

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIÊN THÔNG**

TÓM TẮT LUẬN ÁN

**GIẢI QUYẾT BÀI TOÁN ĐỊNH TUYẾN
ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG DỊCH VỤ**

NCS: CAO THÁI PHƯƠNG THANH

THẦY HƯỚNG DẪN: PGS.TS. TRẦN CÔNG HÙNG

PGS.TS. HÀ HẢI NAM

HÀ NỘI, 2017

Công trình hoàn thành tại:

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Người hướng dẫn khoa học:

PGS. TS. Trần Công Hùng

PGS. TS. Hà Hải Nam

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng cấp Học viện tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, 122 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội.

Vào lúc:

Có thể tìm hiểu luận án tại:

Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

MỞ ĐẦU

Ngày nay, mạng máy tính được sử dụng rộng rãi và đóng vai trò nền tảng trong lĩnh vực thông tin và truyền thông toàn cầu. Nhiều dịch vụ và ứng dụng mạng ra đời như kỹ thuật thoại trên Internet Protocol (IP), truyền hình theo yêu cầu, trò chơi trực tuyến... đòi hỏi chất lượng dịch vụ mạng ngày càng cao. Một số yêu cầu chất lượng dịch vụ quan trọng gồm băng thông, độ trễ. Bên cạnh đó, các công ty cung cấp dịch vụ mạng không chỉ cần đáp ứng chất lượng dịch vụ mà còn phải tìm cách quản lý và khai thác một cách tốt nhất tài nguyên mạng nhằm nâng cao hiệu quả kinh doanh. Một giải pháp hiệu quả để quản lý và điều khiển tài nguyên mạng từ đó đảm bảo chất lượng dịch vụ là kỹ thuật lưu lượng - kỹ thuật thiết lập, kiểm soát và quản lý các dòng dữ liệu truyền tải trên mạng. Trong kỹ thuật lưu lượng, vấn đề định tuyến đóng một vai trò quan trọng vì định tuyến quyết định đường đi của luồng dữ liệu trong hệ thống mạng.

Từ nhu cầu sử dụng mạng với chất lượng dịch vụ được đảm bảo và sự phát triển của kỹ thuật, công nghệ, các vấn đề khoa học mạng máy tính bao gồm bài toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ luôn nhận được sự quan tâm nghiên cứu và ứng dụng của cả giới khoa học và công nghiệp.

Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là giải quyết bài toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ. Giải pháp cần xác định đường đi trong sơ đồ mạng thỏa một hoặc một số điều kiện chất lượng dịch vụ cụ thể, ví dụ như điều kiện băng thông của đường đi lớn hơn một giá trị cho trước và / hoặc độ trễ của đường đi nhỏ hơn một giá trị cho trước. Các điều kiện này có thể có giá trị khác nhau cho từng yêu cầu định tuyến và một độ đo

quan trọng nhằm đánh giá hiệu quả của giải pháp định tuyến chính là số yêu cầu định tuyến hệ thống mạng đã đáp ứng được. Ngoài ra, hiệu quả định tuyến còn được đánh giá dựa trên thời gian tìm đường đi và khả năng cân bằng tải của thuật toán định tuyến.

Định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ là vấn đề rộng, có nhiều phân loại, nhiều hướng nghiên cứu. Trong giới hạn thời gian đào tạo, nghiên cứu sinh tập trung giải quyết bài toán định tuyến unicast đảm bảo băng thông và định tuyến unicast đảm bảo băng thông và độ trễ. Định tuyến unicast được lựa chọn nghiên cứu vì đây là loại định tuyến cơ bản, được sử dụng nhiều nhất. Ngoài ra, băng thông và độ trễ cũng là hai điều kiện chất lượng dịch vụ phổ biến nhất, đặc trưng cho hai loại ràng buộc xét theo từng liên kết và xét theo tổng giá trị một thuộc tính của tất cả liên kết trên đường đi.

Ý nghĩa và Đóng góp

Định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ, cụ thể đảm bảo hai điều kiện quan trọng băng thông, độ trễ, là một vấn đề quan trọng đã được nghiên cứu từ lâu vì chất lượng dịch vụ có ảnh hưởng quyết định đối với hoạt động mạng máy tính. Cho đến nay, vấn đề này vẫn giữ nguyên ý nghĩa và tiếp tục nhận được sự quan tâm nghiên cứu, bởi vì các dịch vụ mạng yêu cầu chất lượng dịch vụ ngày càng cao; đồng thời, các công nghệ, kiến trúc mạng thế hệ mới cũng được đề xuất đòi hỏi tiếp tục cải tiến giải pháp đã có cũng như đề xuất giải pháp đảm bảo chất lượng dịch vụ mới.

Các đóng góp của luận án gồm:

1. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông BGHT.
2. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông TEARD.
3. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ HRABDC.

4. Cải tiến thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ eHRABDC.
5. Xây dựng và công bố dưới dạng mã nguồn mở một chương trình mô phỏng để thử nghiệm, so sánh các thuật toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ.

Bố cục luận án

Luận án được trình bày thành bốn chương. Trong đó, chương 1 giới thiệu về chất lượng dịch vụ và các yếu tố quan trọng có liên quan. Chương 2 giới thiệu bài toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ và các công trình định tuyến liên quan; đồng thời mô tả chương trình mô phỏng thuật toán định tuyến và những yếu tố thử nghiệm liên quan. Chương 3 báo cáo hai thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông đã được nghiên cứu sinh đề xuất. Trong khi chương 4 báo cáo hai thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ ĐỊNH TUYẾN ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG DỊCH VỤ

1.1 Chất lượng dịch vụ

Hiện nay ngày càng có nhiều dịch vụ mạng thời gian thực được triển khai như điện thoại Internet, truyền hình theo yêu cầu, trò chơi trực tuyến... Các dịch vụ này chỉ hoạt động hiệu quả khi hệ thống đảm bảo một hoặc một số yêu cầu chất lượng. Ví dụ, dịch vụ truyền hình thường yêu cầu đảm bảo băng thông đủ lớn để truyền tải dữ liệu hình ảnh, trong khi trò chơi trực tuyến yêu cầu đảm bảo độ trễ nhỏ và ổn định để không làm gián đoạn thao tác của người chơi. Vì vậy thuật

ngữ chất lượng dịch vụ (Quality of Service - QoS) ra đời để mô tả vấn đề đảm bảo yêu cầu chất lượng trong hoạt động của mạng máy tính.

Một yếu tố quan trọng trong hệ thống QoS là định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS routing). Yếu tố này xác định đường đi của luồng dữ liệu sao cho thỏa các ràng buộc QoS và đáp ứng được tối đa số yêu cầu sử dụng dịch vụ. Luận án tập trung giải quyết bài toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ.

1.2 Định tuyến

Định tuyến là quá trình thiết lập đường truyền và truyền dữ liệu từ một nút mạng nguồn qua các nút mạng trung gian đến một / một số nút mạng đích. Quá trình này được thực hiện ở lớp mạng trong mô hình Open Systems Interconnection (OSI); và được thực hiện bởi một tập hợp các qui ước, qui tắc, cơ chế hoạt động gọi là giao thức định tuyến. Ba chức năng chính của giao thức định tuyến gồm: trao đổi thông tin, xác định đường đi, và truyền dữ liệu. Trong đó, xác định đường đi - được thực hiện bởi thuật toán định tuyến - nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu vì việc lựa chọn đường đi có ảnh hưởng quyết định đến hiệu quả định tuyến.

Có nhiều tiêu chí để phân loại thuật toán định tuyến. Ví dụ, dựa trên thời điểm xác định đường đi có hai loại định tuyến theo yêu cầu và chủ động. Dựa trên số lượng nút đích của đường đi có thể chia làm ba loại: unicast, multicast và broadcast. Ngoài ra, cách thức tìm đường đi tập trung hoặc phân tán trong hệ thống mạng cũng là một tiêu chí phân loại quan trọng khi xem xét thuật toán định tuyến.

Từ những thuật toán định tuyến "best effort" ban đầu xác định đường đi tốt là đường đi ngắn nhất (qua ít nút mạng nhất) và chưa quan tâm đến chất lượng dịch vụ, đã có rất nhiều công trình nghiên cứu, đề xuất, cải tiến liên quan đến vấn đề định tuyến. Luận án nghiên

cứu một hướng quan trọng của vấn đề định tuyến đó là định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ.

1.3 Định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ

Các độ đo chất lượng dịch vụ phổ biến bao gồm:

- Băng thông: là số lượng dữ liệu có thể truyền đi trong một đơn vị thời gian, đơn vị tính ví dụ kilo bit trên giây (kb/s).
- Độ trễ: là khoảng thời gian truyền dữ liệu phụ thuộc vào thời gian truyền qua liên kết vật lý, thời gian xử lý của thiết bị mạng, thời gian trong hàng đợi...

Các độ đo này có đặc tính khác nhau nên cách kiểm tra chất lượng dịch vụ trên đường truyền cũng khác nhau. Cụ thể, băng thông đường truyền là giá trị cực tiểu băng thông các liên kết (tính bằng phép cực trị); độ trễ đường truyền là tổng độ trễ khi dữ liệu đi qua các liên kết (tính bằng phép cộng).

Mục tiêu của thuật toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ không chỉ là tìm được đường đi thỏa ràng buộc chất lượng mà còn phục vụ cho nhu cầu của nhà cung cấp mạng. Đối với định tuyến unicast, nhu cầu này là đáp ứng tối đa số yêu cầu định tuyến nên giải pháp định tuyến unicast được so sánh, đánh giá dựa trên số lượng yêu cầu được chấp nhận.

1.4 Kết chương

Chương 1 trình bày tổng quan về yêu cầu chất lượng dịch vụ và vấn đề định tuyến trong lĩnh vực mạng máy tính và truyền dữ liệu. Luận án giải quyết bài toán định tuyến unicast đảm bảo băng thông và định tuyến đảm bảo băng thông, độ trễ.

CHƯƠNG 2. BÀI TOÁN ĐỊNH TUYẾN UNICAST ĐẢM BẢO BĂNG THÔNG VÀ ĐẢM BẢO BĂNG THÔNG, ĐỘ TRỄ

2.1 Định nghĩa bài toán

Trong bài toán định tuyến, sơ đồ mạng được biểu diễn thành một đồ thị đơn có hướng gồm tập hợp nút mạng và các liên kết tương ứng. Bảng 2.1 thể hiện các kí hiệu được sử dụng trong bài toán.

Bảng 2.1 Kí hiệu được sử dụng trong bài toán

Kí hiệu	Diễn giải
$G(N, L)$	Đồ thị biểu diễn sơ đồ mạng N tập hợp gồm n nút mạng L tập hợp gồm m liên kết
$c(l)$	Dung lượng băng thông của liên kết l
$b(l)$	Băng thông còn lại của liên kết l
$d(l)$	Độ trễ của liên kết l
$w(l)$	Trọng số của liên kết l
SD	Tập hợp các cặp nút nguồn đích sd
p_{sd}	Một đường đi từ nút nguồn s đến nút đích d
P_{sd}	Tập hợp tất cả đường đi từ nút s đến nút d
$r(s, d, b)$	Một yêu cầu định tuyến từ s đến d với lượng băng thông b cần đảm bảo (định tuyến đảm bảo băng thông)
$Pr(s, d, b)$	Đường đi p_{sd} thỏa yêu cầu $r(s, d, b)$, $b(l) \geq b, \forall l \in p_{sd}$
$r(s, d, \beta, \delta)$	Một yêu cầu định tuyến từ s đến d với lượng băng thông β và độ trễ δ cần đảm bảo (định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ)
$Pr(s, d, \beta, \delta)$	Đường đi p_{sd} thỏa yêu cầu $r(s, d, \beta, \delta)$, $\begin{cases} b(l) \geq \beta, \forall l \in p_{sd} \\ \sum_{l \in p_{sd}} d(l) \leq \delta \end{cases}$

Mục tiêu của thuật toán định tuyến không chỉ là thiết lập đường đi đảm bảo chất lượng dịch vụ theo yêu cầu mà còn là chấp nhận tối đa số yêu cầu nhận được. Việc đảm bảo băng thông làm giảm tài nguyên

băng thông dẫn đến giảm khả năng tiếp tục chấp nhận yêu cầu. Hơn nữa, yêu cầu định tuyến phát sinh từ nhu cầu sử dụng mạng thực tế vốn rất đa dạng và không được xác định trước. Vì vậy, không có giải pháp tối ưu cho mọi yêu cầu định tuyến. Thay vào đó, các phương pháp heuristic khác nhau được áp dụng cho thuật toán định tuyến unicast đảm bảo băng thông cũng như đảm bảo băng thông và độ trễ.

Để thực hiện bài toán đã phát biểu, thuật toán định tuyến không chỉ cần được cập nhật thông tin trạng thái của sơ đồ mạng mà còn cần có cơ chế thiết lập đường đi và dành riêng băng thông cho từng luồng dữ liệu. Trong hoạt động mạng máy tính hiện nay, điều kiện này có thể được thực hiện bằng kỹ thuật lưu lượng với chuyển mạch nhãn đa giao thức (MPLS Traffic Engineering - MPLS TE).

Luận án tập trung nghiên cứu thuật toán định tuyến nên không trình bày chi tiết những giao thức, kỹ thuật hỗ trợ. Thay vào đó, tương tự như những công trình liên quan đã công bố, thuật toán định tuyến được thực hiện với giả sử có thông tin của hệ thống và có cơ chế thiết lập, dành riêng băng thông cho đường đi. Thông tin được biết bao gồm tập hợp cặp nút nguồn đích của sơ đồ mạng và dung lượng, băng thông còn lại, độ trễ của liên kết. Ngoài ra, yêu cầu định tuyến được giả sử đến tuần tự để tiện so sánh, đánh giá; nhưng các yêu cầu này không được biết trước.

Các độ đo so sánh, đánh giá thuật toán định tuyến bao gồm: tỉ lệ chấp nhận yêu cầu, thời gian tính toán trung bình, và độ lệch chuẩn của tải liên kết (tải liên kết : công thức 3.3).

$$\text{Tỉ lệ chấp nhận} = \frac{\text{số yêu cầu được chấp nhận}}{\text{tổng số yêu cầu}} * 100\% \quad (2.1)$$

$$\text{Thời gian tính trung bình} = \frac{\sum \text{thời gian tính một yêu cầu}}{\text{tổng số yêu cầu}} \quad (2.2)$$

$$\text{Tải liên kết} = \frac{\text{băng thông đảm bảo}}{\text{dung lượng}} = \frac{c(l) - b(l)}{c(l)} \quad (3.3)$$

2.2 Các thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông liên quan

Thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông cơ bản và phổ biến nhất là thuật toán Minimum Hop Algorithm (MHA). Như tên gọi, MHA tìm đường đi ngắn nhất thỏa ràng buộc băng thông bằng cách bỏ (tạm thời) các liên kết có băng thông còn lại nhỏ hơn băng thông yêu cầu, sau đó áp dụng thuật toán tìm đường đi ngắn nhất (ví dụ Dijkstra với trọng số liên kết bằng 1) trên sơ đồ mạng còn lại. Bên cạnh việc xem xét độ dài đường đi, thuật toán Bandwidth Constrained Routing Algorithm (BCRA) sử dụng các thông tin liên quan đến liên kết gồm giá trị dung lượng, và băng thông còn lại để tính trọng số liên kết. Kết quả thử nghiệm cho thấy việc sử dụng thêm các thông số liên kết của BCRA tuy đơn giản nhưng giúp cải thiện tỉ lệ chấp nhận yêu cầu định tuyến so với MHA.

Thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông Minimum Interference Routing Algorithm (MIRA) được đề xuất từ nhận xét việc lựa chọn đường đi gây ảnh hưởng đến khả năng đáp ứng yêu cầu trong tương lai. Ý tưởng của MIRA là xác định đường đi của một cặp nguồn đích sao cho hạn chế ảnh hưởng đến các cặp nguồn đích khác. Ý tưởng này được thực hiện bằng cách tính trọng số liên kết. Liên kết nào có ảnh hưởng nhiều thì giá trị trọng số lớn. Ngược lại, liên kết nào ít ảnh hưởng thì giá trị trọng số nhỏ. Sau khi tính trọng số, các liên kết không thỏa điều kiện băng thông bị loại bỏ (tạm thời), thuật toán Dijkstra được áp dụng để tìm đường đi từ nút nguồn đến nút đích. Đường đi có trọng số nhỏ nhất tìm được chính là đường đi có ảnh hưởng ít nhất. Thuật toán MIRA sử dụng khái niệm luồng cực đại (maxflow) để đánh giá sự ảnh hưởng và tính giá trị trọng số liên kết.

Gần đây, một thuật toán có hai pha xử lý và dựa trên tổng số đường đi để tính độ tới hạn được đề xuất với tên gọi Bandwidth Guaranteed MPLS Routing Algorithm (BGMRA). Cụ thể, pha offline BGMRA tìm tất cả đường đi và ghi nhận tổng số đường đi này. Pha online tính độ tới hạn theo số lần liên kết phục vụ yêu cầu trên tổng số đường đi. Ngoài ra, trọng số liên kết cũng tỉ lệ nghịch với giá trị băng thông còn lại với ý nghĩa tương tự như NewMIRA.

2.3 Các thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ liên quan

Thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ đầu tiên, Least Delay Algorithm (LDA) là một thuật toán định tuyến "best effort". Đối với mỗi yêu cầu, LDA bỏ qua các liên kết không thỏa điều kiện băng thông rồi áp dụng thuật toán Dijkstra với trọng số là độ trễ liên kết. Độ trễ nhỏ nhất của đường đi tìm được này được so sánh với điều kiện độ trễ để quyết định có thể chấp nhận yêu cầu định tuyến hay không.

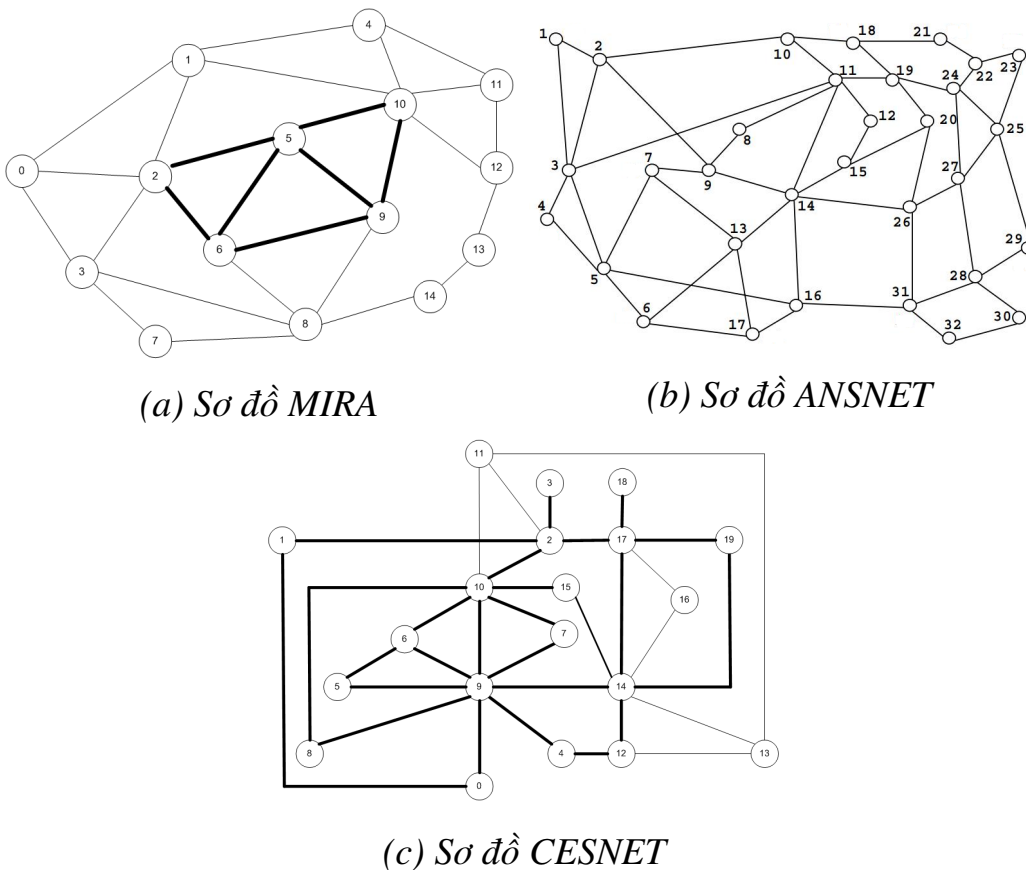
Hai thuật toán Maximum Delay Weighted Capacity Routing Algorithm (MDWCRA) và Modified Maximum Delay Weighted Capacity Routing Algorithm (M-MDWCRA) cải tiến tỉ lệ chấp nhận yêu cầu so với LDA bằng cách tính trọng số liên kết dựa trên khái niệm Delay Weighted Capacity (DWC) và áp dụng kĩ thuật Dijkstra mở rộng tìm đường đi có trọng số nhỏ nhất và thỏa thêm yêu cầu độ trễ.

Gần đây, thuật toán Minimum Delay and Maximum Flow (MDMF) kết hợp liên kết tới hạn theo DWC của MDWCRA và liên kết tới hạn theo luồng cực đại của MIRA để tính trọng số liên kết heuristic. Ngoài ra, MDMF áp dụng mô hình latency-rate server để tính độ trễ theo băng thông đảm bảo cho đường đi. Nếu đường đi p_i có trọng số nhỏ nhất không thỏa điều kiện độ trễ thì MDMF tăng băng thông đảm bảo (nghĩa là cung cấp cho p_i lượng băng thông lớn hơn băng thông yêu

câu) nhằm giảm độ trễ cho thỏa điều kiện được yêu cầu. MDMF chỉ bỏ liên kết có băng thông còn lại nhỏ nhất trong p_i và tìm đường đi kế tiếp p_j khi không thể tăng lượng băng thông đảm bảo được nữa.

2.4 Khảo sát thuật toán định tuyến bằng mô phỏng

Các thuật toán định tuyến được khảo sát trên môi trường mô phỏng. Hình 2.10 trình bày ba sơ đồ mạng thử nghiệm. Trong đó sơ đồ MIRA và ANSNET đã được sử dụng trong các công trình liên quan đã công bố. Trong khi sơ đồ CESNET được xây dựng từ một mô hình mạng MPLS thực tế.



Hình 2.10 Sơ đồ mạng thử nghiệm

Yêu cầu định tuyến được phát sinh ngẫu nhiên trên mỗi sơ đồ mạng theo hai kịch bản định tuyến tĩnh và động. Trong kịch bản định tuyến

tính, yêu cầu đến một cách tuần tự và đều nhau. Nếu được thiết lập, đường đi sẽ giữ lượng băng thông được yêu cầu đến khi kết thúc thử nghiệm. Trong kịch bản định tuyến động, thời điểm đến của yêu cầu định tuyến được phát sinh ngẫu nhiên theo phân phối Poisson, trung bình có λ yêu cầu trong một đơn vị thời gian. Đường đi của yêu cầu động giữ băng thông trong một khoảng thời gian được phát sinh theo phân phối Exponential với trung bình $mean = \frac{1}{\mu}$ đơn vị thời gian thay vì giữ đến khi kết thúc thử nghiệm như kịch bản tĩnh.

2.5 Kết chương

Chương 2 trình bày bài toán định tuyến đảm bảo băng thông, độ trễ và các công trình liên quan đã được công bố. Đồng thời cũng trình bày về môi trường thử nghiệm gồm chương trình mô phỏng, sơ đồ mạng, yêu cầu định tuyến và các tham số liên quan.

CHƯƠNG 3. THUẬT TOÁN ĐỊNH TUYẾN ĐẢM BẢO BĂNG THÔNG

3.1 BGHT: Thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông sử dụng thời gian giữ băng thông

Dựa trên nhận xét về tính chất quan trọng của băng thông còn lại và khả năng sử dụng thời gian giữ để tính băng thông còn lại trong tương lai, nghiên cứu sinh đề xuất một phương pháp tính trọng số đơn giản dựa trên giá trị băng thông còn lại như sau:

$$w(l) = \frac{1}{b(l) + relBw(l)} \quad (3.1)$$

Gọi yêu cầu định tuyến đang xử lý là yêu cầu thứ $i : r_i$, thời điểm

xử lý r_i là t_{r_i} , công thức 3.1 tính trọng số của liên kết l để tìm đường đi cho r_i với $b(l)$ là băng thông còn lại của l tại thời điểm t_{r_i} , $relBw(l)$ là băng thông sẽ được giải phóng trên liên kết l tại thời điểm $t_{r_{i+1}}$ khi yêu cầu kế tiếp r_{i+1} đến. Nói cách khác, mẫu số $(b(l) + relBw(l))$ là băng thông còn lại của liên kết l tại thời điểm xử lý yêu cầu kế tiếp $t_{r_{i+1}}$.

Để tính được $relBw(l)$, hệ thống mạng cần có thông tin thời gian giữ băng thông của các yêu cầu định tuyến đã được chấp nhận. Thông tin này có thể được máy chủ định tuyến ước tính từ những yêu cầu đã kết thúc. Hoặc thời gian giữ băng thông được gửi kèm với mỗi yêu cầu định tuyến. Điều này có thể thực hiện được vì bên sử dụng dịch vụ định tuyến sẽ biết thời gian cần truyền dữ liệu (thời gian giữ băng thông) và thời gian này được gửi đến hệ thống mạng trong gói tin yêu cầu thiết lập của giao thức định tuyến.

Ngoài ra, thời điểm đến của yêu cầu kế tiếp $t_{r_{i+1}}$ không thể xác định một cách chính xác vì điều kiện bài toán là không biết trước yêu cầu định tuyến. Vì vậy, thuật toán đề xuất dự đoán thời điểm đến dựa trên những yêu cầu đã nhận được bằng cách phát sinh ngẫu nhiên theo phân phối tam giác.

3.2 TEARD: Thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông sử dụng dữ liệu định tuyến

Thuật toán định tuyến BGHT được đề xuất với giả sử yêu cầu định tuyến có thêm thời gian giữ băng thông, với mong muốn giải quyết bài toán với định nghĩa ban đầu (không bổ sung giả sử), nghiên cứu sinh giới thiệu một thuật toán khác sử dụng dữ liệu từ quá trình định tuyến bao gồm trạng thái sơ đồ mạng, thông tin từ các yêu cầu định tuyến và đường đi đã sử dụng trong quá khứ: Traffic Engineering routing algorithm using Routing Data (TEARD)

Trọng số liên kết của thuật toán TEARD bao gồm ba thành phần.

Thành phần thứ nhất xét độ tối hạn của liên kết theo các cặp nút nguồn đích.

$$crit_1(l) = \sum_{ie \in IE} (prob(ie) * crit_{ie}(l)) \quad (3.3)$$

Trong đó $prob(ie)$ là xác suất cặp ie được yêu cầu. Trong cài đặt hiện tại, $prob(ie)$ được tính đơn giản là tỉ lệ cặp ie trong tổng số yêu cầu đã nhận được. Ngoài ra $crit_{ie}(l)$ là độ tối hạn của liên kết l đối với cặp nguồn đích ie tính trong pha offline.

Thành phần trọng số thứ hai xem xét giá trị băng thông, đặc biệt là băng thông còn lại của liên kết.

$$crit_2(l) = \frac{used(l)}{r(l)} = \frac{c(l) - b(l)}{b(l)} \quad (3.5)$$

Trong đó, $c(l)$ và $b(l)$ lần lượt là dung lượng và băng thông còn lại của liên kết l .

Thành phần trọng số liên kết thứ ba được tính theo tần suất sử dụng liên kết trong các đường đi đã được thiết lập.

$$crit_3(l) = \frac{|EstP_l|}{|EstP|} \quad (3.6)$$

$|EstP_l|$ là tổng số đường đi đã được thiết lập có chứa liên kết l

$|EstP|$ là tổng số đường đi đã được thiết lập

Công thức 3.7 tổng hợp ba giá trị tối hạn trên thành trọng số liên kết của thuật toán đề xuất TEARD:

$$w(l) = k_1.crit_1(l) + k_2.crit_2(l) + k_3.crit_3(l) \quad (3.7)$$

k_1, k_2, k_3 là tham số điều chỉnh

$0 < k_1, k_2, k_3$ và $k_1 + k_2 + k_3 = 1$

Ngoài ra, thuật toán TEARD còn có pha offline sử dụng phương pháp depth-first search để tìm đường đi cho các cặp nguồn đích và tính giá trị $crit_{ie}(l)$. Lưu ý pha offline thực hiện trước khi có yêu cầu định tuyến và chỉ thực hiện lại khi sơ đồ mạng thay đổi. Trong khi đó, pha online là quá trình tìm đường đi khi nhận được yêu cầu.

Bảng 3.3 so sánh độ phức tạp của hai thuật toán được đề xuất với các công trình liên quan. Trong đó, n là số nút mạng, m là số liên kết, và k là số cặp nguồn đích.

Bảng 3.3 Độ phức tạp của thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông

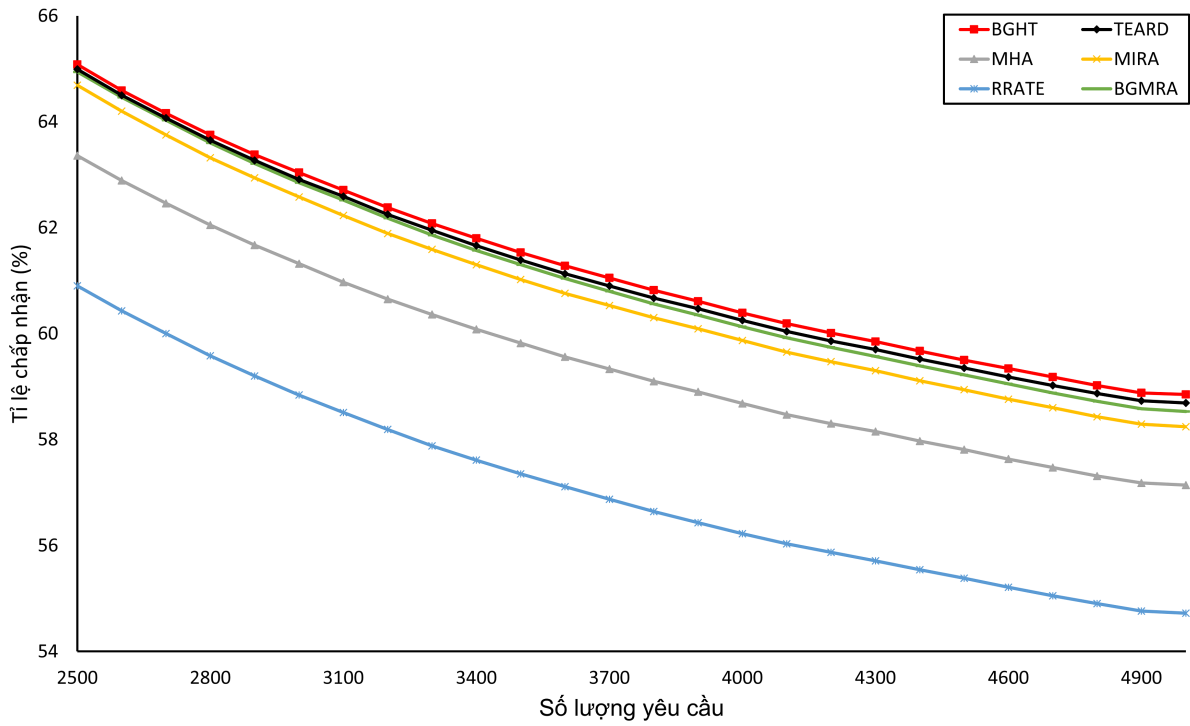
Thuật toán	Độ phức tạp
MHA, BCRA DORA, BGMRA BGHT	$O(m + mn)$
TEARD	$O(km + mn)$
MIRA, NewMIRA	$O((k - 1)nm^2 + nm)$

3.3 Kết quả mô phỏng

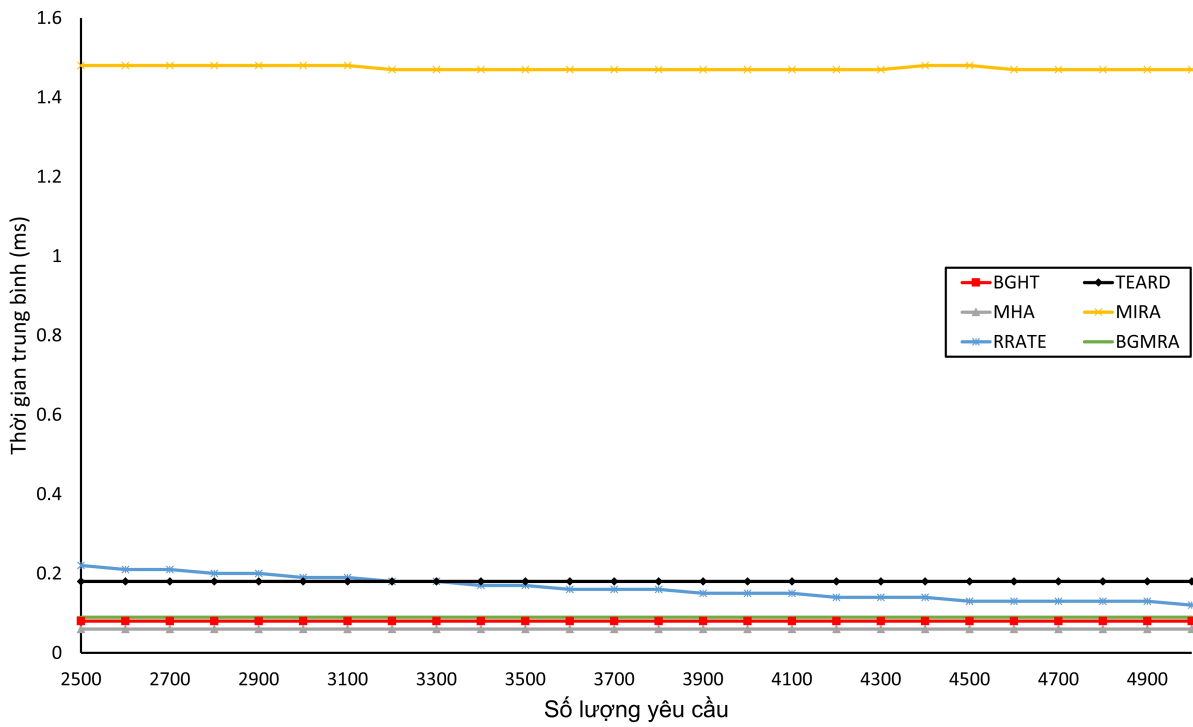
Hình 3.10 thể hiện kết quả trung bình của 100 thử nghiệm trên sơ đồ ANSNET với kịch bản định tuyến động.

Hai thuật toán định tuyến đã đề xuất BGHT và TEARD có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu cao nhất với giá trị lần lượt là 58.9% và 58.7% (hình 3.10a). Kết quả của BGHT cao hơn 0.9% so với của BCRA và cao hơn MHA 1.9%. Hai thuật toán POOA và RRATE vẫn có tỉ lệ chấp nhận thấp nhất vì k đường đi chọn trước trong pha offline không đủ đáp ứng yêu cầu một cách linh hoạt. Thuật toán TEARD có kết quả tỉ lệ cao hơn BGMRA (58.7% so với 58.5%), chứng tỏ TEARD có phương pháp tính trọng số liên kết hiệu quả hơn, giúp lựa chọn đường đi tốt hơn để thực hiện mục tiêu của bài toán định tuyến.

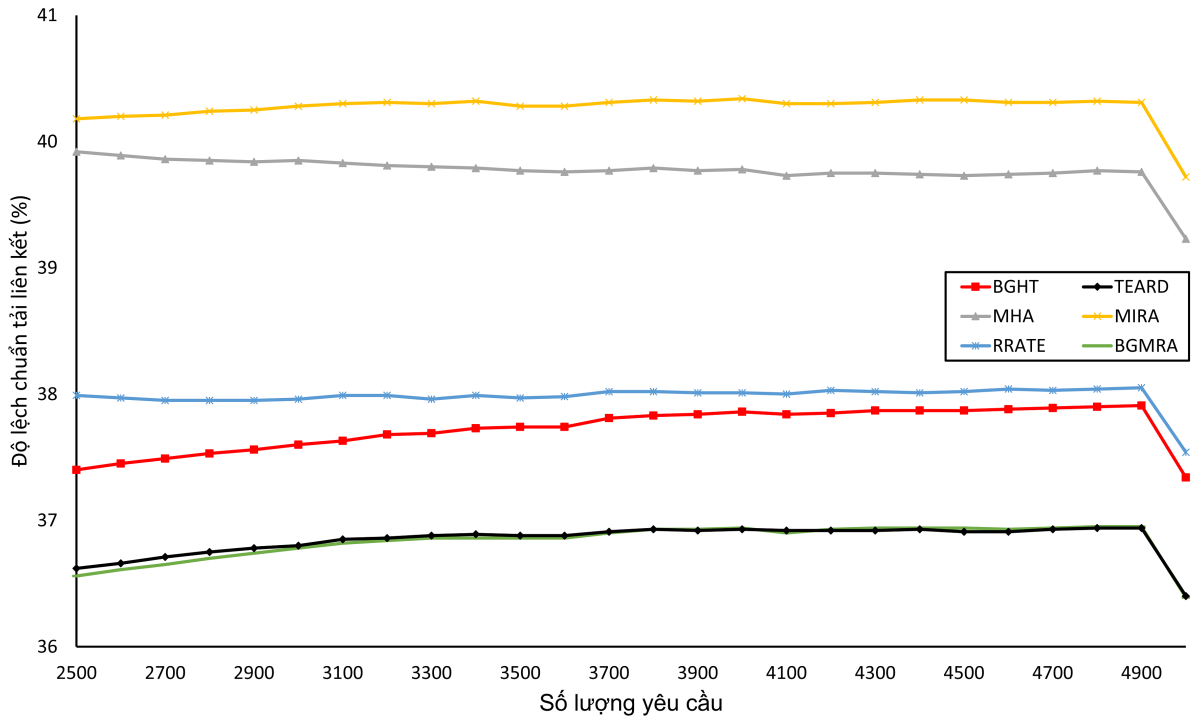
Hình 3.10b so sánh thời gian tính toán trung bình của các thuật toán. Thuật toán MHA có thời gian tính thấp nhất 0.12 ms kể đến là



(a) Tỉ lệ chấp nhận yêu cầu



(b) Thời gian tính toán trung bình



(c) Độ lệch chuẩn tải liên kết

Hình 3.10 Kết quả trung bình 100 bộ yêu cầu định tuyến động, điều kiện tải cao, sơ đồ ANSNET

BGHT 0.12 ms. Thuật toán TEARD có thời gian tính trung bình 0.26 ms, cao hơn kết quả của thuật toán RRATE 1.6 lần nhưng thấp hơn của MIRA 8.5 lần.

Hình 3.10c cho thấy trong các thử nghiệm trên sơ đồ ANSNET, thuật toán BGMRA và TEARD có độ lệch chuẩn tải liên kết thấp nhất lần lượt là 33.1% và 33.2%. Thuật toán BGHT có kết quả 34.3% thấp hơn cả RRATE (36.3%), MHA (38.6%), và MIRA (39.4%).

3.4 Kết chương

Chương 3 trình bày hai thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông đã được nghiên cứu sinh đề xuất: BGHT (được nghiên cứu sinh công bố trong (CT3)) và TEARD (được công bố trong (CT4) và (CT5)). Hai thuật toán này được so sánh, đánh giá với tám công trình liên

quan MHA, BCRA, MIRA, NewMIRA, DORA, BGMRA, RRATE, và POOA. Thử nghiệm được tiến hành trên ba sơ đồ mạng khác nhau, với ba kịch bản định tuyến và số lượng lớn bộ yêu cầu được phát sinh ngẫu nhiên. Kết quả mô phỏng đã chứng tỏ hai thuật toán BGHT và TEARD có hiệu quả định tuyến tốt. Mã nguồn thuật toán định tuyến cũng như các bộ yêu cầu thử nghiệm được công bố tại địa chỉ <https://github.com/caoth/BandwidthAlgorithms>.

CHƯƠNG 4. THUẬT TOÁN ĐỊNH TUYẾN ĐẢM BẢO BĂNG THÔNG VÀ ĐỘ TRỄ

4.1 HRABDC: Thuật toán heuristic đảm bảo băng thông và độ trễ

Trong bài toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ, một yêu cầu $r(s, d, \beta, \delta)$ yêu cầu thiết lập một đường đi từ s đến d với điều kiện băng thông còn lại trên mỗi liên kết lớn hơn hoặc bằng giá trị β , và tổng độ trễ các liên kết nhỏ hơn hoặc bằng giá trị δ . Mục tiêu của thuật toán định tuyến là lựa chọn đường đi sao cho đáp ứng tối đa số yêu cầu nhận được. Theo hướng tiếp cận heuristic trọng số liên kết, thuật toán đảm bảo băng thông và độ trễ có hai phần. Phần thứ nhất tính trọng số liên kết để làm cơ sở lựa chọn đường đi. Phần thứ hai tìm đường đi đảm bảo điều kiện băng thông và độ trễ.

Thuật toán được nghiên cứu sinh đề xuất với tên gọi Heuristic Routing Algorithm with Bandwidth Delay Constraints (HRABDC) áp dụng một công thức tính trọng số mới, đơn giản nhưng hiệu quả; đồng thời, có phương pháp tìm đường rút ngắn được thời gian tính toán so với

những thuật toán đã có.

$$w(l) = \frac{\text{băng thông đang đảm bảo}}{\text{băng thông còn lại}} = \frac{c(l) - b(l)}{b(l)} \quad (4.1)$$

Sau khi có trọng số liên kết, HRABDC áp dụng một phương pháp tìm đường mới, được phát triển từ Dijkstra mở rộng. Thay vì mất nhiều thời gian tìm đường đi có trọng số nhỏ nhất, nghiên cứu sinh đề xuất phương pháp Dijkstra heuristic tìm đường đi thỏa điều kiện độ trễ và có trọng số càng nhỏ càng tốt.

Với công thức tính trọng số đơn giản và phương pháp tìm đường heuristic, thuật toán đã đề xuất HRABDC có độ phức tạp thấp hơn so với các công trình liên quan.

Bảng 4.2 Độ phức tạp của thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ

Thuật toán	Độ phức tạp
LDA	$O(m + n^2)$
MDWCRA	$O(kn \log n + \delta^2 n^2)$
M-MDWCRA	$O(kn^2 \log n + \delta^2 n^2)$
MDMF	$O(kn^2 \log n + knm^2 + mn^2)$
HRABDC	$O(m + 2n^2)$
<i>k, m, n, δ lần lượt là số cặp nguồn đích, số liên kết, số nút mạng, và độ trễ yêu cầu</i> Thông thường, số nút mạng, $n < 50$	

4.2 Tăng cường khả năng tìm đường đi có trọng số nhỏ cho Dijkstra heuristic

Phương pháp Dijkstra heuristic sử dụng một mục en_n tại mỗi nút mạng n để lưu vết thông tin trong quá trình tìm đường đi. Tuy nhiên, mục thông tin được cập nhật một cách tham lam theo giá trị trọng số tích lũy và chỉ lưu vết được một đường đi có trọng số nhỏ nhất tại nút đang xét. Vì vậy, Dijkstra heuristic không đảm bảo tìm được đường

Thuật toán 4.1 Thuật toán Dijkstra heuristic tìm đường đi thỏa điều kiện độ trễ và có trọng số nhỏ

<p>Input: Mạng $G(N, L)$ Yêu cầu định tuyến $r(s, d, \beta, \delta)$ Tập giá trị độ trễ thấp nhất từ các nút mạng đến nút đích $ld_{n,d} n \in N$</p> <p>Output: Đường đi thỏa điều kiện độ trễ hoặc NULL // không có đường đi</p> <p>1: function HEURISTIC_DIJKSTRA(G, r) 2: INIT(G) 3: $Q = \{en_n n \in N\}$ // en_n là một mục của nút n 4: while $Q \neq \emptyset$ do 5: tìm $en_n \in Q : w_n = \min_{en \in Q} \{w\}$ 6: $Q = Q - en_n$ 7: for liên kết l_{no} từ nút n đến nút liền kề o do 8: RELAX($Q, en_n, l_{no}, o, \delta, ld_{o,d}$) 9: end for 10: end while 11: GETPATH(G) 12: end function</p> <p>13: function INIT(G)</p>	<p>14: for nút $n \in N$ do 15: $d_n = 0$ // độ trễ 16: $w_n = \infty$ // trọng số 17: $m_n = NULL$ // nút trước 18: end for 19: $w_s = d_s = 0$ // nút nguồn s 20: end function 21: function RELAX($Q, en_n, l, o, \delta, ld_{o,d}$) 22: $new_w = w_n + w(l)$ 23: if $new_w < w_o$ then 24: $new_d = d_n + d(l)$ 25: if $en_o \in Q$ và $(new_d + ld_{o,d}) \leq \delta$ then 26: $w_o = new_w$ 27: $d_o = new_d$ 28: $m_o = n$ 29: end if 30: end if 31: end function 32: function GETPATH(G) 33: if $m_d \neq NULL$ then 34: trả về đường đi dựa trên nút trước m_d 35: end if 36: trả về NULL 37: end function</p>
---	--

đi trọng số nhỏ nhất. Với mong muốn tìm đường đi có trọng số càng nhỏ càng tốt, nghiên cứu sinh bổ sung một vòng lặp cho phương pháp Dijkstra heuristic. Mỗi lần lặp, thuật toán tìm một đường đi thỏa điều kiện độ trễ từ nút nguồn đến nút đích. Liên kết có trọng số lớn nhất trong đường đi vừa tìm được sẽ bị loại bỏ (tạm thời) khỏi sơ đồ mạng trước khi lặp lại kỹ thuật Dijkstra heuristic. Quá trình lặp dừng lại khi không còn đường đi từ nguồn đến đích. Đường đi có trọng số nhỏ nhất trong tập hợp đường đi tìm được sẽ được sử dụng để đáp ứng yêu cầu

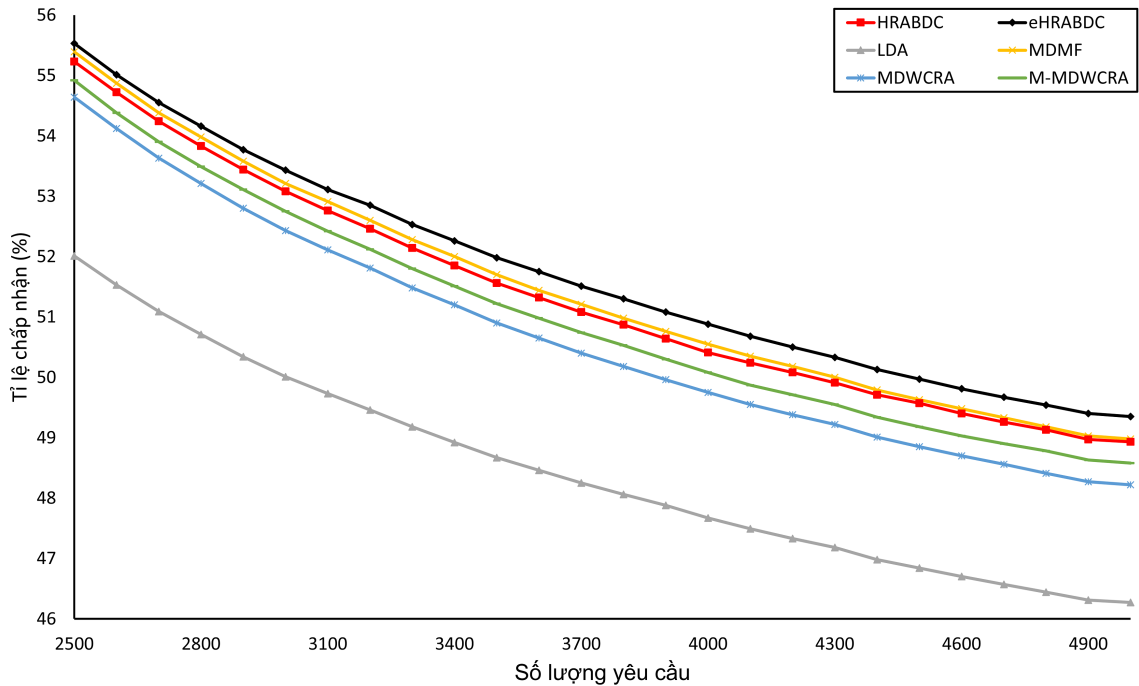
định tuyến. Giải pháp này được gọi là *Dijkstra heuristic cải tiến* và được sử dụng trong một cải tiến cho thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ eHRABDC.

Thuật toán 4.2 Thuật toán Dijkstra heuristic cải tiến

<p>Input: Mạng $G(N, L)$ Yêu cầu định tuyến $r(s, d, \beta, \delta)$ Tập giá trị độ trễ thấp nhất từ các nút mạng đến nút đích $ld_{n,d} n \in N$</p> <p>Output: Đường đi thỏa điều kiện độ trễ hoặc NULL // không có đường đi</p>	<pre> 4: while $p \neq NULL$ do 5: Thêm p vào Π 6: Tạm thời bỏ liên kết max_l khỏi $G : w(max_l) = \max_{l \in p} \{w(l)\}$ 7: $p = \text{HEURISTIC_DIJKSTRA}(G, r)$ 8: end while 9: if $\Pi \neq \emptyset$ then 10: trả về $p_i : w(p_i) = \min_{p \in \Pi} \{w(p)\}$ 11: end if 12: trả về NULL 13: end function </pre>
<pre> 1: function ENHANCED_HEU_DIJ(G, r) 2: $\Pi = \emptyset$ 3: $p = \text{HEURISTIC_DIJKSTRA}(G, r)$ </pre>	

4.3 Kết quả mô phỏng

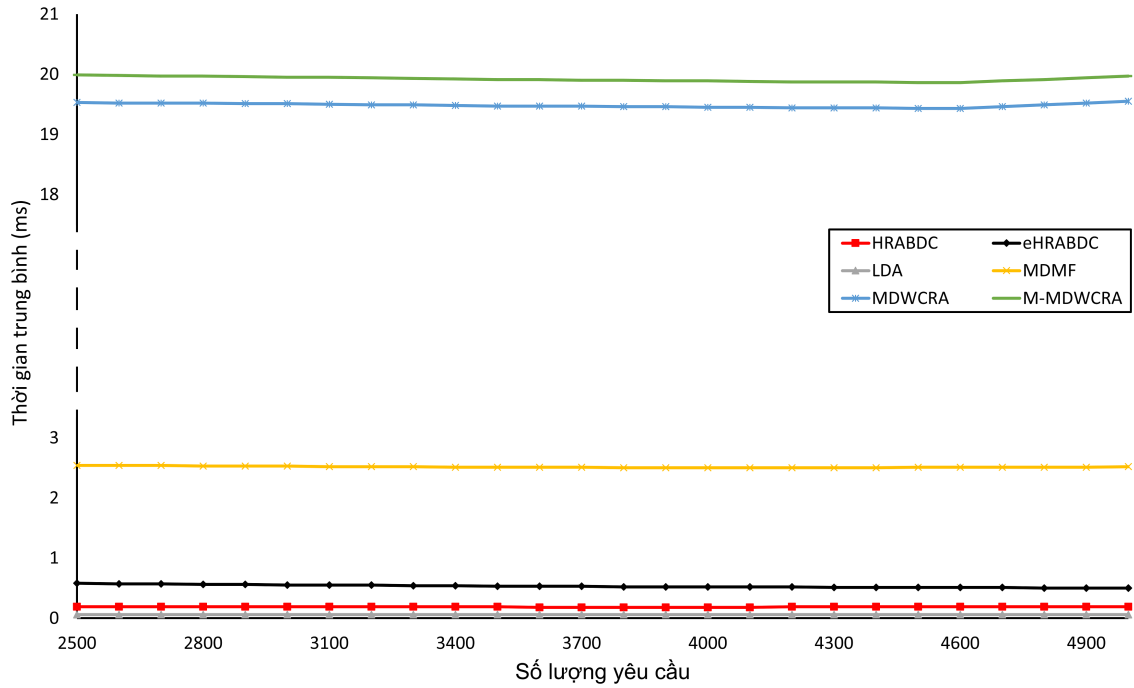
Hai thuật toán định tuyến đã đề xuất HRABDC và eHRABDC được so sánh, đánh giá với các công trình liên quan LDA, MDWCRA, M-MDWCRA, và MDMF. Trong thử nghiệm định tuyến động, tỉ lệ chấp nhận yêu cầu của thuật toán eHRABDC là cao nhất. Đồng thời, HRABDC cũng luôn có kết quả chấp nhận yêu cầu định tuyến động cao hơn M-MDWCRA, MDWCRA, và LDA. Ví dụ, hình 4.4 thể hiện eHRABDC chấp nhận nhiều hơn MDMF 0.4% yêu cầu trong thử nghiệm định tuyến động điều kiện tải cao (49.4% so với 49%). HRABDC có kết quả tỉ lệ thấp hơn MDMF 0.1% nhưng cao hơn M-MDWCRA 0.3%, cao hơn MDWCRA 0.7%. Trong khi đó, LDA có tỉ lệ chấp nhận thấp nhất 46.3%.



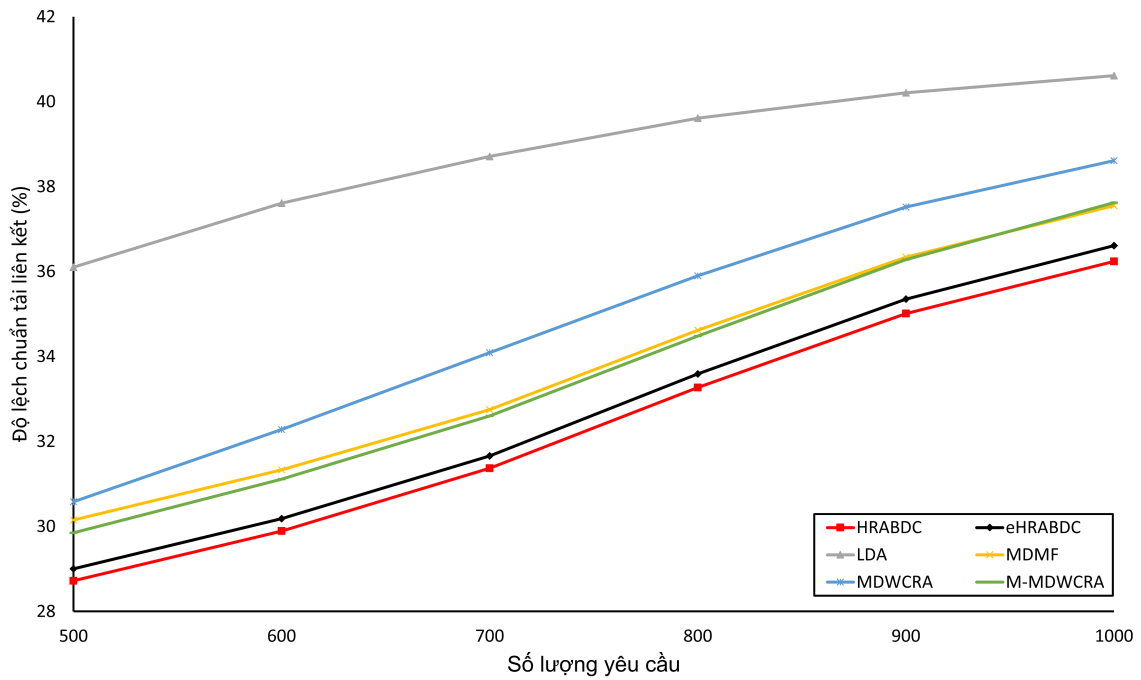
Hình 4.4 So sánh tỉ lệ chấp nhận yêu cầu của thử nghiệm định tuyến động, điều kiện tải cao, sơ đồ MIRA

Mặt khác, hai thuật toán đã đề xuất có ưu thế vượt trội về thời gian tính toán trung bình so với các công trình liên quan. Ví dụ trong thử nghiệm trên sơ đồ CESNET, thuật toán eHRABDC có kết quả thời gian cao hơn HRABDC 2.5 lần (0.5 ms so với 0.19 ms - hình 4.8) nhưng vẫn thấp hơn đáng kể so với các thuật toán khác. Cụ thể, kết quả thời gian của MDMF là 2.52 ms, cao hơn eHRABDC 5 lần, trong khi thời gian của MDWCRA và M-MDWCRA cao hơn eHRABDC gần 40 lần.

Xem xét đến tiêu chí độ lệch chuẩn tải liên kết (hình 4.9), HRABDC có kết quả độ lệch chuẩn thấp nhất 62.2%, kế đến là eHRABDC 36.6%. Hai thuật toán MDMF và M-MDWCRA có độ lệch chuẩn tải liên kết bằng nhau 37.6%, trong khi kết quả của LDA là cao nhất 40.6%.



Hình 4.8 So sánh thời gian tính toán trung bình của thử nghiệm định tuyến động, điều kiện tải cao, sơ đồ CESNET



Hình 4.9 So sánh độ lệch chuẩn tải liên kết của thử nghiệm định tuyến tĩnh, sơ đồ CESNET

4.4 Kết chương

Chương 4 trình bày hai đề xuất của nghiên cứu sinh cho bài toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ: HRABDC và eHEABDC lần lượt được công bố trong hai công trình (CT6) và (CT7). Kết quả thử nghiệm cho thấy HRABDC và eHRABDC không chỉ có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu cao, độ lệch chuẩn tải liên kết thấp mà đặc biệt có thời gian tính toán trung bình rất thấp so với những công trình đã công bố. Mã nguồn cài đặt các thuật toán được công bố tại địa chỉ <https://github.com/caoth/BandwidthDelayAlgorithms>.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Với mục tiêu giải quyết bài toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ, nghiên cứu sinh đã đạt được những kết quả, đóng góp mới được thể hiện trong luận án như sau:

1. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông BGHT sử dụng thời gian giữ băng thông của yêu cầu định tuyến, với điều kiện thời gian này được biết. Kết quả mô phỏng cho thấy BGHT có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu cao hơn, trong khi thời gian tính toán trung bình thấp hơn các công trình liên quan.
2. Đề xuất thuật toán định tuyến TEARD sử dụng các thông tin từ hệ thống mạng và yêu cầu định tuyến đã nhận được. Thuật toán có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu tốt hơn và thời gian tìm đường so sánh được với công trình liên quan.
3. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ HRABDC với phương pháp tính trọng số liên kết đơn giản và kĩ thuật tìm đường Dijkstra heuristic được nghiên cứu sinh cải tiến từ thuật toán Dijkstra cho bài toán tìm đường đảm bảo độ trễ. HRABDC không chỉ có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu tốt hơn mà còn

có thời gian tính trung bình thấp hơn rất nhiều so với các công trình liên quan.

4. Đề xuất thuật toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ eHRABDC bổ sung độ trễ vào công thức trọng số và áp dụng Dijkstra tăng cường heuristic nhằm cố gắng tìm đường đi có trọng số nhỏ. Thuật toán tìm được đường đi có trọng số nhỏ hơn HRABDC và trong nhiều thử nghiệm có tỉ lệ chấp nhận yêu cầu cao hơn. Về thời gian tìm đường, kết quả của eHRABDC tuy cao hơn HRABDC nhưng vẫn thấp hơn các thuật toán định tuyến liên quan khác.
5. Xây dựng chương trình mô phỏng để thử nghiệm, so sánh các thuật toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ. Chương trình được cài đặt với kiến trúc mở, dễ dàng cài đặt thêm thuật toán hoặc mở rộng yêu cầu chất lượng. Toàn bộ mã nguồn chương trình bao gồm các thuật toán nghiên cứu sinh đã đề xuất và các thuật toán liên quan được công bố trên mạng Internet.

Dựa trên những kết quả đạt được, nghiên cứu sinh kiến nghị hướng phát triển tiếp theo bao gồm:

- Triển khai các thuật toán định tuyến đã đề xuất cũng như một số thuật toán liên quan trên hệ thống mạng MPLS TE với máy chủ định tuyến và các giao thức đảm bảo yêu cầu bài toán. Từ đó tiến hành thử nghiệm, đánh giá, so sánh hiệu quả định tuyến của các thuật toán trên hệ thống mạng thực tế.
- Giải quyết bài toán multicast đảm bảo chất lượng dịch vụ với cùng mục tiêu tìm cây đường đi cho mỗi yêu cầu định tuyến sao cho đáp ứng tối đa số yêu cầu nhận được.
- Nghiên cứu cơ chế bảo vệ và phục hồi đường truyền trong hoạt động mạng máy tính áp dụng với các thuật toán định tuyến đảm bảo chất lượng dịch vụ khác nhau.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

- (CT1) Cao Thai Phuong Thanh, Tran Cong Hung (2012), "Bandwidth guaranteed routing algorithms for traffic engineering: An application case on MPLS networks", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Chuyên san các công trình nghiên cứu về điện tử, viễn thông, và công nghệ thông tin (The Special Issue on Electronics, Communications, and Information of the Journal of Science and Technology)* 50(2A), pp. 75-86.
- (CT2) Cao Thai Phuong Thanh, Tran Cong Hung (2013), "A Study of Bandwidth Guaranteed Routing Algorithms for Traffic Engineering", *Fourth International Conference on Computational Collective Intelligence Technologies and Applications, ICCCI 2012, Springer, Vietnam*, pp. 313-322.
- (CT3) Cao Thai Phuong Thanh, Ha Hai Nam, Tran Cong Hung (2013), "Low complexity bandwidth guaranteed routing algorithms using path holding time", *Fifth International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, SoCPaR 2013, IEEE, Vietnam*, pp. 92 – 97.
- (CT4) Cao Thai Phuong Thanh, Ha Hai Nam, Tran Cong Hung (2014), "A Novel Traffic Engineering Routing Algorithm with Routing Data", *First NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, NICS 2014, Vietnam*, pp. 211 – 220.
- (CT5) Cao Thai Phuong Thanh, Ha Hai Nam, Tran Cong Hung (2014), "Solving Bandwidth-Guaranteed Routing Problem Using Routing Data", *International Journal of Computer Networks & Communications* 6(6), pp. 97-108.
- (CT6) Cao Thai Phuong Thanh, Ha Hai Nam, Tran Cong Hung (2014), "A heuristic algorithm for bandwidth delay constrained routing".

The 2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications, ATC 2014, IEEE, Vietnam, pp. 99 - 104.

- (CT7) Cao Thai Phuong Thanh, Ha Hai Nam, Tran Cong Hung (2014), "Một cách tiếp cận heuristic cho bài toán định tuyến đảm bảo băng thông và độ trễ", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Chuyên san các công trình nghiên cứu về điện tử, viễn thông, và công nghệ thông tin (The Special Issue on Electronics, Communications, and Information of the Journal of Science and Technology)* 52(6C), pp. 84-99.