảm thiểu bộ nhớ dành cho các bảng định tuyến, cũng như giảm khối lượng bản tin cập nhật trạng thái định kỳ như trong các giải thuật định tuyến toàn cục truyền thống, đồng thời hỗ trợ việc tính toán tập trung, điều khiển phân tán trên toàn mạng.

Ràng buộc QoS thường là ràng buộc kết nối hoặc ràng buộc đường định tuyến. Ràng buộc kết nối giới hạn sử dụng tài nguyên kết nối khi lựa chọn đường định tuyến, ví dụ như băng thông phải lớn hơn hoặc bằng giá trị xác định cho kết nối trên đường định tuyến khả dụng. Định tuyến với ràng buộc kết nối thường thực hiện trực tiếp và dễ dàng hơn do đường định tuyến có kết nối không thỏa mãn điều kiện ràng buộc sẽ bị loại bỏ. Mặt khác, ràng buộc đường định tuyến là tổng hợp các số đo trên toàn bộ đường không được vượt quá một giới hạn, như trễ end-to-end của luồng lưu lượng trên đường định tuyến không được vượt quá giá

Tác giả liên hệ: Nguyễn Chiến Trinh,

Email: chientrinh@gmail.com

Đến tòa soạn: 9/2020, chỉnh sửa: 10/2020, chấp nhận đăng: 12/2020

trị xác định. Trễ là tham số có tính cộng, trễ end-to-end bao gồm trễ trên tất cả các kết nối của đường truyền cộng với trễ tại các nút mạng. Vì trễ là ràng buộc đường định tuyến, tìm đường khả dụng sẽ khó khăn hơn so với định tuyến ràng buộc băng thông và là bài toán NP khó.

Trong bài báo này đề xuất giải thuật định tuyến nguồn sử dụng thông tin nội bộ đảm bảo trễ đầu cuối trung bình trên chu kỳ thời gian tùy ý cho luồng dữ liệu, đạt được độ chính xác cũng như cải thiện hiệu năng định tuyến. Bài báo được bố cục như sau, Phần II giới thiệu các kỹ thuật cơ bản của định tuyến sử dụng thông tin nội bộ cũng như khảo sát các công trình nghiên cứu liên quan tiếp cận định tuyến QoS với ràng buộc trễ end-to-end. Phương pháp tính trễ đầu cuối áp dụng trong giải thuật định tuyến được đưa ra trong Phần III. Giải thuật định tuyến QoS đề xuất LDCQR-DP đảm bảo trễ end-to-end được trình bày trong Phần IV. Các đánh giá thông qua mô phỏng số khẳng định tính hiệu quả và đóng góp của giải thuật đề xuất được đưa ra trong Phần V. Cuối cùng là Kết luận và các thảo luận.

II. CÁC CÔNG TRÌNH LIÊN QUAN

Đối với các giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ, nút nguồn cố gắng suy luận trạng thái mạng từ các thông kê luồng nội bộ và chọn tuyến truyền từ nguồn đến đích [2-4]. Mỗi nút mạng duy trì một tập xác định trước các tuyến ứng cử đến tất cả các nút. Hai phương pháp chọn đường cơ bản trong định tuyến sử dụng thông tin là Proportional Sticky Routing (PSR) [4] và Credit Based Routing (CBR) [5]. Việc chọn đường từ tập các ứng cử đóng vai trò then chốt ảnh hưởng đến hiệu năng định tuyến, và phải tối ưu giữa độ dài tuyến, cân bằng tải, và chỉ tiêu QoS yêu cầu.

Để đảm bảo mức QoS trên mạng, giải thuật định tuyến QoS phải truyền lưu lượng yêu cầu từ nguồn đến đích trên tuyến thỏa mãn các ràng buộc QoS. Quá trình định tuyến thường bao gồm chọn tuyến thích hợp cho mỗi luồng, thiết lập điều khiển chấp nhận (admission control) để kiểm tra tính sẵn sàng của tài nguyên mạng và cuối cùng là dự trữ tài nguyên như băng thông cần thiết trong suốt chu kỳ tồn tại của luồng. Nhiệm vụ chủ yếu của giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ là phân bổ các luồng đến nút trên các tuyến của tập ứng cử. Nút nguồn có thể đánh giá chất lượng truyền luồng thông qua phản hồi từ các luồng được truyền trước đó và thông tin thông kê tại nút. Do trạng thái mạng thay đổi liên tục, dự đoán chất lượng các tuyến cũng phải thay đổi thích nghi, phản ánh kịp thời chất lượng của tuyến truyền.

Các ứng dụng khác nhau yêu cầu các ràng buộc QoS khác nhau, như trễ đầu cuối, thông lượng hay băng thông cho các luồng lưu lượng đến. Các nghiên cứu định tuyến QoS thường tập trung đảm bảo băng thông QoS hoặc các điều kiện liên quan đến thông lượng [6-9]. Mỗi luồng lưu lượng đến yêu cầu một lượng băng thông sẵn sàng để luồng truyền trên mạng. Nếu lượng băng thông này sẵn sàng trên đường định tuyến được chọn, thì luồng được chấp nhận và QoS được đảm bảo.

Đối với các ứng dụng thời gian thực, trễ đầu cuối là tiêu chí QoS quan trọng nhất. Trễ end-to-end của đường định tuyến xem xét ở đây là trễ trung bình đo trên khoảng thời gian nhất định. Các giải thuật định tuyến đảm bảo trễ end-to-end [9, 10] giải quyết cả hai vấn đề: đảm bảo các ràng buộc trễ đầu cuối trên đường định tuyến và tối ưu định tuyến. Tối ưu định tuyến là tìm đường thỏa mãn các điều kiện QoS đồng thời tối thiểu tỉ lệ nghẽn luồng quan sát trên

nút nguồn. Khi một luồng dữ liệu đến, một tuyến truyền được lựa chọn từ tập ứng cử theo tiêu chí nhất định của giải thuật, ví dụ giá trị trung bình của trễ đầu cuối thấp nhất sẽ được chọn [10], hay tuyến có tỉ lệ nghẽn luồng thấp nhất được chọn [9]. Giá trị thông kê đánh giá tuyến được xem như là thước đo của chất lượng tuyến truyền và là tiêu chí chọn đường từ tập các tuyến ứng cử.

Để kiểm tra ràng buộc trễ QoS của tuyến được chọn, định tuyến QoS sử dụng bản tin kiểm tra đo trễ QoS trên tuyến. Bản tin được truyền qua tất cả các nút của tuyến và cập nhật thông tin QoS tuyến được chọn, sau đó phản hồi về nút nguồn. Do vậy, có thể thấy tuyến được chọn chỉ được đánh giá dựa trên giá trị trễ tức thời được đo bằng bản tin kiểm tra, không phản ánh được giá trị trễ trung bình mong muốn của tuyến trên toàn bộ khoảng thời gian tồn tại của luồng. Đồng thời do sự thay đổi liên tục của trạng thái mạng, trễ tức thời đo được không thể phản ánh chính xác trễ end-to-end trong khoảng thời gian tiếp theo khi chấp nhận truyền luồng yêu cầu. Việc sử dụng bản tin kiểm tra trong quá trình định tuyến cũng làm tăng thêm lưu lượng dư thừa trên mạng. Giải thuật đề xuất trong bài báo này sử dụng phương pháp dự báo trễ end-to-end trung bình trong chu kỳ độ dài bất kỳ sẽ giải quyết vấn đề còn tồn tại này, đảm bảo độ chính xác khi tiến hành kiểm tra ràng buộc QoS và không làm tăng thêm lưu lượng mạng, nâng cao được hiệu năng của định tuyến QoS.

III. DỰ BÁO TRỄ END-TO-END

Với mục tiêu đảm bảo các tham số trễ đầu cuối cho luồng lưu lượng, cơ sở của giải thuật định tuyến QoS đảm bảo trễ LDCQR-LP, trong phần này thiết lập bài toán kiểm soát và dự báo trễ end-to-end cho các tuyến truyền trên mạng. Phương pháp dự báo trễ end-to-end cho tuyến đưa ra trong phần này là ý tưởng hoàn toàn mới và lần đầu tiên được áp dụng vào các giải thuật định tuyến QoS.

A. Mô hình định tuyến đảm bảo trễ đầu cuối

Xét trên một đường định tuyến có L liên kết giữa hai nút mạng đầu S_S và nút mạng cuối S_D và các nút mạng (hop) trung gian S_l , với $(l=1, \dots, L-1)$. Như vậy trễ đầu cuối D_i của gói tin i xét tại thời điểm bất kỳ của tuyến được tính bằng

$$D_i = \sum_{p=1}^{L-1} D_i^p + D_p \quad (1)$$

Trong đó D_i^l là trễ tại nút S_l , D_p là trễ truyền lan của gói tin trên tuyến. Trễ truyền lan D_p được xem như một hằng số đối với tuyến truyền xác định, còn trễ D_i^l bao gồm ba thành phần chính: trễ hàng đợi phụ thuộc vào trạng thái của mạng, được tính trên độ dài hàng đợi bộ đệm, trễ xử lý và trễ truyền dẫn là đại lượng thường không đáng kể, và có thể được tính như một hằng số tại nút mạng xác định. Trong các phân tích và nghiên cứu về hệ thống viễn thông kinh điển đã chỉ ra rằng trễ hàng đợi tại một nút mạng là một biến ngẫu nhiên ổn định có các tham số và phân bố phụ thuộc vào mô hình lưu lượng đến, độ dài bộ đệm và tốc độ truyền thông liên kết đầu ra. Do vậy, có thể xem xét đại lượng D_i^l như một biến ngẫu nhiên với phân bố xác định, dẫn đến D_i cũng sẽ là một biến ngẫu nhiên ổn định, có cùng phân bố cho tất cả gói tin i thuộc cùng một tuyến. Trong phương pháp định tuyến QoS dựa trên phân tích tại từng nút mạng trung gian, các tham số trễ D_i^l được tính toán dựa trên hệ thống hàng đợi với các mô hình lưu lượng đầu vào xác định. Đã có rất nhiều các kết quả nghiên cứu cho các mô hình lưu lượng khác nhau (mô hình Poisson, lưu lượng phụ thuộc trường kỳ, ...) đưa ra phân bố trễ và tính toán các

tham số trễ, mất gói, ... Một hạn chế của phương pháp này là phải biết được mô hình và các tham số lưu lượng mạng, đòi hỏi số liệu thống kê lớn và khó đạt được trên mạng hỗn tạp hiện nay. Đồng thời, đây cũng là phương thức sử dụng thông tin toàn cục để tính toán trễ, không phù hợp với giải pháp định tuyến sử dụng thông tin nội bộ. Phương pháp thứ hai dựa trên các phép đo và thử nghiệm, D_i được đo trực tiếp bằng các mẫu thử, tránh được các tính toán phức tạp, tuy nhiên làm tăng tải mạng và chỉ có được các số đo tại một số thời điểm trong quá khứ làm cơ sở lựa chọn định tuyến, không có được phân bố cũng như các tham số khác của biến ngẫu nhiên trễ đầu cuối D_i , do vậy không đạt được độ chính xác cao và không thỏa mãn được các tham số trễ khác (như biến thiên trễ, tỉ lệ trễ vượt giới hạn, ...).

Để có được các quyết định lựa chọn đường định tuyến hiệu quả đảm bảo trễ end-to-end, các tác giả đề xuất phương pháp dự báo trễ cho các luồng lưu lượng đầu cuối sử dụng lý thuyết giá trị vượt trội (extreme values), đảm bảo tham số trễ cho luồng trong suốt thời gian tồn tại của luồng. Phương thức dự báo trễ này chỉ sử dụng các thông tin thống kê, thu thập tại nút nguồn, do vậy có thể áp dụng cho các giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ đảm bảo chỉ tiêu trễ QoS.

B. Phân tích trễ đầu cuối sử dụng phương pháp đường bao

Xem xét luồng dữ liệu bao gồm các gói tin được đánh số thứ tự $i=0,1,2,\dots$. Tại thời điểm xem xét t , gói tin cuối cùng đã đến đích là n . Giả sử dòng gói tin trên tuyến xác định có độ dài đủ lớn $n > MK$, thiết lập M các nhóm liên tiếp bao gồm K gói tin, bắt đầu từ gói tin $n-MK$, trên mỗi nhóm lấy giá trị trễ lớn nhất của nhóm

$$Dmax_m = \max_{n-(M-m)K \leq i \leq n-(M-m+1)K} D_i \text{ với } m=1,2,\dots \quad (2)$$

Trễ cực đại $Dmax_m$ trong nhóm K gói tin liên tiếp là giá trị trễ lớn nhất từ K mẫu của cùng phân bố trễ đầu cuối D_i , tạo thành hàm đường bao của trễ đầu cuối. Giả sử các biến ngẫu nhiên D_i không phụ thuộc, xuất phát từ lý thuyết giá trị vượt trội hàm phân bố của $Dmax_m$ ($m=1,2,\dots$) có thể được biểu diễn qua hàm phân bố F của D_i như sau [6]:

$$F_{max}(x) = F^K(x) \quad (3)$$

Và nếu có được phân bố của $Dmax_m$ có thể suy ngược lại hàm phân bố D_i ,

$$F(x) = [F_{max}(x)]^{1/K} \quad (4)$$

Các số đo thống kê và phân tích cũng chỉ ra rằng trễ đầu cuối D_i có các đặc tính phụ thuộc chủ yếu vào thành phần trễ hàng đợi, là biến ngẫu nhiên có phân bố được ước lượng tương đối chính xác bằng các hàm heavy-tailed như Gamma, Weibull, Pareto, ... [11,12]. Điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết và phân tích hệ thống hàng đợi tại các bộ định tuyến với bản chất của lưu lượng mạng Internet dạng phụ thuộc trường kì (long-range dependent) [13-15]. Trong [16], đối với phần lớn các dạng phân bố thường gặp như Gamma, log-normal, Gaussian, ... đều cho kết quả ước lượng phân bố của biến cực đại là Gumbel (hay còn gọi là phân bố giá trị vượt trội tổng quát - loại I) với lựa chọn giá trị cực đại trong số lượng K mẫu là lớn. Phương pháp ước lượng giá trị cực đại của biến ngẫu nhiên bất kì bằng phân bố Gumbel đã từng được sử dụng và cho kết quả khá chính xác trong các ứng dụng khác nhau, như để ước lượng giá trị cực đại lưu lượng mạng [17,18]. Ưu điểm lớn nhất khi ước lượng $Dmax_m$ bằng phân bố Gumbel là cho phép tìm

được đặc tính của giá trị cực đại mà không cần mô hình hóa hay thống kê để biết được phân bố biến ngẫu nhiên trễ gói tin D_i , thường đòi hỏi lượng lớn dữ liệu và tính toán phức tạp, và không khả thi trong điều kiện mạng có dung lượng lớn. Do vậy, có thể biểu diễn hàm phân bố $Dmax_m$

$$F_{max}(x) = P[Dmax_m < x] = e^{-e^{-(x-\mu)/\beta}} \quad (5)$$

Trong đó tham số μ (location) và đó β (scale) liên hệ với giá trị trung bình và độ lệch chuẩn như sau

$$E[Dmax_m] = \mu + \lambda\beta, \quad (6)$$

$\lambda \approx 0.5772$ là hằng số Euler-Mascheroni

$$\sigma = \frac{\beta\pi}{\sqrt{6}} \quad (7)$$

Như vậy để xác định hàm phân bố $F(x)$ của D_i , chỉ cần ước tính các tham số μ và β từ giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của $Dmax_m$, xác định $F_{max}(x)$ và áp dụng (4). Trong mục sau, các tham số này sẽ được dự báo cho từng nhóm K gói tin trong từng khoảng thời gian tiếp theo sử dụng các số liệu thống kê trễ đầu cuối thu thập từ các mẫu trong quá khứ tại các nút mạng đầu cuối.

C. Dự báo các tham số trễ cực đại

Dự báo các tham số của một biến ngẫu nhiên dựa trên các mẫu có thể sử dụng một số phương pháp khác nhau, tuy nhiên các tác giả lựa chọn kỹ thuật dự báo tuyến tính đơn giản với độ phức tạp tính toán không lớn, đảm bảo tính khả thi và tính thời gian thực khi áp dụng trên mạng [19]. Tại thời điểm t , từ M mẫu trễ cực đại đầu cuối đã được thu thập từ M nhóm gói tin trong quá khứ $Dmax_m$ ($m=1,2,\dots,M$), chúng ta sẽ ước lượng các tham số của biến trễ cực đại $Dmax_{M+1}$ cho nhóm K gói tin tiếp theo. Trước hết tính giá trị trung bình thống kê của $Dmax_m$

$$\bar{Dmax} = \frac{\sum_{j=1}^M Dmax_j}{M} \quad (8)$$

Thiết lập hàm số tương quan của $Dmax_m$

$$Cor(i) = E[Dmax_j Dmax_{j+i}] \text{ với } j=1,2,\dots,M-i. \quad (9)$$

Với $E[\cdot]$ là hàm lấy giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên. Hàm tương quan có thể được ước lượng từ các mẫu của $Dmax_m$ như sau

$$Cor(i) = \frac{\sum_{j=1}^{M-i} Dmax_j Dmax_{j+i}}{M-i} \quad (10)$$

Giá trị trung bình của $Dmax_{M+1}$ có thể được tính bằng

$$\widehat{Dmax}_{M+1} = \bar{Dmax} + \Gamma_2 \Gamma_1^{-1} \Psi \quad (11)$$

Trong đó

$$\Gamma_2 = [\gamma_{1,M}, \gamma_{2,M}, \dots, \gamma_{M,M}];$$

Γ_1 là ma trận $M \times M$ có các phần tử $\gamma_{i,j}$;

$$\Psi = [Dmax_M - \bar{Dmax}, Dmax_{M-1} - \bar{Dmax}, \dots, Dmax_1 - \bar{Dmax}]^T$$

$$\gamma_{i,j} = Cor(i-j) - (\bar{Dmax})^2$$

Phương sai lỗi của ước lượng giá trị trung bình \widehat{Dmax}_{M+1} cũng chính là phương sai của biến ngẫu nhiên $Dmax_{M+1}$

$$\widehat{\sigma}_{max_{M+1}}^2 = \sigma_{max}^2 + \Gamma_2 \Gamma_1^{-1} \Gamma_3 \quad (12)$$

Trong đó

$$\sigma_{max}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Dmax_i - \bar{Dmax}]^2$$

$$\Gamma_3 = [\gamma_{M,1}, \gamma_{M,2}, \dots, \gamma_{M,M}]^T$$

D. Dự báo các tham số trễ end-to-end

Trên cơ sở ước lượng đường bao trễ và xác định phân bố trễ đầu cuối cho một tuyến bất kì dựa trên số liệu trễ thống kê tại tuyến, các tham số trễ của tuyến được dự báo như sau. Giả sử tại thời điểm t xuất hiện yêu cầu định tuyến cho một luồng lưu lượng có độ dài bất kì. Chia luồng lưu lượng thành các đoạn có độ dài K gói tin và dự báo trễ đầu cuối trung bình cũng như jitter cho từng đoạn dữ liệu này:

- Thống kê KM mẫu trễ đầu cuối trước thời điểm t cho tuyến đường ứng viên từ nút mạng nguồn S_s đến nút mạng cuối S_D ;
- Từ MK mẫu trễ đầu cuối lấy M mẫu trễ cực đại trong mỗi nhóm K gói tin liên tiếp $Dmax_m$;
- Đối với tuyến xem xét p , dự báo giá trị trung bình và phương sai trễ cực đại $Dmax_{M+1}$ của K gói tin tiếp theo;
- Xác định phân bố $Dmax_{M+1}$ theo (5) với các tham số được tính từ (6) và (7);
- Ước lượng phân bố trễ đầu cuối D_i của K gói tin của đoạn dữ liệu yêu cầu (4);
- Ước lượng các tham số trễ cơ bản của đoạn dữ liệu yêu cầu

- 1) Giá trị trễ trung bình:

$$E[D_i] = \int_0^{\infty} x dF(x) \tag{13}$$

- 2) Độ lệch chuẩn của trễ đầu cuối:

$$(E[D_i^2] - E^2[D_i])^{1/2} = (\int_0^{\infty} x^2 dF(x) - E^2[D_i])^{1/2} \tag{14}$$

- 3) Tỷ lệ trễ vượt ngưỡng D_{QoS} cho trước:

$$P[D_i > D_{QoS}] = 1 - F(D_{QoS}) \tag{15}$$

Độ phức tạp tính toán của giải thuật ước lượng trễ được quyết định bởi các giải thuật dự báo tuyến tính tham số trễ cực đại, phụ thuộc vào số lượng mẫu dự báo M , do vậy có bậc là $O(M^2)$.

IV. GIẢI THUẬT ĐỊNH TUYẾN LDCQR-DP

Mục tiêu của giải thuật LDCQR-DP là đảm bảo trễ QoS end-to-end từ khía cạnh người sử dụng và đồng thời tối ưu tỉ lệ nghẽn mạng từ khía cạnh mạng. LDCQR-DP là giải thuật định tuyến nguồn, nút nguồn sẽ tính toán lựa chọn tuyến đường khả thi nhất có thể đáp ứng các điều kiện QoS của luồng. Dựa trên các thông tin trạng thái thu thập được tại nút mạng, LDCQR-DP tiến hành dự báo trễ end-to-end trung bình trên khoảng thời gian tồn tại của luồng yêu cầu để quyết định lựa chọn tuyến truyền.

Cũng như tất cả các giải thuật định tuyến sử dụng thông tin nội bộ, tại mỗi nút nguồn LDCQR-DP phải duy trì một tập các đường ứng cử cho mỗi cặp nguồn-đích. Phương pháp chọn các đường ứng cử có thể sử dụng giống như áp dụng trong CBR và các giải thuật đã đề xuất [5-9]. Tập ứng cử giữa cặp nguồn-đích thường bao gồm các tuyến có độ dài $minhop$ và $(minhop+1)$. Trễ trung bình end-to-end trên mỗi tuyến ứng cử (được dự báo từ công thức (13) Phần III)

được sử dụng như tiêu chí cho quá trình lựa chọn tuyến. Mỗi khi có luồng mới đến, tuyến đường với trễ end-to-end trung bình dự báo nhỏ nhất sẽ được chọn để truyền luồng yêu cầu. Như vậy, trễ end-to-end trung bình dự báo được sử dụng như tiêu chí đánh giá chất lượng của tuyến ứng cử trong thời gian sử dụng truyền luồng, đáp ứng tham số QoS luồng yêu cầu được truyền. Do vậy đảm bảo được tính chính xác khi đảm bảo trễ QoS cho luồng khi truyền trong thời gian tiếp theo, khác với các phương pháp trước đây [9,10], chỉ có thể sử dụng các tham số trễ quá khứ được đo bằng các gói thử nghiệm, để đánh giá, lựa chọn, và kiểm tra đường định tuyến. Ngoài ra, sử dụng tiêu chí chọn đường với trễ dự báo nhỏ nhất có thể đảm bảo tuyến được chọn là khả thi nhất để đảm bảo trễ luồng yêu cầu, do đó cũng đảm bảo khả năng nghẽn luồng có thể xảy ra là thấp nhất. Đồng thời mỗi lần định tuyến, các thông tin về trễ của luồng cũng sẽ được thống kê để sử dụng như các thông tin trạng thái đánh giá chất lượng tuyến và cập nhật số liệu cho các dự báo tiếp theo.

Với phương pháp dự báo và chọn tuyến như vậy, LDCQR-DP sẽ tránh được quá trình kiểm tra chất lượng tuyến được chọn, thực hiện bằng các bản tin kiểm tra như trong các giải thuật định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ truyền thống [9,10]. Do vậy giảm được độ trễ định tuyến, độ phức tạp của quá trình định tuyến, cũng như lưu lượng đánh giá trạng thái mạng. Yêu cầu truyền luồng lưu lượng sẽ bị chối bỏ nếu giá trị trễ trung bình dự báo trên tất cả các tuyến ứng cử đều không thỏa mãn giá trị trễ QoS yêu cầu. Tỷ lệ yêu cầu luồng bị chối bỏ thường được gọi là tỉ lệ nghẽn luồng.

Ngoài phương pháp đánh giá chất lượng tuyến truyền và sử dụng làm tiêu chí lựa chọn đường bằng trễ end-to-end trung bình (13) trong LDCQR-DP, các kết quả dự báo trong Phần III cũng cho phép có thể phát triển các giải thuật định tuyến QoS khác với các tham số như jitter (14), tỉ lệ trễ vượt ngưỡng (15), hay kết hợp nhiều tham số QoS, đáp ứng các đòi hỏi khác nhau của dịch vụ phức hợp.

Một trong những vấn đề cần xem xét là lựa chọn giá trị tham số K và M tham gia trong quá trình dự báo của LDCQR-DP. Thực tế K càng nhỏ, dự đoán và ước lượng các tham số trễ được thực hiện trên các đoạn dữ liệu qui mô nhỏ sẽ đảm bảo tính thích nghi với sự biến đổi của trễ mạng. Đồng thời, thích hợp cho các luồng dữ liệu có thời gian tồn tại không dài. Tuy nhiên, K nhỏ sẽ đòi hỏi tần suất tính toán lớn hơn, và chu kì xác định đường định tuyến sẽ phải diễn ra liên tục, tăng độ phức tạp của giải thuật. Giá trị M đơn thuần tác động đến độ chính xác của giải thuật dự báo tuyến tính. Số mẫu M càng lớn càng đảm bảo độ chính xác, tuy nhiên sẽ kéo theo yêu cầu tăng dung lượng bộ nhớ lưu trữ các mẫu, và tăng độ phức tạp của thuật toán dự báo. Giải pháp định tuyến QoS đòi hỏi thống kê số lượng các mẫu lớn và liên tục, do vậy thông thường phù hợp cho quá trình định tuyến trên mạng giữa các bộ định tuyến, hoặc giữa các thiết bị đầu cuối có lưu lượng truyền thông cao.

V. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

A. Mô hình mô phỏng kiểm thử

Để khảo sát hoạt động của giải pháp đề xuất mô phỏng thử nghiệm được tiến hành trên mô hình tuyến p bao gồm 5 liên kết kết nối với nhau theo thứ tự từ 1 đến 5 (Link 1 đến Link 5) và đương định tuyến p từ nguồn (Source) tới đích (Destination). Mô hình mạng và đường định tuyến giả

lập trên cơ sở mạng thực tiễn đơn giản bao gồm 3 phần mạng truy nhập, mạng MAN và mạng lõi.

Luồng lưu lượng nút nguồn gửi đến nút đích được thiết lập với tốc độ 100 Mbps. Tốc độ của liên kết 1 (Link 1) và liên kết 5 (Link 5) ấn định bằng 10 Gbps; tốc độ liên kết 2 (Link 2) và 4 (Link 4) là 80 Gbps; và tốc độ liên kết 3 (Link 3) là 480 Gbps. Tương ứng với mỗi liên kết, chúng ta ấn định bộ đệm sao cho trễ hàng đợi tối đa trên liên kết không vượt quá 100 ms, đủ lớn để đảm bảo tỉ lệ mất gói và tránh tắc nghẽn. Trên tuyến p lấy tổng thành phần trễ truyền dẫn và truyền lan tại mỗi nút mạng trung gian là 4 ms, tương đương tổng trễ truyền dẫn và truyền lan của cả tuyến là 24 ms.

Lưu lượng sử dụng trong mô phỏng được xây dựng dựa trên các phân tích và đo lường lưu lượng mạng Internet thực tế. Lưu lượng mạng hỗn tạp bao gồm 8 lớp lưu lượng phân biệt, tại mỗi nút các gói tin được xử lý theo cơ chế phân biệt dịch vụ (DiffServ). Lưu lượng trên mỗi lớp được tạo thành bằng cách tổng hợp một số nguồn lưu lượng mô hình ON-OFF. Trong chu kỳ ON, các gói tin được tạo ra để đạt tốc độ lưu lượng 1 Gbps; trong chu kỳ OFF, không có gói tin nào được tạo ra. Để đơn giản hóa tính toán mà không làm mất đặc tính thống kê của lưu lượng, cũng như không ảnh hưởng đến hoạt động của giải thuật định tuyến, có thể sử dụng các gói có độ dài cố định. Trong trường hợp thử nghiệm này, chọn độ dài gói tin 500 byte. Phân bố và các tham số cho các lớp lưu lượng được đưa ra trong Bảng I. Đối với các lớp lưu lượng có phân bố Pareto tham số hình dạng (shape parameter) được chọn bằng 1.3, tương ứng với tham số Hurst đặc trưng cho tính bùng nổ của dòng lưu lượng bằng 0.85. Các tham số sử dụng trong mô hình lưu lượng này như phân bố và độ dài các chu kỳ ON, OFF được tham khảo từ các giá trị thống kê lưu lượng mạng Internet thực tiễn, đã được sử dụng trong các nghiên cứu mô hình hóa lưu lượng [13-15]. Mô phỏng được tiến hành với tải trọng khác nhau trên mỗi liên kết, nhằm thử nghiệm hoạt động của giải pháp đề xuất với các điều kiện mạng đặc trưng. Tải của các lớp lưu lượng trên mỗi liên kết được tạo ra bằng cách ấn định số lượng của lưu lượng nguồn ON-OFF trong từng lớp lưu lượng của liên kết.

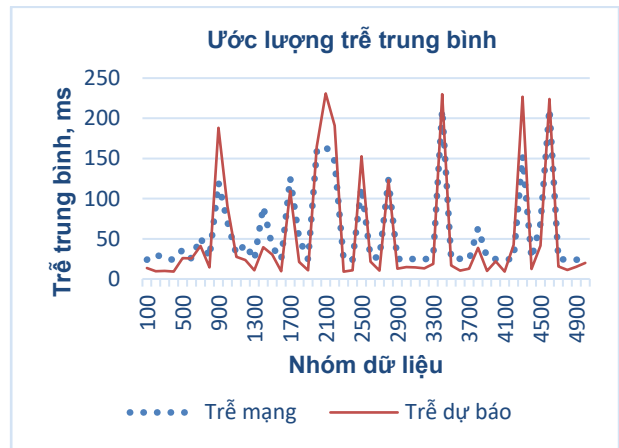
Bảng 1. Mô hình lưu lượng của các lớp lưu lượng và tải trọng trên các liên kết

Lớp lưu lượng	Mô hình lưu lượng			Tải trên liên kết 1 và 5 (%)	Tải trên liên kết 2 và 4 (%)	Tải trên liên kết 3 (%)
	Loại phân bố	Độ dài trung bình chu kỳ ON (ms)	Độ dài trung bình chu kỳ OFF (ms)			
1	Pareto	1.0	100	7,92	7,43	6,19
2	Pareto	1.0	50	15,69	14,71	12,25
3	Pareto	2.0	300	5,3	4,97	4,14
4	Pareto	2.0	200	7,92	7,43	6,19
5	Hàm mũ	1.0	100	7,92	7,43	6,19
6	Hàm mũ	10.0	400	19,51	18,29	15,24
7	Pareto	2.0	100	15,69	14,71	12,25
8	Pareto	1.0	200	3,98	3,73	3,11

Tổng tài liên kết				83,93	78,68	65,57
-------------------	--	--	--	-------	-------	-------

B. Đánh giá tính chính xác của thuật toán dự báo trễ end-to-end

Trước hết độ tin cậy, tính khả thi của giải pháp đề xuất được đánh giá thông qua tính chính xác của các tham số trễ đầu cuối ước lượng cho luồng u khi được định tuyến trên p . Tại thời điểm t tiến hành thử nghiệm và đánh giá quá trình định tuyến của luồng lưu lượng u với độ dài trên 5 triệu gói tin được chia thành các nhóm K gói tin. Thử nghiệm được thực hiện trên nhiều giá trị M khác nhau - số nhóm gói tin thống kê và quan sát trong quá khứ để ước lượng trễ khoảng thời gian tiếp theo. Tuy nhiên kết quả thử nghiệm cho thấy không có sự sai lệch nhiều về độ chính xác đối với các giá trị M đủ lớn. Điều này cũng hoàn toàn hợp lý, do kết quả dự báo chủ yếu phụ thuộc vào các mẫu mới nhất, có mối tương quan lớn hơn với dữ liệu dự báo. Do vậy, để đảm bảo tính toán thời gian thực, có thể lấy $M=100$ mà vẫn đảm bảo độ chính xác dự báo. Kết quả ước lượng trễ trung bình với số lượng gói tin trong mỗi nhóm lưu lượng của luồng $K=1000$ được đưa ra trong được Hình 1. Có thể thấy giải thuật ước lượng cho các giá trị trễ trung bình khá chính xác, có thể đáp ứng sử dụng cho các phương pháp định tuyến QoS trên mạng.

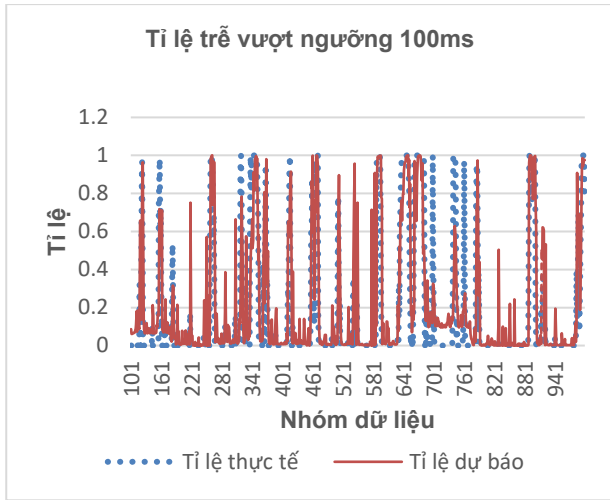


Hình 1. Dự báo trễ trung bình với nhóm tin $K=1000$.

Tỉ lệ trễ đầu cuối vượt ngưỡng cho trước $D_{QoS} = 100ms$ trong nhóm $K=1000$ gói tin được dự báo theo (15) cũng cho các kết quả khả quan, với tỉ lệ trễ vượt ngưỡng trung bình thống kê trong một khoảng thời gian đủ lớn (ví dụ như trong trường hợp mô phỏng, trên 5 triệu gói tin tương ứng độ dài khoảng 200 s của luồng lưu lượng 100 Mbps) là 21% đối với tỉ lệ thực tế và 24.37% cho kết quả dự báo. Với mục tiêu đảm bảo trễ đầu cuối cho các luồng và ứng dụng thích ứng kịp thời với sự thay đổi của trạng thái, tỉ lệ trễ vượt ngưỡng cũng được quan trắc liên tục cho từng khoảng thời gian nhỏ, (ví dụ cho từng nhóm 1000 gói tin, tương đương độ dài luồng 100 Mbps trung bình 40 ms). Kết quả quan sát cho một đoạn dữ liệu điển hình mô tả trong Hình 2.

Có thể thấy với các nhóm gói tin không lớn, tỉ lệ trễ vượt một ngưỡng xác định biến thiên liên tục và ngẫu nhiên, trong một dải rộng từ 0 đến 1.0. Hiện tượng trễ đầu cuối gói tin vượt ngưỡng thường xảy ra liên tục trong một khoảng thời gian ngắn, ứng với thời điểm tắc nghẽn trên mạng. Tuy nhiên có thể thấy các thuật toán dự báo cũng đã

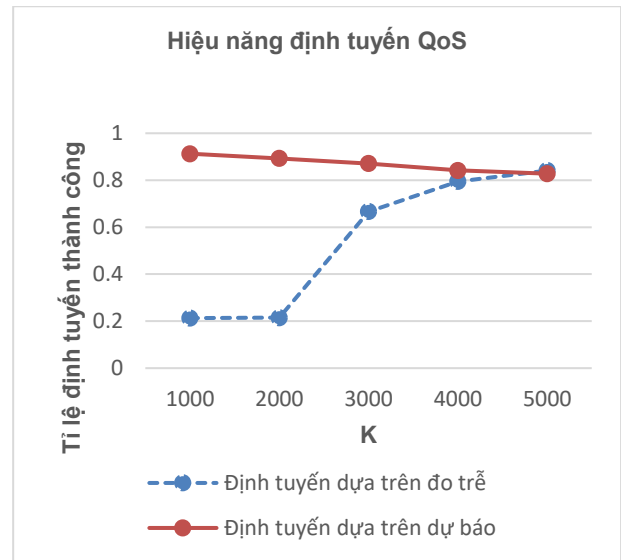
đạt được tính thích nghi tức thời, ước lượng khá sát được các điểm xảy ra tắc nghẽn và xu hướng biến thiên của tỉ lệ trễ vượt giá trị cho trước. Điều này khẳng định độ tin cậy của công cụ dự báo và có thể đóng vai trò như một chỉ báo tắc nghẽn trên đường định tuyến, hỗ trợ cho quá trình đảm bảo chất lượng dịch vụ.



Hình 2. Dự báo tỉ lệ trễ vượt ngưỡng QoS cho nhóm gói tin K=1000.

C. Đánh giá tính chính xác đảm bảo trễ end-to-end của giải thuật LDCQR-DP

Đánh giá tỉ lệ đảm bảo trễ QoS trên tuyến được chọn được thực hiện với yêu cầu giá trị trễ đầu cuối phải nhỏ hơn giá trị cho trước, trong trường hợp thử nghiệm chọn $D_{QoS} = 100ms$. Với mục đích đánh giá hiệu năng định tuyến QoS, giải pháp định tuyến đề xuất LDCQR-DP cũng được so sánh với giải thuật định tuyến QoS đảm bảo trễ end-to-end truyền thống sử dụng các bản tin kiểm tra [9,10]. Với các giải thuật này, tại thời điểm t , nút nguồn sử dụng trễ tức thời đo được thông qua bản tin thử nghiệm. Do độ trễ gửi và nhận gói tin qua mạng, gói tin thử nghiệm phải được gửi trước thời điểm t một khoảng thời gian xấp xỉ RTT của mạng. Trong trường hợp này, trễ gói tin thử nghiệm được lấy bằng 160ms. Hai phương pháp định tuyến đảm bảo trễ đầu cuối được đánh giá qua xác suất định tuyến thành công, tức là tỉ lệ quyết định định tuyến đúng của giải thuật định tuyến QoS, dựa trên trễ đầu cuối thực tế có đáp ứng được yêu cầu trễ D_{QoS} trên tuyến đường đã được chọn hay không (Hình 3).



Hình 3. Tính chính xác đảm bảo trễ đầu cuối của giải thuật định tuyến QoS LDCQR-DP.

Kết quả cho thấy giải thuật định tuyến đề xuất LDCQR-DP đạt hiệu năng định tuyến hơn hẳn so với phương pháp truyền thống sử dụng bản tin đo trễ. Đặc biệt đối với định tuyến cho các đoạn dữ liệu K nhỏ. Nguyên nhân xuất phát từ độ trễ của gói tin thử nghiệm (bằng RTT của mạng) khi được sử dụng để đo hiện trạng tức thời mạng. Độ trễ này càng lớn so với độ dài đoạn dữ liệu K gói tin thì sai lệch khi đưa ra quyết định định tuyến cũng càng lớn. Từ đó có thể thấy hạn chế của phương pháp đo lường khi định tuyến với các luồng thời gian tồn tại ngắn, và được khắc phục bởi phương pháp định tuyến đề xuất dựa trên ước lượng trễ đầu cuối. Có thể thấy độ chính xác của phương pháp dự báo giảm đi khi tăng độ dài đoạn dữ liệu, tuy nhiên giải pháp vẫn đạt được độ tin cậy cao. Giải thuật LDCQR-DP vì vậy đảm bảo khả năng thích nghi với các độ dài luồng bất kỳ, và sự thay đổi trạng thái mạng. Ngoài ra, giải thuật đề xuất còn cho phép sử dụng các chỉ tiêu QoS khác mà các giải thuật đo lường đánh giá trễ bị hạn chế, như biến thiên trễ, tỉ lệ trễ vượt ngưỡng, ...

VI. KẾT LUẬN

Trong bài báo này các tác giả đề xuất giải thuật định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ LDCQR-DP. Điểm mới quan trọng trong giải thuật đề xuất là áp dụng phương pháp dự báo trễ đầu cuối thông qua phân tích phân bố cũng như các tham số của giá trị trễ cực đại. Phương pháp cho phép tính toán trễ thích nghi cho bất cứ luồng lưu lượng với độ dài linh hoạt, đảm bảo tính chính xác cũng như độ phức tạp giải thuật, và do đó có khả năng ứng dụng trên mạng Internet thực tế. Giải thuật LDCQR-DP là cơ sở để thực hiện các giải pháp đảm bảo QoS theo yêu cầu cho các ứng dụng, đặc biệt là các ứng dụng đa phương tiện, đòi hỏi đáp ứng nghiêm ngặt các chỉ tiêu về thời gian truyền dẫn, bao gồm cả trễ trung bình, biến thiên trễ, hay tỉ lệ trễ vượt giới hạn, trong các khoảng thời gian yêu cầu khác nhau. Giải pháp đề xuất cho phép xác định trước các tham số QoS của luồng dữ liệu mà không cần xem xét đến lưu lượng hay hiện trạng mạng, khắc phục được một trong những tồn tại của các giải thuật định tuyến QoS truyền thống. Đồng thời, LDCQR-DP còn đơn giản hóa quá trình định tuyến và độ trễ định tuyến, không cần phải thực hiện đo đánh giá chất lượng tuyến được chọn, giảm lưu lượng gửi bản tin điều khiển định tuyến mạng.

Đề xuất định tuyến QoS sử dụng thông tin nội bộ LDCQR-DP phù hợp với các mô hình định tuyến tập trung và định tuyến end-to-end theo xu thế của mạng thế hệ mới, như công nghệ SDN, MPLS. Trên cơ sở các kết quả đạt được, hướng nghiên cứu tiếp theo là xây dựng mô hình định tuyến QoS với các yêu cầu đa dạng về trễ đầu cuối, cũng như mở rộng các yêu cầu khác về tính tin cậy, thông lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. E. Marilly, et al., "Service level agreements: a main challenge for next generations networks," 2nd European Conference on Universal Multiservice Networks. ECUMN'2001, pp. 297-304.
- [2]. S. Nelakuditi, et al., "On localized control in QoS routing," Automatic Control, IEEE Transactions on., vol. 47 (2002), pp. 1026-1034.
- [3]. S. Nelakuditi, Z. L. Zhang, R. Tsang and D. Du, "On selection of candidate paths for proportional routing," Computer networks, vol. 44 (2004), pp. 79-102.
- [4]. S. Nelakuditi, Z. L. Zhang, R. Tsang and D. Du, "Adaptive Proportional Routing: a Localized QoS Routing Approach", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 10 (2002), pp. 790-804.
- [5]. S. Alabbad, M. E. Woodward, "Localized Credit Based Routing: Performance Evaluation Using Simulation", Proc. of IEEE 39th Annual Simulation Symposium, Huntsville, AL, USA (2006).
- [6]. T. A. Al Ghamdi and M. E. Woodward, "Novel localized QoS routing algorithms," in Proc. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications, Kuala Lumpur, Malaysia, Dec. 2009, pp. 199-204.
- [7]. T. A. Al Ghamdi and M. E. Woodward, "Novel algorithms for QoS localized routing in communication networks," in Proc. First Asian Himalayas International Conference on Internet, Kathmandu, Nepal, Nov. 2009, pp. 1-7.
- [8]. F. M. Aldosari, "Localized QoS Routing Based on Links Blocking Probability," in Proc. 11th International Conference on Information Technology: New Generations (2014), pp. 207-213.
- [9]. Minh Anh Tran, Chien Trinh Nguyen, "A new localized multi-constraint QoS routing algorithm". Journal of Research, Development on Information and Communications Technology, Vietnam Ministry of Information and Communications Technology, Volume E-3, Number 14, Sep. 2017, pp. 34-44.
- [10]. F. M. Aldosari and F. Alradady, "Localized QoS Routing with End-to-End Delay Guarantees," in Proc. International Conference on Information Technology: New Generations, Las Vegas, NV, April 2013, pp. 464-472.
- [11]. A. Popescu and D. Constantinescu, "Modeling of One-way transit time for IP Router," Proceeding of the Advanced International Conference on Telecommunications and International Conference on Internet and Web Applications and Services AICT-ICIW'06, Feb. 2006.
- [12]. C. J. Bovy, H. T. Mertodimedjo, G. Hooghemstra, H. Uijterwaal, and P. Van Mieghem, "Analysis of end-to-end delay measurement in Internet", In Proceeding of PAM 2002, Mar. 2002.
- [13]. M. E. Crovella and A. Bestavros, "Self-similarity in World Wide Web traffic: Evidence and possible causes", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 5, No. 6, Dec. 1997, pp. 835-846.
- [14]. V. Paxson and S. Floyd, "Wide Area Traffic: The failure of Poisson modeling", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3, No. 3, June 1995, pp. 226-244.
- [15]. W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of Ethernet traffic (Extended version)", IEEE/ACM Trans. Networking 2 (1) (1994), pp. 1-15.

- [16]. E. Castillo, "Extreme Value Theory in Engineering." Academic, New York (1998).
- [17]. J. Qiu and E.W. Knightly, "Interclass resource sharing using statistical service envelopes" in Proc. INFOCOM 99, Mar. 1999, pp. 1404-1411.
- [18]. J. Qiu and E.W. Knightly, "Measurement-based admission control with aggregate traffic envelopes" IEEE/ACM Trans. Networking, vol.9, no. 2, Apr. 2001, pp. 199-210.
- [19]. S. Haykin, "Modern Filter." New York: Macmillan (1989).

LOCALIZED QOS ROUTING TO GUARANTEE END-TO-END DELAY

Abstract: A QoS routing algorithm to guarantee end-to-end delay metrics for real time applications, especially multimedia, is an important issue supporting Quality of Service (QoS) over Internet. Recently, localized QoS routing has been proposed as a promising alternative to the deployed global QoS routing algorithms. This approach significantly reduces the overheads associated with maintaining global states at each node, which in turn improves the overall routing performance. Routing with delay guarantee involves path-constrained requirements, which are harder and more complex to satisfy than routing with bandwidth guarantee, which involves only link-constrained requirements. In this paper, we introduce a Localized Delay-Constrained QoS Routing algorithm using Delay Prediction (LDCQR-DP), which can guarantee end-to-end delay requirements over any runtime of flows. Simulation results have shown high accuracy of delay guarantee and considerable routing performance improvement achieved by the proposed QoS routing algorithm.

Keyword: QoS routing, End-to-end delay, Localized routing, Delay prediction.



Nguyễn Chiến Trinh nhận học vị Tiến sĩ Kỹ thuật tại Trường Điện – Thông tin Tôkyô, Nhật bản năm 2005. Hiện nay đang công tác tại Khoa Viễn thông 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Các lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển lưu lượng, định tuyến QoS, đảm bảo QoS mạng IP, SDN, WSN, ...

Email:trinhnc@ptit.edu.vn



Nguyễn Thị Thu Hằng nhận học vị Tiến sĩ tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT) Việt Nam năm 2020. Hiện nay là giảng viên Khoa Viễn thông 1-PTIT.

Các lĩnh vực nghiên cứu chính: Mạng truyền thông, mạng cảm biến, mô phỏng định tuyến QoS và giao thức lớp MAC.

Email: hangntt@ptit.edu.vn