

# **ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MẠNG CHUYỂN MẠCH BURST QUANG BẰNG MÔ HÌNH GIẢI TÍCH TOÁN HỌC SỬ DỤNG NGUYÊN LÝ HÀNG ĐỢI $M/M/w/w$ VÀ MÔ PHỎNG TRÊN OMNeT++**

LÊ HỮU BÌNH<sup>1</sup>, LÊ NGUYỄN BÌNH<sup>2</sup>, HOÀNG VĂN VÕ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Khoa Công nghệ thông tin, Trường Cao đẳng Công nghiệp Huế*

<sup>2</sup>*Huawei Technologies, European Research Center, Riesstr. 25, C3.0G, D-80992, Munich, Deutschland*

<sup>3</sup>*Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông Việt Nam*

**Tóm tắt.** Chuyển mạch burst quang là xu hướng của công nghệ mạng quang thế hệ mới. Việc nghiên cứu các mô hình đánh giá hiệu quả thực thi của mạng chuyển mạch burst quang là điều cần thiết và có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Bài báo tập trung nghiên cứu các mô hình đánh giá hiệu quả thực thi của mạng chuyển mạch burst quang, đặc biệt là xác suất nghẽn burst trong mạng. Chúng tôi đề xuất một mô hình mô phỏng mạng chuyển mạch burst quang có tên OBSWDM-Simu được triển khai trên OMNeT++. Mô hình OBSWDM-Simu cho phép mô phỏng các giao thức điều khiển trong mạng chuyển mạch burst quang tốc độ cao có xét đến ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý. Các mô hình phân tích mạng chuyển mạch burst quang dựa trên lý thuyết hàng đợi cũng được đưa ra và so sánh với kết quả mô phỏng thực hiện bởi mô hình OBSWDM-Simu.

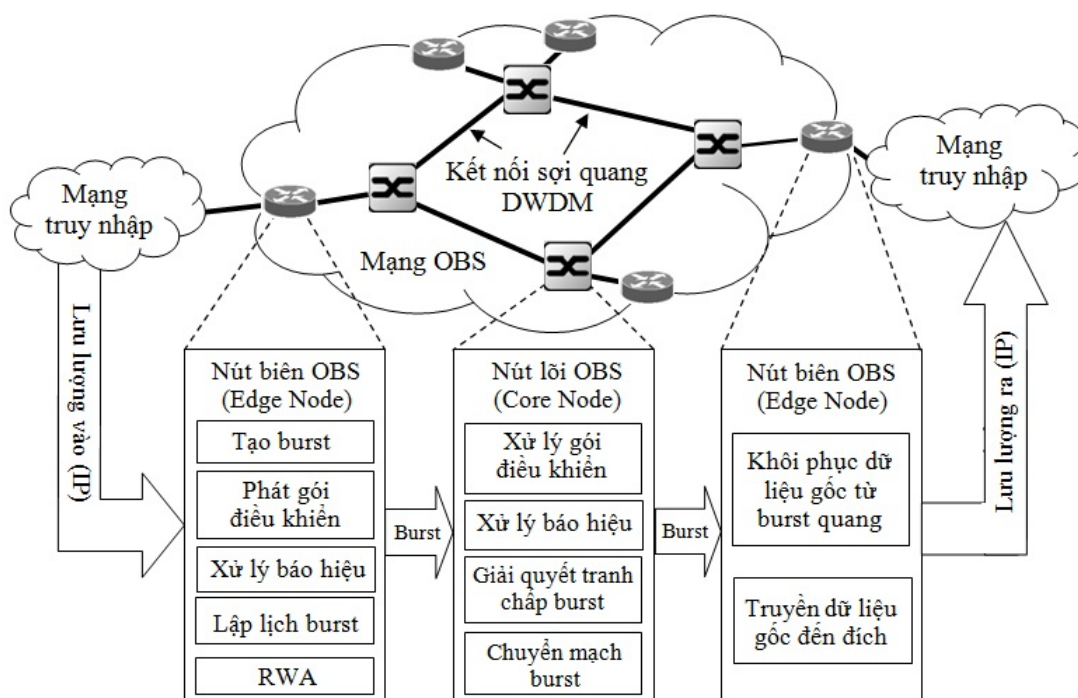
**Từ khóa.** Chuyển mạch burst quang, Mô phỏng mạng, OBSWDM-Simu.

**Abstract.** Optical Burst Switching (OBS) has become one of the most important techniques for next generations of ultra-high speed optical internetworking. Performance evaluation of OBS networking models is thus very critical in the evaluation of the effectiveness of different routing and switching algorithms. This paper presents both computer simulation and analytical models for evaluating the effectiveness of OBS networking, especially the burst blocking probability. We develop a simulation model for OBS networking, namely OBSWDM-Simu based on OMNeT++ platform. The model is capable of simulating control protocols of OBS networks and simultaneously incorporating the impacts of physical layer effects on the blocking probability. We also present the analytical models for OBS networking based on the queuing theory in order to compare with the results of OBSWDM-Simu model.

**Key words.** Optical burst switching, network simulation, OBSWDM-simu.

## **1. GIỚI THIỆU**

Công nghệ truyền dẫn quang ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao (DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing) đã và đang phát triển với tốc độ nhanh chóng. Đặc biệt, với các kỹ thuật điều chế và xử lý tín hiệu quang tiên tiến như QPSK (Quadrature



Hình 1.1. Nguyên lý hoạt động của mạng chuyển mạch burst quang

Phase-Shift Keying), PDM-QPSK (Polarization Division Multiplexing - QPSK) cho phép nâng tốc độ truyền tải của mỗi kênh bước sóng lên đến 112 Gbit/s hoặc 448 Gbit/s qua khoảng cách truyền tải lớn [1, 2, 3, 4]. Để khai thác một cách hiệu quả khoảng băng thông cực lớn trên các tuyến truyền dẫn DWDM thế hệ mới, kỹ thuật chuyển mạch burst quang (OBS - Optical Burst Switching) [5] đang được nghiên cứu rộng rãi trên thế giới nhằm tìm ra các giao thức điều khiển tối ưu cho việc truyền lưu lượng IP qua mạng quang DWDM.

Nguyên lý hoạt động của mạng OBS được minh họa như ở Hình 1.1. Lưu lượng từ các mạng truy nhập được truyền đến nút biên đầu vào của mạng OBS. Tại đây, nút biên đầu vào thực hiện chức năng tập hợp lưu lượng thành các burst quang. Tương ứng với mỗi burst quang, một gói điều khiển sẽ được tạo ra và gửi đi trước để xử lý báo hiệu cho việc truyền burst. Dựa trên thông tin xử lý báo hiệu, nút biên còn thực hiện chức năng lập lịch burst, định tuyến và gán bước sóng để truyền burst qua mạng. Chức năng chính của nút lõi là xử lý gói điều khiển để cấu hình chuyển mạch cho việc truyền burst. Nếu xảy ra tranh chấp, nút lõi thực hiện chức năng giải quyết tranh chấp bằng các phương pháp như định tuyến chuyển hướng, chuyển đổi bước sóng, đệm quang và phân đoạn burst [5] nhằm hạn chế tỷ lệ tổn thất burst. Sau khi burst được truyền thành công qua mạng lõi, nút biên đầu ra thực hiện chức năng khôi phục dữ liệu gốc từ các burst và truyền đến đích.

Trong tiến trình phát triển của công nghệ mạng quang, để khai thác một cách hiệu quả khoảng băng thông cực lớn của các tuyến truyền dẫn quang thế hệ mới sử dụng siêu kênh bước sóng (superchannels) [6, 7], OBS là một xu hướng tất yếu mà chúng ta phải hướng tới. Nó phù hợp với việc tích hợp đa dịch vụ, đa loại hình lưu lượng vào mạng truyền tải quang. Hiện nay, có nhiều nhóm nghiên cứu trên thế giới đang tập trung nghiên cứu để tìm ra các chuẩn giao thức nhằm sớm đưa OBS vào triển khai trong thực tế. Các hướng nghiên cứu

chủ yếu tập trung vào các giao thức điều khiển trong mạng như: các giao thức báo hiệu, các phương pháp giải quyết tranh chấp, các thuật toán định tuyến burst [10, 13, 16]. Hầu hết các kết quả nghiên cứu đều được đánh giá bằng phương pháp mô phỏng hoặc mô hình giải tích toán học, vì việc đánh giá bằng thực nghiệm là chưa thể thực hiện được. Về mô phỏng, đã có một số mô hình được triển khai cho OBS [8, 10, 11]. Tuy nhiên, các mô hình này chưa đề cập đến mạng quang tốc độ cao có ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý. Với công nghệ hiện tại, tốc độ của mỗi kênh bước sóng đã đạt đến 448Gbit/s và có thể lên đến hàng Terabits/s trong tương lai gần, ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý là điều cần phải được xem xét. Vì vậy, việc triển khai mô hình mô phỏng mạng OBS tốc độ cao có xét đến ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý là điều cần thiết. Với ý tưởng này, chúng tôi đã triển khai một mô hình mô phỏng OBSWDM-Simu trên OMNeT++ [9], đồng thời cũng nghiên cứu các mô hình giải tích toán học dùng lý thuyết hàng đợi để phân tích mạng OBS, so sánh kết quả mô phỏng và mô hình toán học để kiểm nghiệm tính đúng đắn của kết quả nghiên cứu.

Các phần tiếp theo của bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày các phương pháp phân tích mạng OBS, sẽ tập trung vào hai phương pháp chính là mô phỏng và mô hình giải tích toán học. Với phương pháp mô phỏng, đề xuất một mô hình mô phỏng được triển khai trên OMNeT++ có tên là OBSWDM-Simu được trình bày chi tiết trong Mục 3. Mục 4 trình bày các mô hình giải tích toán học sử dụng lý thuyết hàng đợi để phân tích mạng OBS. Và cuối cùng là kết luận và hướng phát triển của mô hình.

## 2. CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH MẠNG OBS

### 2.1. Phân tích mạng OBS bằng mô phỏng

Trong thời gian gần đây, đã có một số mô hình mô phỏng mạng OBS được triển khai dựa trên các phần mềm mô phỏng phổ biến như OPNET, OMNeT++, NS-2. Một mô hình mô phỏng mạng OBS triển khai trên NS-2 đã được rất nhiều người sử dụng là OBS-ns [8]. Mô hình này được triển khai bởi nhóm nghiên cứu của Trường Đại học Công nghệ thông tin và Truyền thông Hàn Quốc. OBS-ns sử dụng giao thức báo hiệu JET, thuật toán lập lịch burst là LAUC-VF (Latest Available Unscheduled Channel with Void Filling), định tuyến burst bằng thuật toán đường đi ngắn nhất. OBS-ns có thể sử dụng để mô phỏng sự thực thi lưu lượng trong mạng OBS, đánh giá hiệu quả của các thuật toán lập lịch, các phương pháp giải quyết tranh chấp bằng định tuyến chuyển hướng, đệm quang hoặc chuyển đổi bước sóng.

OMNeT++ [9] đã và đang được nhiều nhóm nghiên cứu sử dụng để triển khai các mô hình mô phỏng mạng viễn thông. Đây là một phần mềm có nhiều ưu điểm trong việc mô phỏng mạng, cung cấp các công cụ cho phép xây dựng tập ô mạng và cấu trúc nút một cách dễ dàng và linh hoạt, sử dụng ngôn ngữ C++ trong các file điều khiển module. Với những tiện ích này, OMNeT++ đang được sử dụng phổ biến trong các trường đại học nổi tiếng trên thế giới. Một mô hình mô phỏng các thuật toán định tuyến burst đã được triển khai trên OMNeT++ bởi nhóm tác giả Alvaro L. Barradas và các cộng sự [10]. Mục tiêu của mô hình này là đánh giá sự thực thi lưu lượng qua mạng OBS dựa trên các cơ chế định tuyến burst khác nhau. Năm 2010, nhóm nghiên cứu về hệ thống mạng và dịch vụ bưu chính viễn thông (GRSST - Group of Networks, Systems and Telematics Services) đã triển khai mô hình OBSModules-simutools2010 [11] trên OMNeT++. Đây là một mô hình tương đối hoàn thiện, cho phép mô phỏng cấu trúc nút biên, nút lõi và các liên kết trong mạng OBS.

Các mô hình được đề cập ở trên chủ yếu tập trung mô phỏng các giao thức điều khiển ở lớp mạng như: giao thức tập hợp burst tại nút biên, lập lịch burst, định tuyến burst, giải quyết tranh chấp burst. Các mô hình này không quan tâm đến công nghệ lớp vật lý và ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý như tán sắc, phi tuyến, nhiễu tín hiệu, ... đến việc thực thi lưu lượng. Điều này chỉ cho phép trong trường hợp tốc độ dữ liệu của mỗi kênh bước sóng thấp và khoảng cách truyền tải ngắn. Trong trường hợp tốc độ dữ liệu của mỗi kênh bước sóng là 40Gbit/s hoặc 100Gbit/s, khoảng cách truyền tải lớn thì ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý đến chất lượng tín hiệu quang là rất nghiêm trọng [12, 13]. Việc thực thi giao thức ở lớp mạng cần phải xem xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng lớp vật lý. Với ý tưởng đó, đã triển khai mô hình mô phỏng OBSWDM-Simu trên OMNeT++ để thực hiện điều này. Chi tiết về mô hình OBSWDM-Simu sẽ được trình bày ở phần sau.

## 2.2. Phân tích mạng OBS bằng mô hình giải tích toán học

Đặc trưng cơ bản của mạng OBS là dữ liệu được truyền qua các tuyến truyền dẫn quang DWDM dưới dạng các burst. Việc phát sinh lưu lượng trong mạng là hoàn toàn ngẫu nhiên nên burst cũng được tạo ra hoàn toàn ngẫu nhiên. Tại các nút trung gian, quy trình xử lý để chuyển tiếp burst cũng phải được thực hiện tương tự như mạng chuyển mạch gói. Vì vậy, ta hoàn toàn có thể vận dụng lý thuyết lưu lượng kết hợp với lý thuyết hàng đợi và lý thuyết xác suất thống kê để phân tích mạng OBS. Venkatesh và Murthy đã trình bày một cách đầy đủ các mô hình phân tích mạng OBS bằng các mô hình giải tích toán học [14]. Các tác giả đã đưa ra các mô hình toán học để phân tích đặc trưng lưu lượng trong mạng OBS, tính xác suất nghẽn burst, các mô hình giải quyết tranh chấp bằng phương pháp phân mảnh burst, chuyển đổi bước sóng, định tuyến chuyển hướng và sử dụng đường trễ quang.

Trong [15], Rosberg và cộng sự đã sử dụng lý thuyết hàng đợi và phương pháp ước lượng gần đúng điểm cố định lưu lượng (Load Fixed Point Approximations) để xây dựng mô hình tính xác suất nghẽn burst trong mạng OBS. Phương pháp này cũng được sử dụng trong [16] để đề xuất mô hình phân tích cơ chế giải quyết tranh chấp burst sử dụng kết hợp định tuyến chuyển hướng và truyền lại burst. Bài báo đề xuất một mô hình giải tích toán học để tính toán xác suất nghẽn burst trong mạng OBS, so sánh với kết quả mô phỏng của mô hình OBSWDM-Simu để kiểm nghiệm tính đúng đắn của kết quả nghiên cứu.

## 3. MÔ HÌNH OBSWDM-SIMU

Để nghiên cứu, đánh giá hiệu quả thực thi của các giao thức trong mạng OBS tốc độ cao, ta triển khai mô hình mô phỏng OBSWDM-Simu trên OMNeT++. Điểm khác biệt của mô hình OBSWDM-Simu so với các mô hình khác là đã đưa ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý như tán sắc tuyến tính, các hiệu ứng phi tuyến, nhiễu tín hiệu vào các giao thức điều khiển ở lớp mạng. Từ đó, ta có thể nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của các hiệu ứng này đến việc thực thi lưu lượng qua mạng OBS tốc độ cao.

### 3.1. Cấu trúc mô hình OBSWDM-Simu

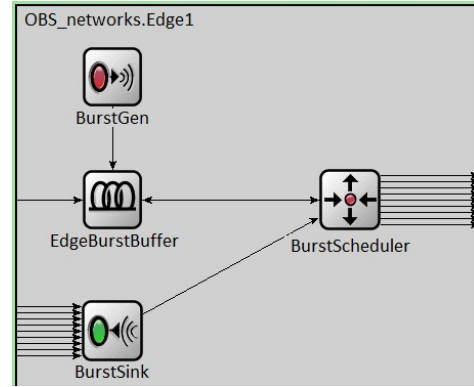
Có hai loại nút trong mạng OBS là nút biên và nút lõi. Cấu trúc của nút biên trong mô hình OBSWDM-Simu được thiết kế như Hình 3.1, các khối chức năng được mô tả như sau:

- Khối **BurstGen**: Tạo Burst dữ liệu, Burst được phát ngẫu nhiên theo quy trình phân phối Poisson, địa chỉ nút nguồn và đích được phân bố đều giữa tất cả các nút trong mạng. Cấu trúc chi tiết của Burst được mô tả trong file burst.msg. Sau khi tạo ra, burst được gửi đến khối **EdgeBurstBuffer** để tiếp tục xử lý.

- Khối **EdgeBurstBuffer**: Đệm burst tại lớp biên, phát gói điều khiển gửi đến khối **BurstScheduler** để xử lý báo hiệu cho burst.

- Khối **BurstScheduler**: Lập lịch, định tuyến và gán bước sóng cho burst, xử lý báo hiệu tại lớp biên. Giao thức báo hiệu được sử dụng trong mô hình này là TAW [5].

- Khối **BurstSink**: Nhận burst và xử lý các số liệu thống kê.



Hình 3.1. Cấu trúc nút biên trong mô hình OBSWDM-Simu

Cấu trúc nút lõi được thiết kế như ở Hình 3.2. Ta triển khai mô hình OBSWDM-Simu với mục tiêu mô phỏng mạng chuyển mạch burst quang tốc độ cao, nên nút lõi OBS được mô hình bằng một ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer), với chức năng chuyển mạch burst được thực hiện bởi bộ WSS (Wavelength Selective Switching). Với cấu trúc này, burst dữ liệu từ một bước sóng vào nào đó đều có thể chuyển mạch đến một bước sóng bất kỳ trên các cổng ra. Điều này phù hợp với cấu trúc của các nút chuyển mạch trong mạng quang thế hệ mới. Các khối chức năng được mô tả như sau:

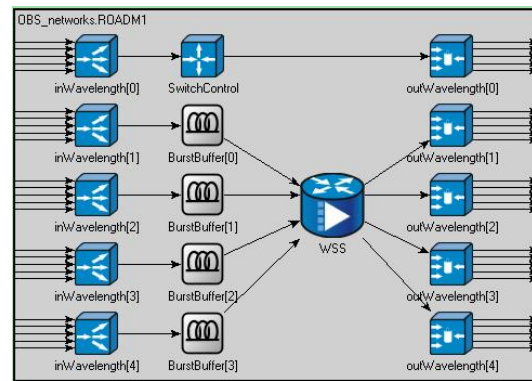
- Khối **inWavelength[ $\lambda$ ]** ( $\lambda = 0, 1, 2, \dots, w$ ): Nhận tín hiệu được truyền đến trên bước sóng  $\lambda$ . Nếu là gói điều khiển thì chuyển đến khối **SwitchControl** để xử lý báo hiệu cho việc truyền burst, nếu là burst dữ liệu thì chuyển đến khối **BurstBuffer**.

- Khối **outWavelength[ $\lambda$ ]** ( $\lambda = 0, 1, 2, \dots, w$ ): Thực hiện chức năng truyền tín hiệu trên bước sóng  $\lambda$  đến cổng ra của nút tiếp theo.

- Khối **SwitchControl**: Thực thi các thuật toán lập lịch, giải quyết tranh chấp, định tuyến và chọn bước sóng cho burst.

- Khối **WSS**: Chuyển mạch burst từ một bước sóng vào đến một bước sóng bất kỳ của cổng ra. Cơ chế chuyển mạch được điều khiển bởi khối **SwitchControl**.

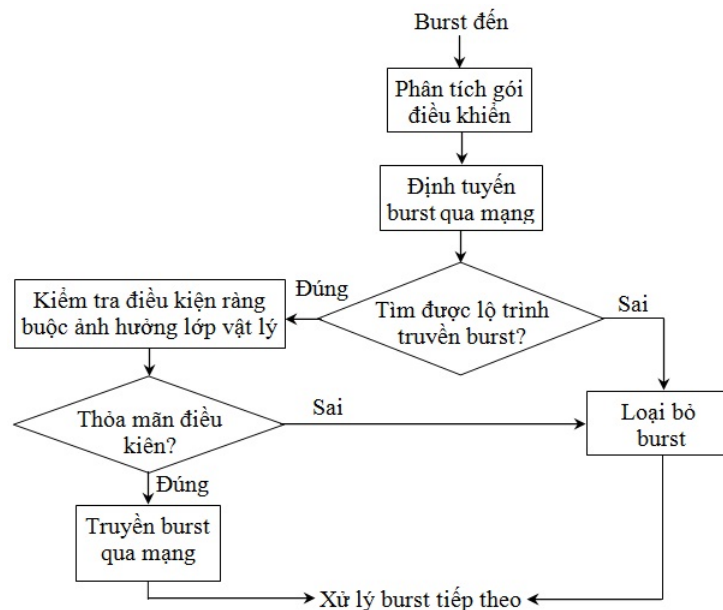
- Khối **BurstBuffer**: Thực hiện chức năng như một bộ đệm quang để đệm burst tại nút lõi. Thiết kế bộ đệm bằng các đường trễ quang (FDL - Fiber Delay Line). Chiều dài bộ đệm chính là số FDL được cài đặt trong khối BurstBuffer.



Hình 3.2. Cấu trúc nút lõi trong mô hình OBSWDM-Simu

### 3.2. Mô hình ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý trong OBSWDM-Simu

Trong mạng quang DWDM tốc độ cao, khoảng cách truyền tải lớn thì ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý như tán sắc, phi tuyến, nhiễu tín hiệu, ... đến chất lượng tín hiệu quang là rất nghiêm trọng. Vì vậy, việc thực thi các giao thức điều khiển ở lớp mạng cần phải xét đến ảnh hưởng của các hiệu ứng này, đây chính là mục tiêu của mô hình OBSWDM-Simu. Ở đây, ta đã đưa được ảnh hưởng của tán sắc đơn sắc (CD - Chromatic dispersion), tán sắc mode phân cực (PMD - Polarization Mode Dispersion), các hiệu ứng phi tuyến vào mô hình OBSWDM-Simu. Ảnh hưởng của các hiệu ứng này đến việc truyền burst trong mô hình OBSWDM-Simu được thực thi theo lưu đồ thuật toán ở Hình 3.3.



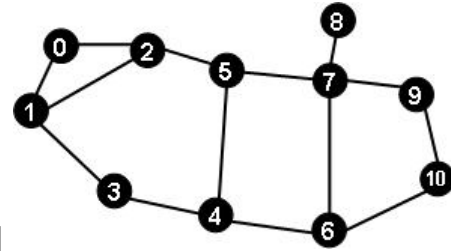
Hình 3.3. Lưu đồ thuật toán phân tích ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý

Ta thấy rằng, điểm khác biệt của mô hình OBSWDM-Simu so với các mô hình khác là sau khi thực thi thuật toán định tuyến burst, lộ trình tìm được phải thỏa mãn điều kiện về ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý thì burst mới được chấp nhận truyền đi. Mặc dù OBSWDM-Simu thực thi nhiều hơn các mô hình khác một bước là kiểm tra điều kiện ràng buộc vật lý, nhưng điều này không làm tăng thêm độ phức tạp tính toán của thuật toán. Vì bước này chỉ thực thi các phép toán so sánh các tham số của lộ trình tìm được với các tham số vật lý của sợi quang, nên có độ phức tạp tính toán theo hàm đa thức. Trong hầu hết các mô hình mô phỏng OBS đã đề cập trong bài báo này, thuật toán “*đường đi ngắn nhất*” được sử dụng để định tuyến burst. Trong mô hình OBSWDM-Simu, cũng sử dụng thuật toán “*đường đi ngắn nhất*”, cụ thể là thuật toán Dijkstra để định tuyến burst. Vì vậy, độ phức tạp tính toán của giải thuật là  $O(n^2)$ , với  $n$  là tổng số node trong mạng. Các thuật toán khác như lập lịch burst, giải quyết tranh chấp burst cũng có độ phức tạp tính toán theo hàm đa thức nên hoàn toàn có thể thực thi được.

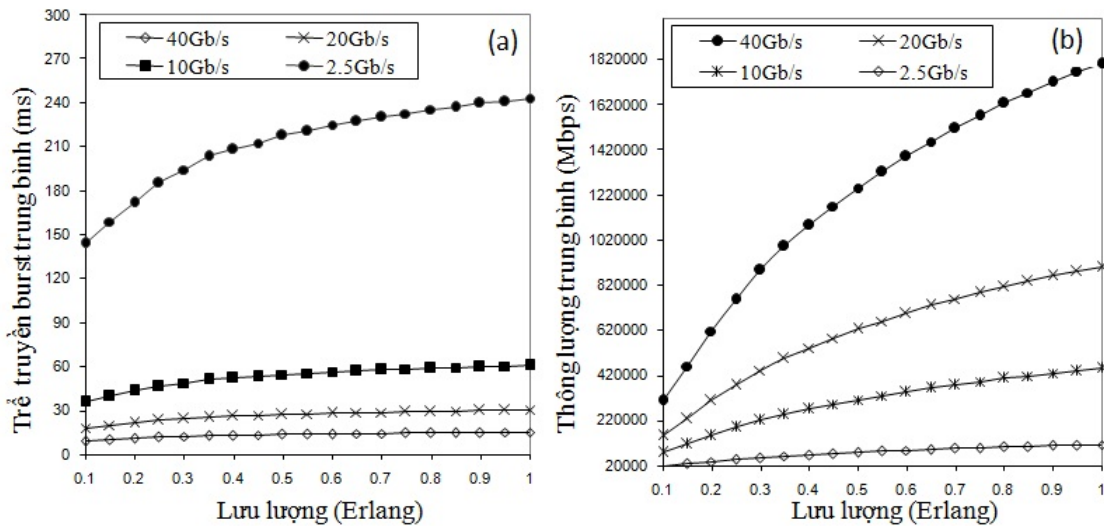
### 3.3. Một số kết quả mô phỏng

Thực thi mô hình OBSWDM-Simu trên một số topology cơ bản thường sử dụng trong mạng đường trục như topology mắt lưới, topology Ring. Một số kết quả mô phỏng trên topology mắt lưới gồm 11 nút và 14 kết nối sợi quang song hướng như ở Hình 3.4. Topology này được chọn để mô phỏng trong bài báo vì đây là topology mạng tính tổng quát nhất, là topology mắt lưới nhưng có thể xem là tổ hợp của các topology Ring. Dạng topology này thường được sử dụng trong các mạng đường trục cũng như trong thí nghiệm, nghiên cứu. Các giả thiết mô phỏng được thiết lập như sau:

- Burst dữ liệu được phát sinh ngẫu nhiên trên mạng theo quy trình phân phối xác suất Poisson, thời gian phục vụ mỗi burst tuân theo quy trình hàm mũ.
- Mỗi sợi quang có 16 kênh bước sóng với tốc độ của mỗi kênh từ 2.5Gbit/s đến 40Gbit/s.
- Giao thức báo hiệu được sử dụng là TAW, kích thước burst trung bình là 4 Mbytes.



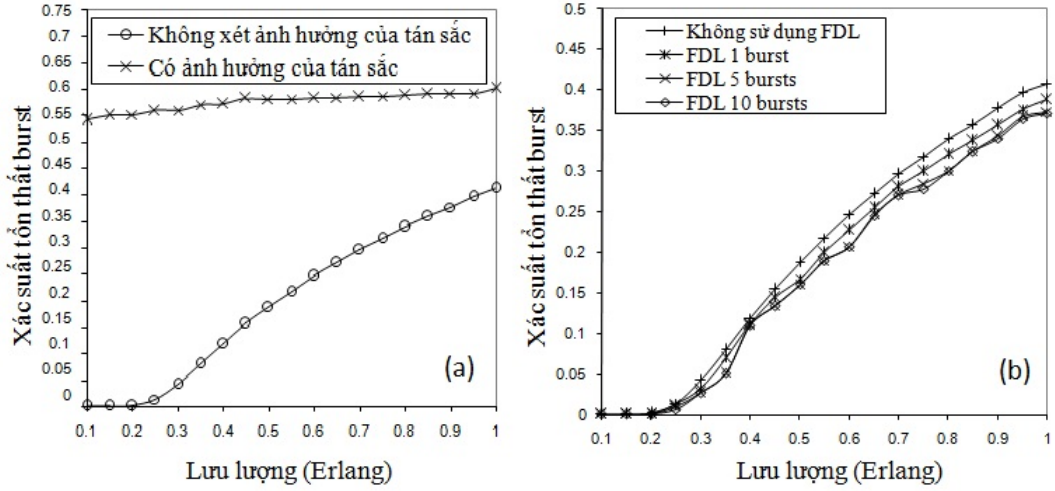
Hình 3.4. Một topology mạng OBS



Hình 3.5. Trễ burst (a) và thông lượng (b) khi tốc độ của mỗi kênh bước sóng thay đổi

Hình 3.5 là kết quả mô phỏng về thông lượng và thời gian trễ burst trên toàn mạng. Ta thấy rằng, khi tốc độ bit cao thì trễ truyền tải trung bình thấp và ở trạng thái ổn định. Với tốc độ 40Gbit/s, trễ trung bình khoảng 10ms, với tốc độ 20Gbit/s thì giá trị này khoảng 28ms. Với thông lượng trung bình trên mạng thì ngược lại. Khi tốc độ bit tăng thì thông lượng trung bình trên toàn mạng tăng.

Kết quả mô phỏng trên Hình 3.6 là xác suất tổn thất burst trong các trường hợp khác nhau. Hình 3.6a là kết quả so sánh khi có và không xét đến ảnh hưởng của tán sắc. Ta thấy rằng, ảnh hưởng của tán sắc đến xác suất nghẽn burst là rất nghiêm trọng. Nguyên nhân là do với mạng OBS, burst dữ liệu có thể truyền qua khoảng cách lớn và qua nhiều nút trung



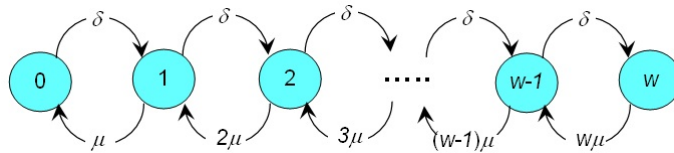
Hình 3.6. Xác suất tổn thất burst khi tốc độ của mỗi kênh bước sóng 20Gbit/s

gian, điều này sẽ chịu ảnh hưởng lớn của tán sắc khi tốc độ bit cao. Trên Hình 3.6b phân tích hiệu quả khi sử dụng FDL làm chức năng đệm burst tại nút lõi. Ta thấy rằng, nếu có sử dụng FDL thì xác suất tổn thất burst sẽ được cải thiện. Tuy nhiên, điều này sẽ làm tăng trễ truyền tải burst. Vì vậy kích thước DFL cũng chỉ nên sử dụng vừa phải.

#### 4. PHÂN TÍCH MẠNG OBS BẰNG MÔ HÌNH GIẢI TÍCH TOÁN HỌC

##### 4.1. Phân tích một cổng ra của nút mạng OBS

Xét một cổng ra của nút lõi mạng OBS. Như đã phân tích ở Mục 3.1, nút lõi của mạng OBS được mô hình bởi một thiết bị ROADM với chức năng chuyển mạch burst thực hiện bởi bộ WSS. Giả sử mỗi sợi quang sử dụng  $w$  kênh bước sóng dữ liệu. Khi burst đến, WSS có khả năng chuyển mạch burst đến một bước sóng ra bất kỳ. Vì burst đến tuân theo quy trình Poisson nên một cổng ra của ROADM có thể mô hình bằng hệ thống hàng đợi  $M/M/w/w$ .



Hình 4.1. Lược đồ chuyển trạng thái của một cổng ra ROADM theo hàng đợi  $M/M/w/w$

Giả sử thời gian đến của burst theo phân phối hàm mũ với tốc độ trung bình là  $\delta$ . Thời gian phục vụ mỗi burst cũng theo phân phối hàm mũ với tốc độ trung bình là  $\mu$ . Từ đó ta có lược đồ chuyển đổi trạng thái của hệ thống được minh họa như ở Hình 4.1. Gọi  $P_n$  là xác suất hàng đợi ở trạng thái  $n$ , nghĩa là xác suất có  $n$  burst trong ROADM muốn chuyển mạch đến cổng ra đang xét. Ta có phương trình cân bằng trạng thái sau đây:

$$\delta P_{n-1} = n\mu P_n \iff P_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{\delta}{\mu} P_{n-1} \iff P_{n-1} = \frac{1}{n!} \left( \frac{\delta}{\mu} \right)^n P_0. \quad (4.1)$$



Mặt khác, ta có:

$$\sum_{j=0}^w P_j = 1 \iff \sum_{j=0}^w \frac{1}{j!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^j P_0 = 1 \implies P_0 = \left(\sum_{j=0}^w \frac{1}{j!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^j\right)^{-1}. \quad (4.2)$$

Thay phương trình (4.2) vào (4.1) ta có:

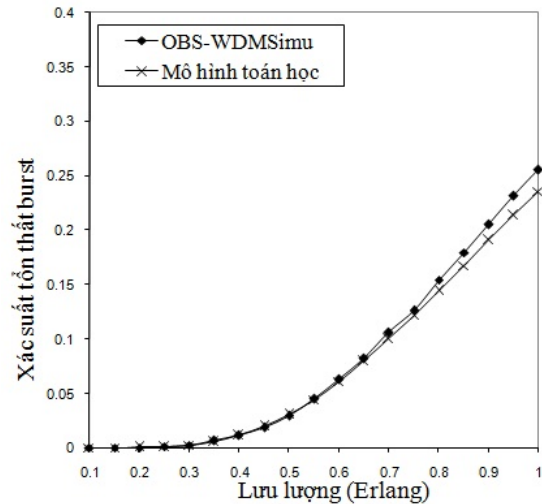
$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^n \left(\sum_{j=0}^w \frac{1}{j!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^j\right)^{-1}. \quad (4.3)$$

Burst đến sẽ bị từ chối phục vụ, nghĩa là bị tổn thất trong trường hợp burst đến khi hệ thống đang ở trạng thái  $P_w$ . Từ phương trình (4.3) ta có:

$$P_{BP} = P_w = \frac{1}{w!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^w \left(\sum_{j=0}^w \frac{1}{j!} \left(\frac{\delta}{\mu}\right)^j\right)^{-1}. \quad (4.4)$$

Phương trình (4.4) là phương trình tính xác suất tổn thất burst trên một cổng ra của nút mạng OBS khi biết mật độ lưu lượng trên mạng và tổng số bước sóng trên mỗi sợi quang.

Ta tiến hành tính toán số học để so sánh với kết quả của mô hình mô phỏng OBSWDM-Simu. Các giả thiết của mô hình tương tự như mô phỏng ở Mục 3.2 với trường hợp tổng số kênh bước sóng dữ liệu là 16, tốc độ bit mỗi kênh là 20Gbit/s. Với mô hình OBSWDM-Simu, tiến hành mô phỏng để tính toán xác suất tổn thất burst trên một cổng ra của ROADM. Với mô hình toán học, ta tính toán xác suất tổn thất burst theo phương trình (4.4). Kết quả mô phỏng và tính toán như ở Hình 4.2. Ta thấy rằng, khi lưu lượng trung bình nhỏ hơn 0.75 Erlang thì kết quả mô phỏng và mô hình toán học gần như giống nhau. Khi lưu lượng lớn hơn 0.75 Erlang thì xác suất tổn thất burst của mô hình OBSWDM-Simu có cao hơn mô hình toán học, tuy nhiên sự chênh lệch là không đáng kể. Nguyên nhân là do khi mật độ lưu lượng cao thì số gói điều khiển burst tăng lên rất lớn. Điều này cũng làm ảnh hưởng đến hiệu quả thực thi lưu lượng qua mạng. Từ kết quả có thể kết luận rằng, việc mô phỏng trên một cổng ra của nút mạng OBS bằng mô hình OBSWDM-Simu có độ chính xác cao.



Hình 4.2. Xác suất tổn thất burst trên một cổng ra của nút lõi

#### 4.2. Mô hình toán học phân tích xác suất tổn thất burst trên toàn mạng OBS

Để tính xác suất nghẽn trong mạng OBS, một mô hình giải tích toán học dựa trên lý thuyết hàng đợi, lý thuyết xác suất thống kê và phương pháp EFP (Erlang Fixed Point) được đề xuất [14, 15, 16]. Mô hình được mô tả chi tiết như sau:

Xét một mạng OBS có  $N$  nút,  $F$  kết nối sợi quang song hướng, mỗi kết nối sợi quang sử dụng  $W$  kênh bước sóng dữ liệu.

- $R = r_{sd}|s, d = 1, 2, \dots, N$  là tập các lộ trình từ nút nguồn  $s$  đến nút đích  $d$  trong mạng.
- $B = B_{ij}|i, j = 1, 2, \dots, N$  là tập các giá trị xác suất tổn thất burst trên kết nối sợi quang từ nút  $i$  đến nút  $j$ .
- $Pr(f_{ij}, r_{sd}) = \{f_{mn}|\forall f_{mn} \in r_{sd}, f_{ij} \in r_{sd}\}$  với  $f_{mn}$  đứng trước  $f_{ij}$ .
- Burst phân phối đến lộ trình  $r_{sd}$  theo quy trình Poisson với tốc độ trung bình là  $d_{sd}$ . Thời gian truyền mỗi burst trên sợi quang  $f_{ij}$  là  $\mu_{ij}$ .

Với các giả thiết trên, lưu lượng phân phối đến một kết nối sợi quang từ nút  $i$  đến nút  $j$  được tính như sau:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\mu_{ij}} \cdot \sum_{\forall r_{sd} \in R|f_{ij} \in r_{sd}} \delta_{sd} \cdot \prod_{\forall f_{mn} \in Pr(f_{ij}, r_{sd})} (1 - B_{mn}). \quad (4.5)$$

Xác suất tổn thất burst trên một kết nối sợi quang từ  $i$  đến  $j$  chính là xác suất tổn thất burst trên một cổng ra của ROADM. Theo phương trình (4.4) ta có:

$$B_{ij} = P_{BP_{ij}} = \frac{\rho_{ij}^w}{w!} \left( \sum_{k=0}^w \frac{\rho_{ij}^k}{k!} \right)^{-1}. \quad (4.6)$$

Từ (4.5) và (4.6) ta có hệ phương trình mô tả mật độ lưu lượng và xác suất nghẽn burst trên tất cả các kết nối sợi quang trong mạng như sau:

$$\begin{cases} \rho_{ij} = \frac{1}{\mu_{ij}} \cdot \sum_{\forall r_{sd} \in R|f_{ij} \in r_{sd}} \delta_{sd} \cdot \prod_{\forall f_{mn} \in Pr(f_{ij}, r_{sd})} (1 - B_{mn}) \\ B_{ij} = P_{BP_{ij}} = \frac{\rho_{ij}^w}{w!} \left( \sum_{k=0}^w \frac{\rho_{ij}^k}{k!} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (4.7)$$

Bằng việc giải hệ phương trình (4.7), ta tìm được xác suất nghẽn burst trên tất cả các kết nối sợi quang. Từ đó, xác suất nghẽn burst trên một lộ trình  $r_{sd}$  được tính như sau:

$$B(r_{sd}) = 1 - \prod_{f_{ij} \in r_{sd}} (1 - B_{ij}). \quad (4.8)$$

Đặt  $\Delta = \sum_{r_{sd} \in R} \delta_{sd}$ , ta có xác suất nghẽn burst trên toàn mạng:

$$P_{Total} = \frac{1}{\Delta} \sum_{r_{sd} \in R} \delta_{sd} B(r_{sd}). \quad (4.9)$$

Ta thấy rằng, hệ phương trình (4.7) có nhiều ẩn số, các ẩn số là các vector mô tả mật độ lưu lượng trên các kết nối  $\rho = \{\rho_{ij}\}$ , và vector biểu thị xác suất nghẽn trên tất cả các kết nối sợi quang  $B = \{B_{ij}\}$  với  $i, j = 1, 2, \dots, N$ . Do vậy, việc giải hệ phương trình này để tìm vector  $\rho$  và  $B$  là rất khó khăn. Phương pháp gần đúng sử dụng lý thuyết điểm cố định Erlang (EFP – Erlang Fixed Point) thường được sử dụng để giải hệ phương trình này [14, 15, 16]. Cài đặt thuật toán tìm EFP theo các bước như sau:

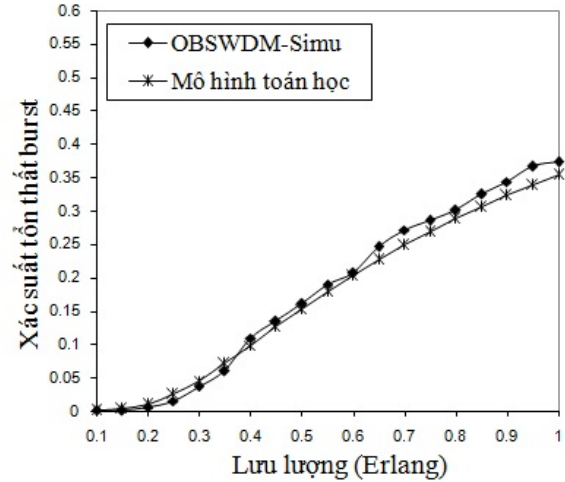
- **Bước 1:** Thiết lập một vector xác suất tồn thất burst  $B^0 = \{0\}$ , đây được xem là trạng thái ban đầu của hệ thống.

- **Bước 2:** Dựa trên vector  $B^0$ , tính vector  $\rho^1$  và vector  $B^1$  theo hệ phương trình (4.7)

- **Bước 3:** Lặp lại bước 2 cho đến khi  $B^n$  tiến đến  $B^{n-1}$ .

Vector  $B^m$  thu được tại trạng thái  $m$  nào đó được gọi là điểm cố định Erlang (EFP). Lý thuyết điểm cố định Brouwer [17] đã chứng minh rằng luôn luôn tồn tại một điểm cố định để  $B^n$  tiến đến  $B^{n-1}$ , nghĩa là thuật toán EFP như mô tả ở trên luôn có điểm dừng.

Ta tiến hành tính toán số học trên tô pô mắt lưới như Hình 5 để so sánh với kết quả mô phỏng của mô hình OBSWDM-Simu, phân tích trường hợp tổng số kênh bước sóng trên mỗi sợi quang là 16, tốc độ dữ liệu của mỗi kênh là 20Gbit/s. Các giả thiết còn lại như mô tả ở Mục 3.2. Kết quả trên Hình 4.3 cho thấy rằng, xác suất tồn thất burst của mô hình OBSWDM-Simu và mô hình toán học là tương tự nhau, sai số giữa hai mô hình không đáng kể. Điều này chứng tỏ mô hình OBSWDM-Simu cho kết quả mô phỏng với độ chính xác cao.



Hình 4.3. Xác suất tồn thất burst trên toàn mạng OBS

## 5. KẾT LUẬN

Việc nghiên cứu và triển khai các mô hình phân tích mạng OBS bằng mô phỏng và giải tích toán học là điều cần thiết và cấp bách do việc nghiên cứu bằng thực nghiệm đang còn rất khó khăn. Bài báo đã đề xuất một mô hình mô phỏng mạng quang thế hệ mới sử dụng OBS có tên là OBSWDM-Simu. Mô hình này có khả năng mô phỏng các giao thức điều khiển trong mạng OBS tốc độ cao có xét đến ảnh hưởng của các hiệu ứng lớp vật lý. Một số mô hình giải tích toán học để phân tích mạng OBS và so sánh với kết quả mô phỏng của mô hình OBSWDM-Simu cũng đã được đưa ra. Kết quả phân tích đã cho thấy rằng, mô hình OBSWDM-Simu cho kết quả mô phỏng gần giống với kết quả của mô hình toán học, điều này cho phép khẳng định tính đúng đắn của các phương pháp nghiên cứu. Thực thi mô phỏng trên các dạng tô pô cơ bản thường sử dụng trong mạng đường trục như tô pô mắt lưới, tô pô Ring, tô pô sao và đã thu được kết quả tương tự như tô pô sử dụng trong bài báo này. Vì vậy, mô hình OBSWDM-Simu có thể sử dụng để mô phỏng mạng OBS với tô pô bất kỳ và có độ chính xác cao.

Với nhu cầu lưu lượng thông tin ngày càng tăng và tốc độ truyền dẫn ngày càng cao, với công nghệ hiện tại đã đạt đến 448Gbit/s và lên đến hàng Terabits/s cho mỗi kênh bước sóng nên việc thiết lập mô hình mô phỏng và đánh giá tính chính xác của mô hình là điều đặc biệt quan trọng. Do đó, cần tiếp tục phát triển mô hình sử dụng lý thuyết hàng đợi có xét đến ảnh hưởng của các hiệu ứng vật lý trên các tuyến truyền dẫn cũng như các bộ chuyển mạch WSS trong mạng quang thế hệ mới. Đây là hướng nghiên cứu được tiếp tục thực hiện trong thời gian tới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Fatih Yaman *et al.*,  $10 \times 112\text{Gb/s}$  PDM-QPSK transmission over 5032 km in few-mode fibers, *Optics Express* **18** (20) (2010) 21342–21349.
- [2]. Y. Ye, L.N. Binh, E. Zhou, T. Wu, S. Zhang, X. Xu, A simple criterion for performance estimation of 112gb/s pdm-qpsk wdm system over uncompensated links, *Proc. Optical Fiber Conference*, LA USA, 2012, JW2A.45.
- [3]. Poggiolini, A *et al.*, Analytical modeling of nonlinear propagation in uncompensated optical transmission links, *IEEE Photonics Technology Letters* **23** (11) (2011) 742–743.
- [4]. T. Richter *et al.*, Transmission of single-channel 16-qam data signals at terabaud symbol rates, *IEEE J. Lightwave Tech.* **30** (4) (2012) 504–511.
- [5]. J.P. Jue, V.M. Vokkarane, *Optical Burst Switched Networks*, Springer, Berlin, 2005.
- [6]. T.J. Xiu *et al.*, Field experiment with fixed line rate (112G, 445G and 1.15 Tb/s) over 3560 km installed fiber using filterless coherent receiver without EDFA, *OFC 2012*, Postdeadline paper, LA USA, March 6-9, 2012.
- [7]. J. Yu et alia, Generation, transmission, and coherent detection of 11.2 Tb/s (112x100Gb/s) single source optical OFDM superchannel, *OFC2012 postdealine paper PDPA6*, LA USA, March 6-10, 2012.
- [8]. H. Jeong, J. Mo, M. Kang, OBS-ns: an NS-2 based optical burst switching (OBS) simulator, *Proc. Soc. Comp. Simul* **38** (2) (2006) 313–316.
- [9]. <http://www.omnetpp.org>, access date: March 2012.
- [10]. A.L. Barradas *et al.*, Edge-node deployed routing strategies for load balancing in optical burst switched networks, *ETRI Journal* **31** (1) (2009) 31–41.
- [11]. <https://www.tlm.unavarra.es/research/projects/strong/soft/obsmodules/>.
- [12]. L.N. Binh and L.H. Binh, Transport of assigned wavelength channels over ultra-high speed ethernet all-optical dwdm networks under constraints of fiber chromatic and polarization mode dispersion effects, *IJCSNS* **9** (8) (2009) 27–37.
- [13]. L.N. Binh, L.H. Binh and D.N. Nguyen, Burst switching in ultra-high speed all-optical ip/dwdm network with and without buffers under linear and nonlinear effects, *Proc.of IEEE Int.Conf. Comm. Syst., ICCS'10*, Singapore, Nov.2010 (635–639).
- [14]. T.Venkatesh, *An analytical approach to Optical Burst Switched networks*, Springer, 2010.
- [15]. Rosberg *et al.*, Blocking probabilities of optical burst switching networks based on reduced load fixed point approximations, *IEEE INFOCOM* **3** (2003) 2008–2018.
- [16]. Son H. N. *et al*, Burst loss probability model for hybrid deflection and retransmission routing in obs networks, *Proc. IEEE Int. Conf. Research, Innovation and Vision for the Future in Comp and Comm. Tech.*, Hanoi, Vietnam, 1-4 Nov, 2010.
- [17]. J. R. Munkres, *Elements of Algebraic Topology*, Perseus Press, Jackson, USA,1993.

*Ngày nhận bài 12 - 3 - 2012*

*Ngày lại sau sửa ngày 14 - 11 - 2013*