

GIẢI PHÁP ĐỊNH TUYẾN VÀ GÁN PHỔ TẦN ĐỘNG HIỆU QUẢ CHO MẠNG QUANG SD-EON ĐA MIỀN ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN

EFFICIENT DYNAMIC ROUTING AND SPECTRUM ASSIGNMENT

FOR DISTRIBUTED MULTI-DOMAIN SOFTWARE-DEFINED ELASTIC OPTICAL NETWORKS

Phan Thị Thu Hằng¹, Lê Hải Châu^{2,*}

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất giải pháp định tuyến và gán phổ tần động có khả năng hạn chế phân mảnh phổ cho mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền dựa trên cơ chế điều khiển phân tán. Nhằm thực hiện hiệu quả quá trình định tuyến liên miền, thay vì sử dụng một bộ điều phối SDN để điều khiển/điều phối hoạt động của tất cả các bộ điều khiển SDN của các vùng mạng như thông thường, chúng tôi đề xuất ứng dụng cơ chế điều khiển phân tán giữa các bộ điều khiển vùng trong đó, các bộ điều khiển SDN của các vùng chỉ trao đổi thông tin định tuyến với các bộ điều khiển lân cận (có liên kết điều khiển trực tiếp) khi có yêu cầu thiết lập/giải phóng kết nối quang. Trong giải pháp được đề xuất, kỹ thuật định tuyến được thực hiện thông qua cơ chế phát quảng bá yêu cầu và lựa chọn tuyến đường khả dụng ngắn nhất, trong khi việc gán phổ tần được thực hiện với mục tiêu giảm thiểu phân mảnh phổ tần trong mạng. Nhờ vậy, hệ thống điều khiển SDN của các vùng mạng không cần phải biết trước thông tin định tuyến toàn cục mà chỉ cần trao đổi thông tin định tuyến theo cơ chế phân tán tới các hệ thống kế cận nhằm tăng tính thích nghi của các tuyến đường đối với những thay đổi bên trong các vùng mạng cũng như bảo mật thông tin nội vùng. Để đánh giá hiệu quả của giải pháp đề xuất, chúng tôi cũng đã sử dụng phương pháp mô phỏng số và các kết quả mô phỏng thu được cho thấy rằng giải pháp định tuyến và gán phổ tần động được đề xuất cho phép đạt được hiệu năng cao hơn và có thể làm giảm đáng kể xác suất chặn kết nối của mạng so với giải pháp GMPLS/PCE truyền thống.

Từ khóa: Mạng thông tin quang, mạng định nghĩa bằng phần mềm, thiết kế và tối ưu hóa mạng, thuật toán định tuyến và gán phổ tần.

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient dynamic routing and spectrum assignment algorithm for dynamic distributed multi-domain software-defined elastic optical networks. In our work, rather than the deployment of an SDN orchestrator on top of all the controllers, we adopt a distributed control approach where domain controllers communicate with each other to establish/release inter-domain lightpath requests. The developed algorithm also employs breadth first search algorithm for routing and spectral fragmentation-aware assignment technique to find the suitable spectrum resources along the selected route. Numerical experiments demonstrate that the proposed control scheme enhances the network performance significantly comparing with the conventional GMPLS/PCE scheme; it offers up to 64.66% blocking probability reduction.

Keywords: Optical network, software-defined networking, network design, routing and spectrum assignment.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

* Email: chaulh@ptit.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/01/2018

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/3/2018

Ngày chấp nhận đăng: 21/8/2018

Phản biện khoa học: TS. Dư Đình Viên

1. GIỚI THIỆU

Trong suốt thập kỷ vừa qua, lưu lượng Internet đang phát triển bùng phát do sự phát triển đa dạng của các loại hình dịch vụ mới như video theo yêu cầu, điện toán đám mây,... cũng như do sự xuất hiện của nhiều loại hình dịch vụ bằng thông siêu cao mới (3D/4k TV,...) [1]. Nhu cầu lưu lượng này không chỉ đặt ra các áp lực gia tăng không chỉ về số lượng, chất lượng mà còn cả về sự linh hoạt trong băng thông và trong việc cung cấp dịch vụ của mạng lưới. Trong quá trình thích ứng với các nhu cầu lưu lượng mới, mạng đường trục quang với công nghệ cơ bản hiện tại là WDM đang gặp phải rất nhiều thách thức do những hạn chế về kỹ thuật như việc sử dụng lưới tần số cố định hay các hạn chế về khả năng cung cấp linh hoạt dịch vụ với băng thông thay đổi [2, 3]. Gần đây, để giải quyết những hạn chế của công nghệ mạng lõi hiện tại, công nghệ mạng quang lưới bước sóng linh hoạt (Elastic Optical Network - EON) đã được đề xuất và nghiên cứu triển khai với tư cách là công nghệ mạng đường trục hứa hẹn trong tương lai gần [4-8]. Mạng quang lưới bước sóng linh hoạt sử dụng lưới tần số linh hoạt có khả năng tận dụng hiệu quả băng tần sợi quang và cung cấp dịch vụ với băng thông linh hoạt (từ các dịch vụ tốc độ thấp đến các dịch vụ tốc độ cao và siêu cao). Bên cạnh đó, nhằm giải quyết triệt để các khó khăn tồn tại trong kỹ thuật điều khiển mạng hiện tại, cũng như để tạo sự linh hoạt trong vấn đề quản lý, điều khiển và triển khai dịch vụ mới, kỹ thuật mạng điều khiển bằng phần mềm (Software-

Defined Networking - SDN) đã được nghiên cứu và đề xuất cho mặt phẳng điều khiển, quản lý và ứng dụng của các hệ thống mạng tương lai [9-10]. Giải pháp kết hợp giữa công nghệ mạng điều khiển bằng phần mềm và công nghệ mạng quang lưới bước sóng linh hoạt hứa hẹn cho phép hiện thực hóa việc cung cấp động các dịch vụ kết nối bằng thông tin hoạt động trên cơ sở hạ tầng linh hoạt có khả năng tùy biến cao, tạo điều kiện cho các nhà cung cấp dịch vụ điều chỉnh và hoạch định chiến lược nâng cấp hạ tầng một cách cơ động, hiệu quả để đáp ứng tốt các yêu cầu phức tạp của nhiều loại hình dịch vụ khác nhau [10-15].

Hầu hết các nghiên cứu cho đến nay đều chủ yếu tập trung vào các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đơn miền. Tuy nhiên, kiến trúc mạng đa miền là rất cần thiết và có tính thực tế cao xuất phát từ yêu cầu về phối hợp hoạt động liên mạng/liên vùng. Mạng đa miền có thể được áp dụng trong một số trường hợp thực tế như hoạt động phối hợp liên mạng khi triển khai các thiết bị của nhiều nhà cung cấp khác nhau, khi phân chia mạng thành các phân vùng, khu vực để tăng cường khả năng nâng cấp và quản lý hiệu quả mạng cũng như nhằm hạn chế tầm với dịch vụ và quản lý các kịch bản mạng với các nút mạng phân tán do đặc điểm địa lý hay do nhu cầu quản lý theo vùng [16-18]. Để hiện thực hóa được các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt đa miền định nghĩa bằng phần mềm, nhiều cơ chế điều khiển và quản lý mạng được thực hiện, nổi bật lên nhà cơ chế điều phối chung (tương tự như kiến trúc PCE phân tầng) đã được nghiên cứu và đề xuất [19]. Các phương pháp điều khiển và quản lý phân tầng này đòi hỏi phải có một thiết bị điều phối SDN ở trung tâm cho mỗi một vùng mạng hoặc một hệ thống tự vận hành (AS). Mặt khác, kịch bản điều khiển mạng SD-EON đa miền phân tán cũng được mô tả trong [17], nhưng kịch bản này tập trung vào việc quản lý chỉ hai miền đơn giản mà chưa quan tâm đến khả năng định tuyến liên miền - một trong các yêu cầu thiết yếu của mạng đa miền. Ngoài ra, vấn đề phân mảnh phổ biến trong EON cũng đang là một trong các vấn đề cấp thiết cần được giải quyết, đặc biệt là đối với các mạng SD-EON đa miền cung cấp dịch vụ động. Cũng như đã được phân tích và nghiên cứu trong các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đơn miền [10-12], các mạng SD-EON đa miền cũng có thể gặp phải vấn đề suy giảm hiệu năng sử dụng tài nguyên phổ và tỉ lệ chặn kết nối cao do sự phân mảnh phổ tần gây ra trong quá trình thiết lập động các kết nối quang bằng thông tin hoạt động qua các miền mạng khác nhau [12].

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một giải pháp định tuyến và gán phổ tần hiệu quả cho mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền điều khiển theo cơ chế phân tán hiệu quả. Giải pháp đề xuất sử dụng phương pháp định tuyến theo cơ chế tìm kiếm theo chiều rộng và gán phổ tần kết hợp với các kỹ thuật tính toán giảm thiểu sự phân mảnh phổ trong mạng. Giải pháp đề xuất có ưu điểm là các hệ thống điều khiển SDN của một vùng mạng không cần phải biết trước thông tin định tuyến

và tuyến đường tìm được có khả năng thích nghi cao với những thay đổi trong các vùng mạng do việc trao đổi thông tin định tuyến được thực hiện theo cơ chế phân tán. Hiệu năng của giải pháp đề xuất được kiểm nghiệm và so sánh với giải pháp đường đi ngắn nhất và gán phổ tần trong kiến trúc (GMPLS/PCE) [19] bằng phương pháp mô phỏng số. Các kết quả đạt được cho thấy giải pháp đề xuất có hiệu năng vượt trội và cho phép giảm đáng kể xác suất chặn kết nối so với phương pháp thông thường; xác suất chặn kết nối toàn mạng có thể giảm tới 64,66%.

2. GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG HIỆU QUẢ CHO MẠNG SD-EON ĐA MIỀN PHÂN TÁN

2.1. Mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm điều khiển phân tán

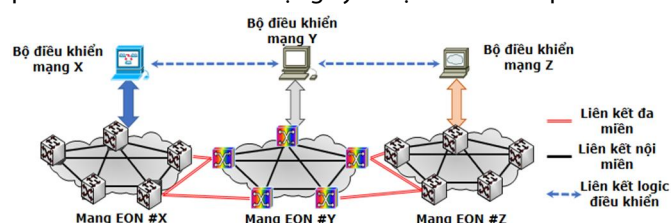
Mạng quang lưới bước sóng linh hoạt đang được dự đoán sẽ sớm được triển khai rộng khắp trên thế giới trong tương lai gần để hỗ trợ nhu cầu lưu lượng với tốc độ hỗn tạp (từ tốc độ rất thấp đến tốc độ siêu kênh lên tới hàng trăm Gbps) đang nhen nhóm với sự ra đời của các dịch vụ và ứng dụng mới hướng video [3]. Khi số lượng các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt được triển khai và số lượng nhà cung cấp viễn thông sử dụng công nghệ này tăng lên, việc phối hợp hoạt động và kết nối liên mạng giữ các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt với nhau và giữa các nhà cung cấp viễn thông với nhau sẽ trở thành vấn đề bức thiết và cần được quan tâm. Khi đó, kiến trúc mạng đa miền hình thành và liên quan mật thiết đến các kịch bản vận hành thực tế của mạng lưới như khi nhiều thiết bị của các nhà khai thác khác nhau được triển khai và cần kết nối với nhau, hay khi kỹ thuật phân vùng mạng được áp dụng để phân chia một mạng thành nhiều mạng/vùng mạng nhỏ nhằm tăng tầm phủ của mạng cũng như tăng khả năng nâng cấp và tạo điều kiện trong việc quản lý, vận hành mạng, hoặc khi các nút mạng bị phân bố trên một vùng địa lý rộng lớn [10-12]. Do đó, việc phát triển các giải pháp điều khiển động có khả năng hỗ trợ kết nối đầu cuối đến đầu cuối một cách hiệu quả trong khi vẫn thỏa mãn được các yêu cầu của mạng đa miền như tính bảo mật, tính độc lập về chính sách của mỗi miền,... là vô cùng cần thiết.

Trong các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền, mỗi vùng mạng bao gồm các chuyển mạch quang băng tần khả chỉnh (bandwidth-variable ROADMs/OXC) được điều khiển bởi các agent định nghĩa bằng phần mềm (ví dụ: OpenFlow agent) và một bộ điều khiển SDN dành riêng như là NOX, POX, OpenDaylight,... Bộ điều khiển SDN dành riêng dùng để cập nhật/trao đổi thông tin và điều khiển các thiết bị chuyển mạch quang thông qua các SDN agent và giao thức OpenFlow [9, 10]. Nhờ kiến trúc điều khiển tập trung trong mỗi miền, các bộ điều khiển SDN của mỗi vùng mạng có thể dễ dàng quản lý và bảo trì các thông tin nội vùng như là tính khả dụng của các khe phổ tần trên các liên kết mạng mà không yêu cầu thêm nhiều thông tin bổ sung trong mặt phẳng điều khiển. Các bộ điều khiển này cũng có khả năng thực hiện định tuyến và gán phổ tần nội mạng cùng việc

điều khiển động các hệ thống trong mạng để cung cấp các kết nối đầu cuối đến đầu cuối dựa trên các kết quả định tuyến đó. Tuy nhiên, để phối hợp hoạt động và điều khiển giữa các miền mạng với nhau, người ta đã đưa ra nhiều giải pháp khác nhau và phân theo hai hướng tiếp cận chính là điều khiển tập trung và điều khiển phân tán.

Trong kỹ thuật điều khiển liên miền tập trung, giải pháp sử dụng bộ điều phối SDN đang rất được quan tâm nghiên cứu và triển khai thử nghiệm. Ý tưởng chính ở đây là sử dụng một bộ điều khiển SDN kết nối với tất cả các bộ điều khiển SDN nội vùng của các miền mạng để điều phối chung cho toàn bộ mạng lưới (hoặc một trong các bộ điều khiển SDN nội vùng đóng vai trò điều phối) [3, 4]. Giải pháp này có nhược điểm là bộ điều phối SDN yêu cầu được thông báo và cập nhật thông tin định tuyến và điều khiển của tất cả các miền mạng khác, do vậy, vị trí đặt bộ điều phối này cũng như việc phân quyền quản lý hệ thống cho các nhà cung cấp viễn thông trở thành vấn đề nan giải để đảm bảo hiệu năng điều khiển chung của mạng.

Bên cạnh đó, kỹ thuật điều khiển phân tán cũng đang cho thấy nhiều tiềm năng trong việc quản lý và điều khiển hiệu quả mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền. Ưu điểm nổi bật của kỹ thuật này là các bộ điều khiển SDN của các vùng mạng chỉ chia sẻ thông tin và điều phối hoạt động cùng các bộ điều khiển vùng mạng kế cận nó. Điều này giúp đơn giản hóa tiến trình điều khiển, tăng khả năng thích nghi với các trạng thái vùng mạng và đảm bảo tính độc lập tối đa cho mỗi vùng mạng. Một trong các đề xuất giải pháp điều khiển phân tán đáng chú ý nhất được công bố trong [17], tuy nhiên, giải pháp này chỉ nhắm đến mạng hai miền đơn giản, khó mở rộng cho các mạng đa miền cũng như không xem xét đến định tuyến trong mạng lớn và xử lý xung đột khi đăng ký sử dụng tài nguyên. Hình 1 thể hiện một kiến trúc mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền sử dụng kỹ thuật điều khiển phân tán.



Hình 1. Mạng quang lưới bước sóng linh hoạt đa miền định nghĩa bằng phần mềm điều khiển phân tán

2.2. Thuật toán định tuyến và gán phổ tần đề xuất

Nhằm thực hiện hiệu quả quá trình định tuyến liên mạng/liên vùng cho các mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền, thay vì sử dụng một bộ điều phối SDN (SDN orchestrator) để điều khiển/điều phối hoạt động của tất cả các bộ điều khiển SDN của các vùng mạng như thông thường, chúng tôi đề xuất ứng dụng cơ chế điều khiển phân tán giữa các bộ điều khiển vùng trong đó, các bộ điều khiển SDN của các vùng chỉ trao đổi thông tin định tuyến với các bộ điều khiển lân

cận (có liên kết điều khiển trực tiếp) khi có yêu cầu thiết lập/giải phóng kết nối quang. Ngoài ra, để tận dụng được các ưu điểm của kỹ thuật kết nối mạng định nghĩa bằng phần mềm và tăng cường khả năng thích nghi với trạng thái liên kết của các vùng mạng, kỹ thuật phát quảng bá thông tin yêu cầu kết nối và lựa chọn đường đi nhằm giảm thiểu sự phân mảnh phổ tần sẽ được sử dụng trong giải pháp đề xuất để thiết lập kết nối quang phục vụ các yêu cầu dịch vụ bước sóng quang với băng thông linh hoạt. Thuật toán định tuyến được sử dụng trong giải pháp đề xuất được phát triển dựa trên cơ sở thuật toán tìm kiếm theo chiều rộng (Breadth First Search). Mỗi yêu cầu kết nối liên mạng sẽ được bộ điều khiển SDN của vùng mạng nguồn tiếp nhận và khởi phát quá trình xử lý, các bộ điều khiển trung gian thực hiện chuyển tiếp và bộ điều khiển vùng đích sẽ quyết định khuôn dạng điều chế và gán phổ tần phù hợp. Cơ chế đăng ký sử dụng tài nguyên ngược (backward reservation) từ vùng đích về vùng nguồn cũng được áp dụng để tạo kết nối theo tuyến đường tìm được. Bảng 1 thể hiện thuật toán định tuyến được đề xuất để xử lý yêu cầu kết nối.

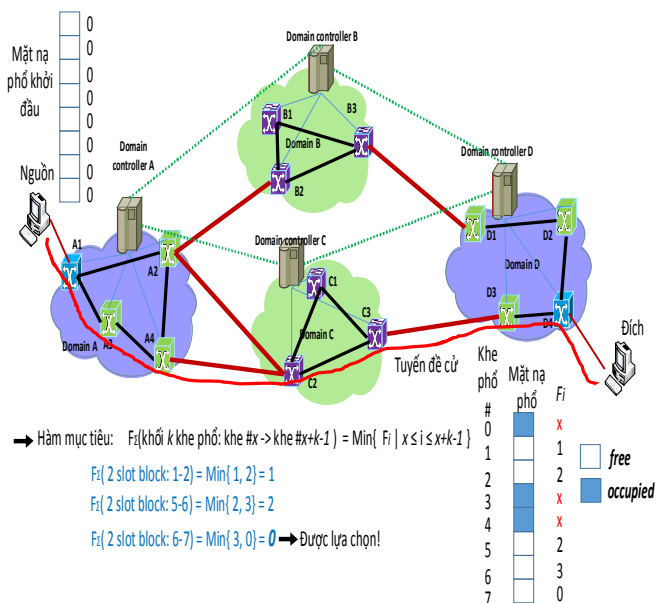
Bảng 1. Pseudo-code của thuật toán định tuyến

Đầu vào:	$G=\{V, E\}$ trong đó V và E là tập đỉnh (các vùng mạng) và tập cạnh (kết nối liên mạng) của mạng liên miền được các vùng mạng chia sẻ s := vùng mạng nguồn d := vùng mạng đích
Đầu ra:	Đường đi từ miền mạng s đến miền mạng d
Nội dung thuật toán tìm đường cho kết nối từ miền s đến miền d:	
1	Gán nhãn $ID_{s,d}$ cho yêu cầu kết nối;
2	Lập danh sách M chứa các vùng mạng đã tiếp nhận nhãn $ID_{s,d}$ Lập danh sách Q chứa các vùng mạng đang xử lý yêu cầu hiện tại;
3	$Q.enqueue(s);$ // Cho vùng nguồn s vào Q
4	$M.enqueue(s);$ // Đánh dấu vùng s đã tiếp nhận yêu cầu
5	while (Q is not empty & d is not in M) // Thực hiện tiếp khi còn miền đều đã tiếp nhận yêu cầu và chưa đạt đến đích
6	$v = Q.dequeue();$ // Vùng mạng v xử lý yêu cầu kết nối
7	for all neighbours w of v // Xem xét tất cả các vùng mạng w kế cận với v in Graph G
8	if w is not in M // Nếu w chưa tiếp nhận yêu cầu kết nối
9	$Q.enqueue(w);$ // Cho vùng w vào danh sách đã tiếp nhận Q
10	$M.enqueue(w);$ // Đánh dấu vùng w đã tiếp nhận yêu cầu
11	endif

```

12   endwhile
13 endwhile
14   if d is in M           // Kiểm tra kết quả định tuyến
15       Get_the_path(M, s, d); // Lấy đường đi bằng cách
                               // lần ngược thông tin
16   else
17       print Path is not found // Không tìm được đường
                               // đi (Chặn kết nối)
18   endif
    
```

Như vậy, giải pháp đề xuất của chúng tôi sẽ sử dụng thuật toán tìm kiếm theo chiều rộng (BFS) để tìm và các tuyến đường khả dụng từ vùng nguồn qua các vùng mạng trung gian đến vùng đích cho kết nối theo yêu cầu. Đối với mỗi yêu cầu kết nối nhận được, các bộ điều khiển SDN của các vùng tính toán để tìm đường đi ngắn nhất đến các vùng mạng kế cận, cập nhật thông tin cho các trường thông tin và chuyển tiếp bản tin với ba trường thông tin đã được cập nhật đến vùng mạng kế cận. Bộ điều khiển vùng đích sẽ thực hiện tính toán lựa chọn phương thức điều chế theo tổng khoảng cách từ thiết bị nguồn đến thiết bị đích và gán các khe tần số tương ứng bằng cách xem xét sự khả dụng của dãy các khe tần số trong mặt nạ phổ với hệ số cắt phổ nhận được là nhỏ nhất.



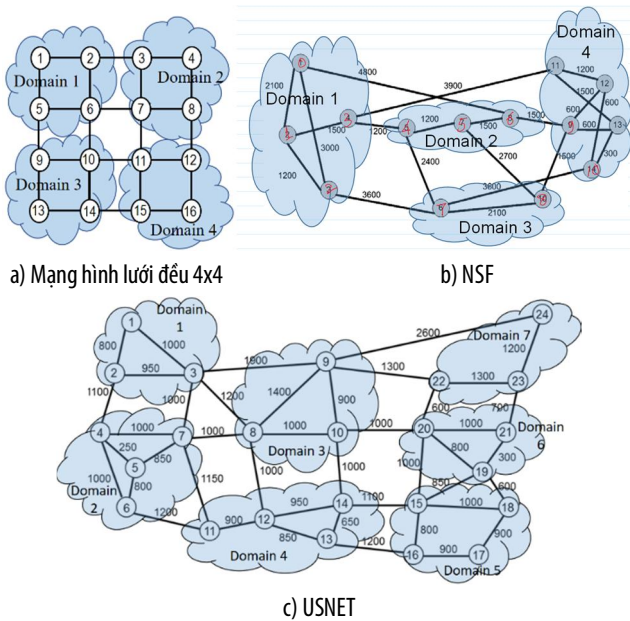
Hình 2. Thuật toán định tuyến và gán phổ tần giảm thiểu phân mảnh cho mạng SD-EON đa miền phân tán

Cơ chế hoạt động của thuật toán định tuyến và gán phổ tần động giảm thiểu phân mảnh được đề xuất được thực hiện như sau (minh họa trong hình 2): Khi có yêu cầu kết nối từ thiết bị (thiết bị nguồn) của một vùng mạng (vùng nguồn) đến một thiết bị (thiết bị đích) của vùng mạng khác (vùng đích), thiết bị nguồn sẽ khởi phát bản tin thông báo yêu cầu thiết lập kết nối tới bộ điều khiển SDN của vùng nguồn. Sau đó, bộ điều khiển thiết bị SDN vùng nguồn sẽ

tạo lập và phát quảng bá bản tin yêu cầu kết nối đến các bộ điều khiển lân cận. Cứ như vậy, khi bộ điều khiển của một vùng mạng nhận được thông tin kết nối, nó sẽ kiểm tra: 1) bản tin có bị trùng lặp với các bản tin trước hay không, nếu có thì loại bỏ, nếu không thì thực hiện 2) xem thiết bị đích có thuộc vùng mạng nó quản lý hay không, nếu không thì kiểm tra tính kết nối và tiếp tục chuyển tiếp bản tin yêu cầu đến các bộ điều khiển vùng mạng lân cận. Nếu thiết bị đích thuộc vùng mạng do bộ điều khiển SDN hiện thời quản lý, thiết bị này sẽ kiểm tra tính kết nối đến thiết bị đích và nếu thành công thì tạo lập bản tin kết nối để thực hiện đăng ký tài nguyên cho kết nối để gửi ngược trở lại cho các bộ điều khiển SDN trên tuyến đường đã gửi bản tin đến nó. Các bộ điều khiển khi nhận được bản tin kết nối cũng sẽ kiểm tra và đăng ký tài nguyên khả dụng cho kết nối và chuyển tiếp bản tin. Bản tin kết nối sẽ được chuyển ngược lại cho đến bộ điều khiển SDN của vùng nguồn. Nếu bản tin được gửi thành công đến vùng nguồn, tài nguyên cho kết nối từ thiết bị nguồn đến thiết bị đích sẽ được đăng ký và cung cấp để thiết lập kết nối từ đầu cuối đến đầu cuối. Kết nối không thực hiện được (bị chặn) nếu như tại một vùng mạng nào đó, bộ điều khiển không thể sắp xếp được tài nguyên khả dụng tới vùng mạng kế cận để chuyển tiếp bản tin. Trong đề xuất của chúng tôi, đối với mỗi khe tần số khả dụng i , hệ số cắt phổ, ký hiệu là F_i , được sử dụng để xác định một cách có định lượng sự phân mảnh phổ tần trong mạng. Hệ số cắt phổ được tính bằng số băng phổ bị chia cắt khi một kết nối một khe tần số được thực hiện tại khe tần số i . Đối với mỗi yêu cầu kết nối, các bộ điều khiển vùng sẽ tính cộng dồn và cập nhật ba trường thông tin định tuyến bao gồm: 1) tổng khoảng cách đến vùng mạng, (2) mặt nạ phổ $S=\{S_i | i=1..M\}$ trong đó M là tổng số khe phổ trên mỗi liên kết và S_i thể hiện tính khả dụng của khe tần số có chỉ số là i trên tuyến đường từ thiết bị nguồn đến vùng mạng hiện tại ($S_i=\text{free}$ hoặc occupied) và, (3) hệ số cắt phổ $F=\{F_i | i=1..M \text{ \& } S_i=\text{free}\}$. Các trường thông tin này có thể được các bộ điều khiển SDN vùng sử dụng để định tuyến cho yêu cầu kết nối, lựa chọn phương thức điều chế và gán phổ tần tương ứng nhằm giảm thiểu sự phân mảnh phổ tần trong mạng.

3. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Nhằm đánh giá hiệu năng của giải pháp định tuyến và gán phổ tần động được đề xuất cho mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền phân tán, phần này thể hiện các kết quả mô phỏng số, đánh giá kết quả thu được và so sánh với giải pháp thông thường. Mạng SD-EON đa miền có thể thiết lập và giải phóng kết nối linh hoạt theo yêu cầu và kịch bản mô phỏng được thực hiện trên mạng hình lưới đều (poly-grid network) 4x4 (16 nút mạng được tổ chức thành 4 miền) và trên hai cấu hình mạng thực tế của Mỹ là mạng NSF (National Science Foundation network) với 14 nút và 22 liên kết hai chiều và mạng đường trục Mỹ USNET (US backbone network) bao gồm 24 nút và 43 liên kết hai chiều (như minh họa trong hình 3).

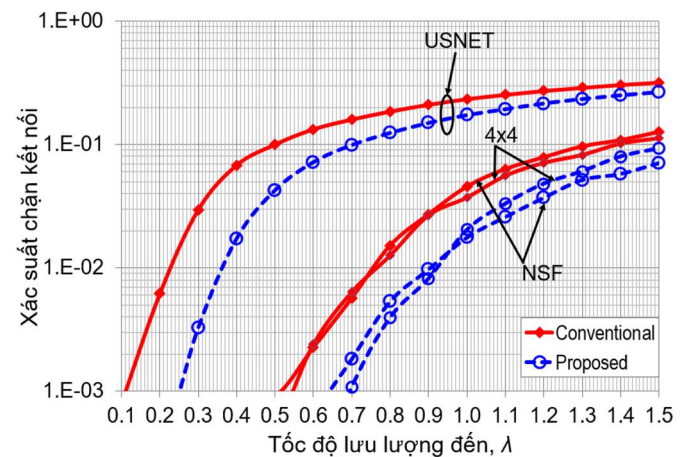


Hình 3. Cấu hình mạng thử nghiệm

Ngoài ra, chúng tôi cũng giả định một số tham số sử dụng trong mô phỏng như sau: mỗi liên kết quang có dung lượng tổng là 125 khe tần số với độ rộng mỗi khe tần số là 12,5 GHz như đề xuất của khuyến nghị ITU-T G.694.1 [21]. Các yêu cầu kết nối xuất hiện theo quy luật phân bố Poisson với tốc độ xuất hiện trung bình là λ (yêu cầu/đơn vị thời gian). Phân bố của thời gian giữ kết nối được giả định là theo quy luật mũ âm (negative exponential distribution) với giá trị trung bình là $1/\mu$ (đơn vị thời gian). Trong các mô phỏng số, dung lượng của mỗi kết nối được giả định là gán ngẫu nhiên theo một trong ba tốc độ tiêu chuẩn hiện nay cho mạng đường trục là 10 Gbps, 40 Gbps và 100 Gbps với số khe tần số yêu cầu tương ứng là 1, 3 và 7 khe. Để kiểm nghiệm mức độ hiệu quả của giải pháp đề xuất, chúng tôi cũng đã so sánh với phương pháp thông thường được áp dụng trong các mạng đường trục là tìm đường đi ngắn nhất là gán phổ tần *first-fit* (ví dụ, GMPLS/PCE) trong cùng các điều kiện và kịch bản mô phỏng số. Trong các kết quả thể hiện sau đây, các kết quả đạt được bởi giải pháp đề xuất sẽ được ký hiệu là **Proposed**, trong khi những kết quả tương ứng thu được bằng phương pháp thông thường được ký hiệu là **Conventional**.

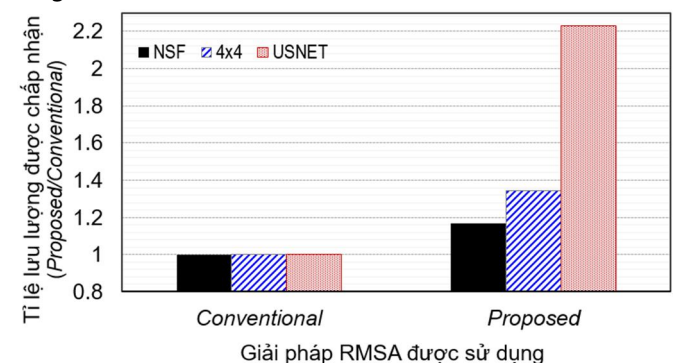
Sự so sánh hiệu năng các mạng thử nghiệm (4x4, USNET và NSF) theo tỉ lệ chặn kết nối, được tính bằng tỉ số giữa số kết nối không thực hiện được trên tổng số kết nối được yêu cầu giữa các nút mạng, khi tốc độ xuất hiện yêu cầu lưu lượng thay đổi từ 0,1 đến 1,5 giữa phương pháp đề xuất và phương pháp thông thường khi thời gian giữ kết nối trung bình được thiết lập ở mức 1000 đơn vị thời gian được thể hiện trên hình 4. Kết quả đạt được cho thấy các mạng SD-EON đa miền phân tán sử dụng giải pháp định tuyến và gán phổ tần đề xuất cho hiệu năng tốt hơn hẳn so với các mạng áp dụng giải pháp thông thường. Tại giá trị tốc độ xuất hiện của lưu lượng là 0.8 (lưu lượng tương ứng là 800 Erlang), giải pháp đề xuất góp phần giảm chỉ còn 32,96%

(hay 64,66%) tỉ lệ chặn kết nối đối với kịch bản cấu hình mạng mô phỏng là USNET (hoặc NSF, 4x4). Bên cạnh đó, xét tại tỉ lệ chặn kết nối là 10^{-3} , giải pháp đề xuất có khả năng tăng hiệu năng mạng theo dung lượng kết nối được chấp nhận (tổng số kết nối đạt được với tỉ lệ chặn tối đa là 10^{-3}) lên 1,65 (hay 1,24, 1,35) lần đối với mạng USNET (hay NSF, 4x4) so với giải pháp thông thường. Điều này đạt được là do giải pháp đề xuất có khả năng định tuyến thích nghi tốt với trạng thái hiện thời của mạng và nhờ vậy, tránh được xung đột, cũng như chiến lược lựa chọn và gán phổ tần thông minh làm giảm thiểu sự phân mảnh phổ để tạo điều kiện cho việc đăng ký tài nguyên cho các yêu cầu kết nối đến sau.



Hình 4. Xác suất chặn kết nối trong các cấu hình mạng khác nhau

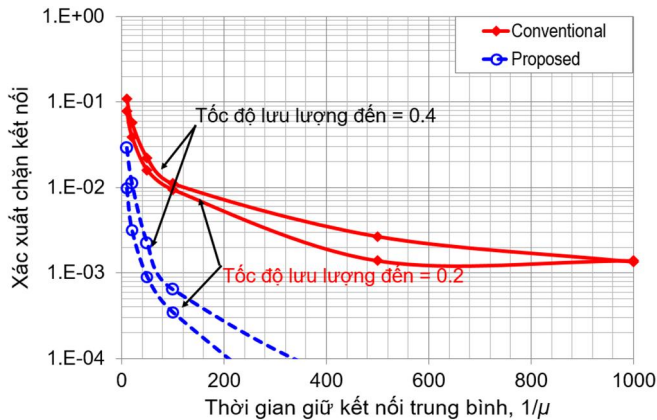
Hình 5 so sánh tỉ lệ lưu lượng được chấp nhận tương đối trong các cấu hình mạng thử nghiệm khi xác suất chặn kết nối giả định là 10^{-3} . Các kết quả đạt được sử dụng phương pháp đề xuất được tính tỉ lệ với các kết quả tương ứng thu được khi sử dụng phương pháp truyền thống và hiển thị trên đồ thị. Dựa vào đó, ta có thể thấy phương pháp đề xuất có khả năng chấp nhận lưu lượng nhiều hơn nhiều (hơn tối thiểu 25%) so với phương pháp so sánh. Hiệu quả của giải pháp cũng tăng lên rõ rệt khi kích thước mạng tăng lên.



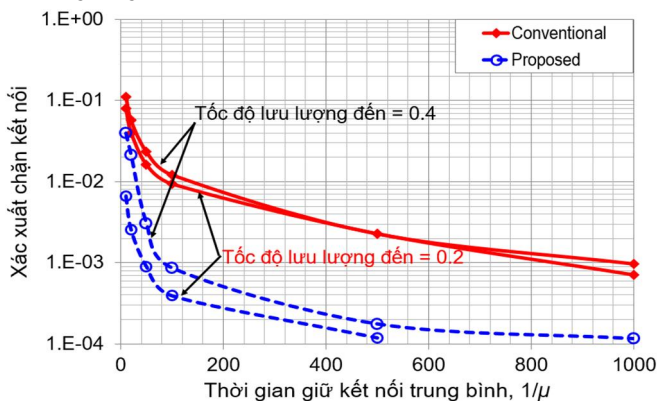
Hình 5. So sánh tỉ lệ lưu lượng được chấp nhận

Để làm rõ hơn hiệu quả của giải pháp đề xuất so với giải pháp truyền thống, chúng tôi khảo sát sự phụ thuộc của hiệu năng mạng vào một trong các tham số đặc tính quan trọng của mạng, đó là thời gian giữ kết nối trung bình. Kết

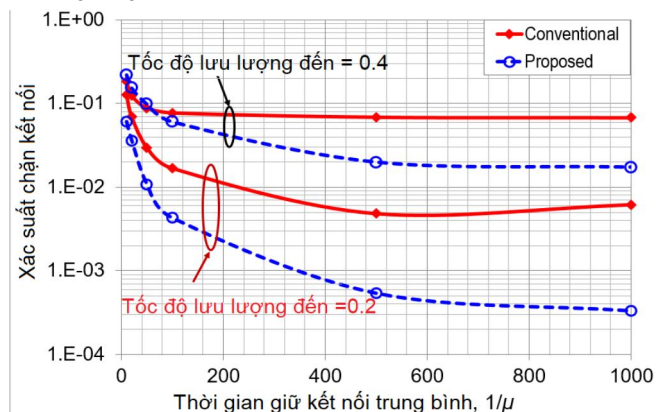
quả mô phỏng số thu được (như thể hiện trên hình 6, 7 và 8) cho thấy hiệu quả của giải pháp đề xuất tăng lên rõ rệt khi thời gian giữ kết nối trung bình càng lớn. Sở dĩ như vậy là do với cùng một tốc độ xuất hiện của yêu cầu kết nối thì thời gian giữ kết nối trung bình càng lớn (tức là lưu lượng mạng càng lớn), thì mức độ khan hiếm phổ tần càng cao, dẫn đến ảnh hưởng của sự phân mảnh phổ tần đối với hiệu năng mạng càng trầm trọng. Nhờ có khả năng giảm thiểu được sự phân mảnh phổ tần, phương pháp đề xuất của chúng tôi có khả năng thích nghi tốt ngay cả đối với điều kiện lưu lượng mạng lớn.



Hình 6. Sự phụ thuộc của xác suất chặn kết nối vào thời gian giữ kết nối trung bình trong mạng hình lưới 4x4



Hình 7. Sự phụ thuộc của xác suất chặn kết nối vào thời gian giữ kết nối trung bình trong mạng NSF



Hình 8. Sự phụ thuộc của xác suất chặn kết nối vào thời gian giữ kết nối trung bình trong mạng USNET

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một giải pháp định tuyến và gán phổ tần động hiệu quả trong đó kết hợp với việc định tuyến thích nghi và xem xét đến kỹ thuật gán phổ tần có khả năng tránh phân mảnh nhằm cho phép cung cấp động và linh hoạt các kết nối quang trong mạng quang lưới bước sóng linh hoạt định nghĩa bằng phần mềm đa miền điều khiển phân tán. Việc định tuyến được thực hiện thông qua cơ chế quảng bá yêu cầu và lựa chọn tuyến đường khả dụng gần nhất, trong khi phổ tần và phương thức điều chế được lựa chọn bằng việc kết hợp xem xét với kỹ thuật giảm thiểu phân mảnh. Ưu điểm của kỹ thuật này là các hệ thống điều khiển SDN của một vùng mạng không cần phải biết trước thông tin định tuyến và tuyến đường tìm được có khả năng thích nghi cao với những thay đổi trong các vùng mạng do việc trao đổi thông tin định tuyến được thực hiện theo cơ chế phân tán. Các kết quả mô phỏng số đạt được cho thấy rằng giải pháp định tuyến và gán phổ tần động được đề xuất có khả năng là giảm đáng kể tỉ lệ chặn kết nối so với phương pháp thông thường là sử dụng kỹ thuật đường đi ngắn nhất trong kiến trúc (GMPLS/PCE).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Cisco Systems, 2014. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology*, 2014–2019. Accessed in March 2017. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.pdf
- [2]. K. Sato, H. Hasegawa, 2009. *Optical Networking Technologies That Will Create Future Bandwidth-Abundant Networks*. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 1, no. 2, pp.A81-A93.
- [3]. A. Jukan and J. Mambretti, 2012. *Evolution of Optical Networking Toward Rich Digital Media Services*. Proceedings of the IEEE, vol. 100, no. 4, pp. 855-871.
- [4]. B. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, 2015. *Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. PP, no. 99, pp. 1.
- [5]. G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea and B. Mukherjee, 2013. *A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 1, pp. 65-87.
- [6]. M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, 2009. *Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies*. IEEE Communications Magazine, vol. 47, pp. 66-73.
- [7]. O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, 2012.
- [8]. D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, 2015. *Software-defined networking: A comprehensive survey*. Proceedings of the IEEE, 103(1), pp.14-76.
- [9]. Y. Jarraya, T. Madi, and M. Debbabi, 2014. *A survey and a layered taxonomy of software-defined networking*. IEEE Commun. Surv. Tut., vol. 16, no. 4, pp. 1955–1980, Fourth Quart.

- [10]. L. Liu et al., 2013. *Design and performance evaluation of an Openflow-based control plane for software-defined elastic optical networks with direct-detection optical OFDM (DDO-OFDM) transmission*. Optics Express, vol. 22, pp. 30-40.
- [11]. R. Casellas et al., 2014. *SDN based Provisioning Orchestration of OpenFlow/GMPLS Flexi-grid Networks with a Stateful Hierarchical PCE*. Proceedings of OFC/NFOEC.
- [12]. L. Liu et al., 2013. *Software-Defined Fragmentation-Aware Elastic Optical Networks Enabled by OpenFlow*. Proceedings of ECOC.
- [13]. Y. Yoshida et al., 2014. *First international SDN-based Network Orchestration of Variable-capacity OPS over Programmable Flexi-grid EON*. Proceedings of OFC/NFOEC.
- [14]. M. Chamania et al., 2009. *A Survey of Inter-Domain Peering and Provisioning Solutions for Next Generation Optical Networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, pp. 33-51.
- [15]. C. Chen et al., 2014. *Demonstration of OpenFlow-Controlled Cooperative Resource Allocation in a Multi-Domain SD-EON Testbed across Multiple Nations*. Proceedings of ECOC.
- [16]. H.-C. Le, N. T. Dang, and S. Vu-Van, 2015. *Dynamic multi-domain elastic optical networks with 4R regeneration capable border nodes*. 2nd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science (NICS), pp.169-173.
- [17]. Z. Zuqing, L. Wei, Z. Liang, and N. Ansari, 2013. *Dynamic Service Provisioning in Elastic Optical Networks With Hybrid Single-/Multi-Path Routing*. Journal of Lightwave Technology, vol. 31, pp. 15-22.
- [18]. H. Chau Le, Ngoc T. Dang and Nhan D. Nguyen, 2016. *Dynamic RMSA Algorithm for Multi-domain EONs with Limited Virtualized Elastic Regenerators*. IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), pp. 46-51.
- [19]. A. Giorgetti et al., 2011. *Hierarchical PCE in GMPLS-based Multi-domain Wavelength Switched Optical Networks*. Proceedings of OFC/NFOEC.
- [20]. ITU-T, 2012. *ITU-T Recommendations G.694.1: Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical systems*, 02/2012.