

MÔ HÌNH PHÂN TÍCH SỰ KẾT HỢP CỦA CHUYỂN ĐỔI BƯỚC SÓNG CÓ GIỚI HẠN VÀ ĐỊNH TUYẾN LỆCH HƯỚNG TRÊN MẠNG CHUYỂN MẠCH CHÙM QUANG SỬ DỤNG CHUỖI MARKOV 4-CHIỀU

DẶNG THANH CHƯƠNG¹, VŨ DUY LỢI², VÕ VIẾT MINH NHẬT³

¹*Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Khoa học Huế*

²*Trung tâm CNTT, Văn phòng TW Đảng*

³*Khoa Du lịch, Đại học Huế*

Tóm tắt. Bài toán tắc nghẽn trong mạng chuyển mạch chùm quang (OBS) được xem là bài toán quan trọng cần giải quyết. Sự tắc nghẽn chùm trong mạng OBS có thể xuất hiện khi hai chùm quang dữ liệu từ hai cổng vào khác nhau cố gắng đi ra trên cùng một cổng ra, trên cùng kênh bước sóng và cùng thời điểm. Các giải pháp xử lý tắc nghẽn hiện nay bao gồm thực hiện chuyển đổi bước sóng đối với một trong hai chùm quang tranh chấp, sử dụng bộ đệm quang FDL để làm trễ sự đi ra của một trong hai chùm quang, hay định chuyển mạch chùm quang có độ ưu tiên thấp hơn đến một cổng ra khác (định tuyến lệch hướng). Bài viết đề xuất một mô hình chuỗi Markov liên tục 4 chiều phân tích khả năng giới hạn bộ chuyển đổi bước sóng có xét đến sự lệch hướng chùm trên mạng OBS và đề xuất một thuật toán tính ma trận tốc độ chuyển trạng thái Q nhằm tính các xác suất trạng thái cân bằng, từ đó tính xác suất tắc nghẽn tại nút lõi OBS.

Abstract. The contention in Optical Burst Switching (OBS) networks is one of the important problems attracting much attention. A contention will occur when two optical burst from two different input ports on trying to go out the same output port, on the same wavelength channel and at the same time. The congestion solutions consist of wavelength conversion, usage of FDL optical buffering or deflection routing. This article examines combination of wavelength conversion and deflection routing, in which range-limited and partial wavelength conversion are addressed. To analyze the performance (based on the blocking probability) of this combination, an 4-dimentional continuous Markov chain is used, would be to use and specially, an algorithm of computing matrix transition rate Q is proposed to calculate the steady-state probability.

Keywords: Blocking probability, OBS, Partial-Limited Wavelength conversion (PLWC), 4-dimensional Markov chain.

1. GIỚI THIỆU

Chuyển mạch chùm quang OBS (*Optical Burst Switching*) trong mạng ghép kênh quang WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) được xem là công nghệ đầy triển vọng đối với mạng Internet thế hệ sau, bởi vì nó hứa hẹn nhiều lợi thế hấp dẫn như tốc độ nhanh và hiệu suất sử dụng băng thông cao so với chuyển mạch kênh quang [1]. Một trong những vấn đề cấp bách

cần giải quyết trong mạng OBS đó là việc giảm xác suất mất chùm nhằm hạn chế tắc nghẽn [2]. Tắc nghẽn chùm có thể được giải quyết bằng 3 phương pháp cơ bản sau: chuyển đổi bước sóng, sử dụng đường trễ quang FDL (*Fiber Delay Lines*) hoặc định tuyến lệch hướng. Phương pháp chuyển đổi bước sóng cho phép chuyển tiếp một chùm quang đến trên các kênh bước sóng khác nhau, nhằm loại bỏ ràng buộc tính liên tục giữa các bước sóng và cải tiến đáng kể hiệu suất của mạng OBS. Tuy nhiên, chi phí để sản xuất thương mại các bộ chuyển đổi WC (*Wavelength Converter*) hiện tại vẫn rất đắt đỏ, đặc biệt với công nghệ chuyển đổi bước sóng đầy đủ (*full*). Vì vậy, vấn đề nghiên cứu giảm xác suất tắc nghẽn bằng cách dựa trên chuyển đổi bước sóng từng phần (*partial*) hay khả năng vùng chuyển đổi giới hạn (*limited*) được xem là thực tế hơn trong mạng OBS.

Mục tiêu của bài báo là nghiên cứu ứng dụng mô hình Markov 4-chiều trong việc phân tích sự mất chùm trên một nút lõi OBS với giới hạn chuyển đổi bước sóng, kết hợp định tuyến lệch hướng. Khác với các nghiên cứu trước đây trong [2, 3] chỉ xét với 1 cổng ra, mô hình phân tích đề xuất của chúng tôi áp dụng trong trường hợp với số cổng ra tùy ý. Nội dung tiếp theo của bài báo bao gồm: Mục 2 giới thiệu mô hình Markov 4 chiều phân tích sự chuyển đổi bước sóng có giới hạn, xét đến khả năng lệch hướng, minh họa với 2 cổng ra; trong Mục 3, đề xuất một thuật toán tính ma trận tốc độ trạng thái Q , từ đó tính xác suất tắc nghẽn; kết quả phân tích trên mô hình đề xuất cũng được trình bày trong phần này; và cuối cùng là phần kết luận.

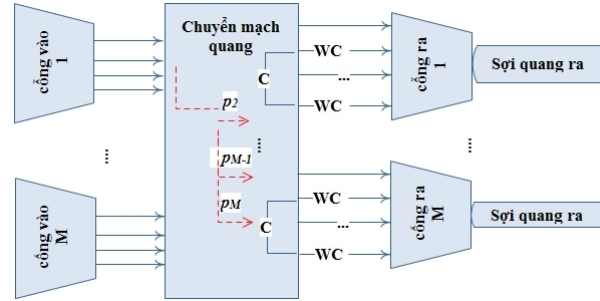
2. MÔ HÌNH PHÂN TÍCH GIỚI HẠN CHUYỂN ĐỔI BƯỚC SÓNG VỚI ĐỊNH TUYẾN LỆCH HƯỚNG

Trong chuyển mạch chùm quang có sử dụng chuyển đổi bước sóng, sự tranh chấp được giảm đi bằng cách gia tăng dung lượng dưới dạng đa bước sóng trên một đường. Một chùm tranh chấp có thể được chuyển mạch sang một bước sóng khả dụng bất kỳ trên liên kết đi ra. Việc nghiên cứu giải quyết tranh chấp bằng chuyển đổi bước sóng đầy đủ đã được nghiên cứu. Tuy nhiên, các bộ chuyển đổi bước sóng (WCs) hiện nay vẫn là những thiết bị phần cứng phức tạp và đắt đỏ. Vì vậy, sử dụng chuyển đổi bước sóng từng phần (*Partial Wavelength Conversion*) hay chuyển đổi bước sóng có khả năng giới hạn LRWC (*Limited Range Wavelength Conversion*), được xem là giải pháp hữu hiệu và thực tế hơn trong mạng OBS hiện nay [2, 3].

2.1. Kiến trúc tại nút lõi OBS

Mô hình nút lõi OBS với nhiều cổng (vào/ra) được mô tả như ở Hình 2.1. Đối với kiến trúc nút lõi OBS, một hay nhiều bộ chuyển đổi bước sóng có thể được chia sẻ cho tất cả các cổng ra theo kiến trúc SPN (*Share-Per-Node*), tức là các bộ chuyển đổi bước sóng được đặt chung tại nút và các lưu lượng đến trên các kết nối vào đều có thể sử dụng để chuyển đổi nếu có thể, hoặc theo kiến trúc SPL (*Share-Per-Link*), nghĩa là bộ chuyển đổi bước sóng được trang bị cho một kết nối ra và chỉ được sử dụng bởi các lưu lượng hướng đến kết nối ra đó. Mặc dù không hiệu quả như chuyển đổi bước sóng đầy đủ, chuyển đổi bước sóng có giới hạn cũng làm giảm đáng kể xác suất tắc nghẽn, trong khi hạn chế được chi phí trang bị các bộ chuyển đổi bước sóng tại một nút [3]. Trong bài báo này, chỉ nghiên cứu với giới hạn chuyển đổi bước sóng trong kiến trúc SPL, xem xét với nhiều hơn một cổng ra (chức năng của các cổng ra là

tương đương) và sử dụng mô hình Markov CTMC (*Continuous Time Markov Chain*) 4-chiều [2, 3] để phân tích đánh giá mô hình này.



Hình 2.1. Kiến trúc SPL của nút lõi OBS với nhiều cổng ra

Các giả thiết trong mô hình như sau:

(i) Một nút lõi OBS có nhiều cổng vào và nhiều cổng ra; một sợi quang WDM tương ứng với mỗi cổng mang ω bước sóng; và có C ($C < \omega$) bộ chuyển đổi bước sóng tại mỗi cổng ra.

(ii) Các bộ chuyển đổi được xem xét trong bài báo này có phạm vi chuyển đổi hạn chế (limited-range), tức là một chùm đến trên một bước sóng vào chỉ có thể được chuyển đổi đến một bước sóng ra lân cận với bước sóng vào. Đặt d (số nguyên dương) là bậc chuyển đổi $d \in [[0, \omega/2]]$ và như thế một chùm đến chỉ có thể được chuyển đổi trong phạm vi $r = 2d + 1$.

(iii) Đối với bước sóng đến λ_i bất kỳ ($0 \leq i \leq \omega - 1$), tập chuyển đổi N^i là:

$$N^i = \{\lambda_j | j = (i + l) \bmod (\omega), l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm d\}, \text{ ở đây } |N^i| = r.$$

(iv) Các chùm đến theo phân phối Poisson với tốc độ trung bình γ và thời gian phục vụ theo phân bố mũ với giá trị trung bình $1/\mu$, tải lưu lượng đến là một hàm dựa trên bước sóng bằng $\gamma/(\omega\mu)$.

(v) Giả thiết mỗi nút OBS là một hệ đối xứng [5], tức là nếu một nút OBS có M cổng ra, và cổng ra trên lộ trình ban đầu của chùm là i , xác suất (p_j) mà chùm được lệch hướng đến cổng ra j là được phân bố bằng nhau. Như mô tả trên Hình 2.1, giả thiết chùm khi đến sẽ đi ra đầu tiên theo cổng 1, và có thể lệch hướng đến các cổng còn lại với xác suất bằng nhau $p_2 = \dots = p_{M-1} = p_M$. Và ta có, $\sum_{k=1}^M \{p_k | k \neq i\} = p$, trong đó i là cổng chùm đến và p là tổng xác suất lệch hướng. Để đơn giản, ta giả thiết giá trị p ở đây được xác định trước ($0 \leq p \leq 1$).

2.2. Mô hình nghiên cứu liên quan

Trong các nghiên cứu trước ở [2, 3], các tác giả chỉ xem xét mô hình giới hạn bộ chuyển đổi WC với 1 cổng ra tại nút lõi OBS (các giả thiết tương tự như trên). Theo đó, mô hình được mô tả là một quá trình Markov liên tục 2-chiều và lược đồ trạng thái được chỉ ra trong [3], với số trạng thái tính được:

$$n_s = \frac{((2\omega - C + 2)(C + 1))}{2}. \quad (2.1)$$

Ngoài ra, vấn đề giới hạn vùng chuyển đổi bước sóng cũng được đề cập trong [2] và [7]. Dựa trên [2], ở đây, ta đặt τ_k biểu thị xác suất mà các bộ chuyển đổi thực hiện chuyển đổi thành công (ở đây $k \in \{0, 1, 2, \dots, \omega\}$) được tính như sau:

$$\tau_k = \begin{cases} 1, & k = 1, \dots, r-1 \\ \frac{k - \sum_{R=r}^k (R-r+1)n_k^R}{k}, & k = r, \dots, \omega-1 \end{cases}$$

trong đó, R là độ dài của dây liên tục các bước sóng đã được sử dụng, n_k^R biểu thị giá trị trung bình của số dây liên tục các bước sóng bận [2]:

$$n_k^R = \begin{cases} \omega \frac{C^{k-R}}{C^k}, & k = 1, \dots, \omega-2; R = 1, \dots, k \\ 1, & k = \omega-1, \omega; R = k \\ 0, & \text{các trường hợp còn lại.} \end{cases}$$

2.3. Mô hình đề xuất

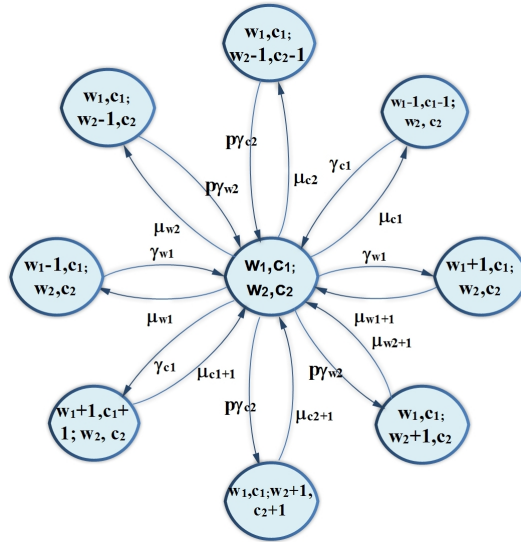
Trong mô hình đã xét ở [2, 3, 7], các tác giả đã bỏ qua sự ảnh hưởng của lưu lượng lệch hướng đến các cổng ra khác (tức là chỉ xét với 1 cổng ra). Để thu được các kết quả thực tế hơn khi không bỏ qua ảnh hưởng của sự lệch hướng, trạng thái của hệ thống bây giờ sẽ không chỉ bao gồm số bước sóng (cũng như số bộ chuyển đổi bước sóng) tại 1 cổng ra, mà phải tính toán đến tất cả các cổng ra khác trong nút lõi OBS đang xét. Không mất tính tổng quát, mô hình đề xuất sẽ chỉ xem xét nút lõi OBS với 2 cổng ra (gọi là cổng 1 và cổng 2); mỗi cổng tương ứng với 1 sợi quang WDM mang ω bước sóng và có C ($C \leq \omega$) bộ chuyển đổi bước sóng được sử dụng.

Mô hình (Hình 2.2) mô tả chuyển đổi trạng thái là một quá trình Markov liên tục 4 chiều (four-dimensional) với trạng thái $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ tại một thời điểm t bất kỳ được mô tả bởi 4 biến $w_1(t)$, $c_1(t)$; và $w_2(t)$, $c_2(t)$, biểu thị số bước sóng và số bộ chuyển đổi bước sóng trên cổng ra 1 và cổng ra 2, tương ứng.

Đặt $X(t) = \{w_1(t), c_1(t); w_2(t), c_2(t)\}$ biểu thị quá trình ngẫu nhiên (*stochastic process*) trên không gian trạng thái $S = \{w_1, c_1; w_2, c_2\}: 0 \leq w_1, w_2 \leq \omega, 0 \leq c_1, c_2 \leq \min\{\omega, C\}$. Nếu hệ thống ở trong trạng thái $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ tại thời điểm t và có 1 chùm đến trong khoảng thời gian $(t, t + \delta)$, việc chuyển trạng thái có thể xảy ra như sau:

1) Bước sóng mà chùm yêu cầu là sẵn có trên cổng ra (cổng 1 hoặc cổng 2), chùm dữ liệu đến không cần sử dụng bất kỳ bộ chuyển đổi WC nào và trạng thái mới sẽ là $(w_1+1, c_1; w_2, c_2)$, với $w_1+1 \leq \omega$, hoặc $(w_1, c_1; w_2+1, c_2)$, với $w_2+1 \leq \omega$; khi đó tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $\gamma_{w_1} = (\omega - w_1)\gamma/\omega$ và $\gamma_{w_2} = (\omega - w_2)\gamma/\omega$.

2) Bước sóng yêu cầu đã được sử dụng trên cả hai cổng ra, khi đó bộ chuyển đổi bước sóng sẽ được sử dụng. Chùm sẽ được lập lịch lại trên một bước sóng khác được lựa chọn ngẫu nhiên (trong vùng giới hạn) và một bộ chuyển đổi bước sóng được sử dụng trên cổng ra tương ứng. Khi đó trạng thái mới sẽ là $(w_1+1, c_1+1; w_2, c_2)$, với $w_1+1 \leq \omega$ và $c_1+1 \leq C$, hoặc $(w_1, c_1; w_2+1, c_2+1)$, với $w_2+1 \leq \omega$ và $c_2+1 \leq C$; tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $\gamma'_{w_1} = \gamma(w_1/\omega) \cdot \tau_{w_1}$ và $\gamma'_{w_2} = \gamma(w_2/\omega) \cdot \tau_{w_2}$, trong đó τ_k ($k = w_1$ hoặc w_2) là xác suất mà bộ chuyển đổi thực hiện thành công.



Hình 2.2. Mô hình đề xuất cho mỗi nút OBS

3) Chùm đến sẽ được lệch hướng sang cổng ra khác (với xác suất p) trong các trường hợp sau:

+ Tất cả các bước sóng trên mỗi cổng ra đều đã được sử dụng (tức là $w_1 = \omega$ hoặc $w_2 = \omega$), khi đó, tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $(p \cdot \gamma_{w_1} + \gamma_{w_2})$ khi lệch hướng từ cổng 1 sang cổng 2, hoặc $(p \cdot \gamma_{w_2} + \gamma_{w_1})$ trong trường hợp ngược lại.

+ Bước sóng mà chùm đến yêu cầu là bận và không còn bộ chuyển đổi sẵn có trên mỗi cổng (tức là $c_1 = C$ hoặc $c_2 = C$), tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $(p \cdot \gamma'_{w_1} + \gamma'_{w_2})$ khi lệch hướng từ cổng 1 sang cổng 2, hoặc $(p \cdot \gamma'_{w_2} + \gamma'_{w_1})$ trong trường hợp ngược lại.

4) Chùm đến sẽ bị rơi và trạng thái không thay đổi nếu:

+ Tất cả các bước sóng trên cả hai cổng ra đều bận, tức là ở trạng thái $(\omega, c_1; \omega, c_2)$ đối với một vài giá trị c_1 và c_2 nào đó tại thời điểm t .

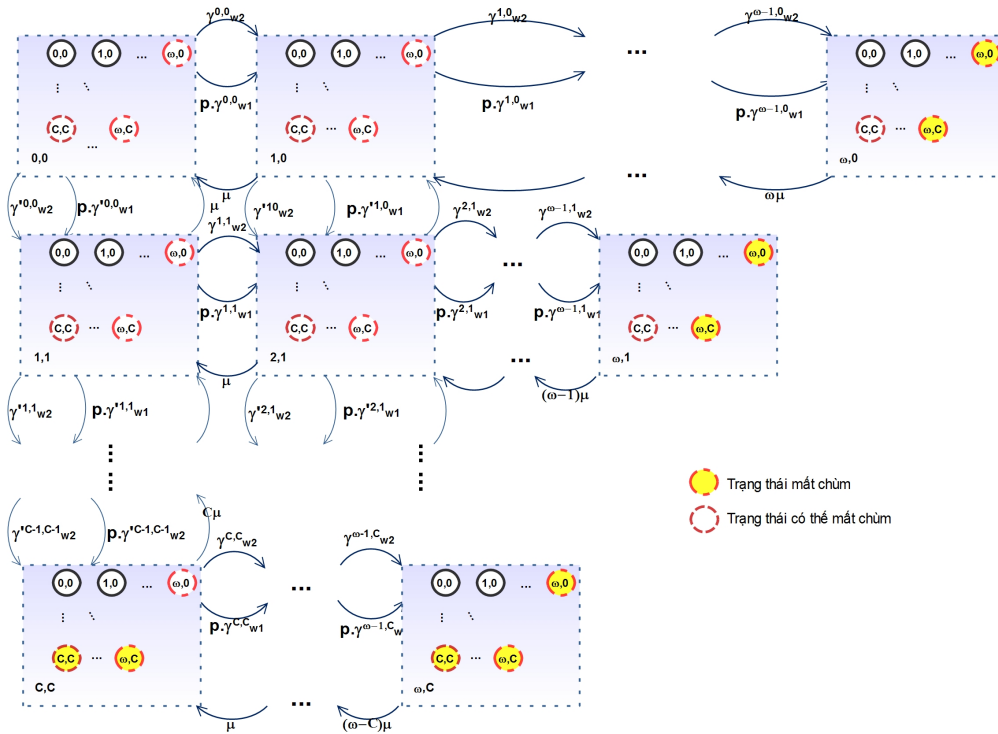
+ $c_1 = c_2 = C$, tức là ở trạng thái $(w_1, C; w_2, C)$.

Tương tự, khi hệ thống ở trong trạng thái $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ và một chùm được phục vụ trong khoảng thời gian $(t, t + \delta)$, các trạng thái có thể xảy ra như sau:

5) Trạng thái là $(w_1 - 1, c_1; w_2, c_2)$, với $w_1 - 1 \geq 0$ và $w_1 \geq c_1$, hoặc $(w_1, c_1; w_2 - 1, c_2)$, với $w_2 - 1 \geq 0$ và $w_2 \geq c_1$ nếu chùm không sử dụng bộ chuyển đổi bước sóng nào. Tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $\mu_{w_1} = (w_1 - c_1)\mu$ và $\mu_{w_2} = (w_2 - c_2)\mu$.

6) Trạng thái là $(w_1 - 1, c_1 - 1; w_2, c_2)$, với $w_1 - 1 \geq 0$ và $c_1 - 1 \geq 0$, hoặc $(w_1, c_1; w_2 - 1, c_2 - 1)$, với $w_2 - 1 \geq 0$ và $c_2 - 1 \geq 0$ nếu một bộ chuyển đổi bước sóng đã được sử dụng trên cổng ra bởi chùm. Tốc độ chuyển trạng thái tương ứng sẽ là $\mu'_{w_1} = c_1\mu$ và $\mu'_{w_2} = c_2\mu$.

Như vậy lược đồ trạng thái ứng với mô hình đề xuất có dạng mô hình Markov 4 chiều, với mỗi trạng thái là 2 cặp $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ như phân tích ở trên. Không mất tính tổng quát, ta mô tả lược đồ trạng thái của mô hình đề xuất như ở Hình 2.3, trong đó, bên trong mỗi nhóm trạng thái (w_2, c_2) của Hình 2.3 sẽ biểu diễn các quá trình chuyển trạng thái tại cổng 1 ứng với mỗi trạng thái trên cổng 2 và có n_s số trạng thái (phương trình (2.1)). Lúc này có



Hình 2.3. Lược đồ chuyển trạng thái ứng với mô hình đề xuất

thể xem lược đồ bên trong một nhóm trạng thái (w_2, c_2) ($0 \leq c_2 \leq w_2 \leq \omega, c_2 \leq C \leq \omega$) của Hình 2.3 chính là dạng 2 chiều như lược đồ trạng thái trong [3].

Trong lược đồ trạng thái ở Hình 2.3, ngoài các quá trình chuyển trạng thái trong cổng 1, còn có các quá trình chuyển trạng thái xảy ra giữa hai cặp nhóm (w_2, c_2) của cổng 2. Xét ví dụ với việc chuyển trạng thái từ nhóm $(0,0)$ đến nhóm $(1,0)$ của cổng 2: bao gồm n_s quá trình chuyển trạng thái từ $(0,0;0,0)$ đến $(0,0;1,0)$; từ $(1,0;0,0)$ đến $(1,0;1,0)$; ...; từ $(w_1, c_1; 0, 0)$ đến $(w_1, c_1; 1, 0)$; và từ $(\omega, C; 0, 0)$ đến $(\omega, C; 1, 0)$. Tương tự, các quá trình chuyển trạng thái từ nhóm $(0,0)$ đến $(1,1)$ bao gồm: $(0,0;0,0)$ đến $(0,0;1,1)$; từ $(1,0;0,0)$ đến $(1,0;1,1)$; ...; từ $(w_1, c_1; 0, 0)$ đến $(w_1, c_1; 1, 1)$; và từ $(\omega, C; 0, 0)$ đến $(\omega, C; 1, 1)$. Như vậy, ứng với mỗi cặp trạng thái của cổng 2 ta có n_s số trạng thái xảy ra bên trong cổng 1, và do có n_s cặp chuyển trạng thái giữa các nhóm của cổng 2, nên ta có $(n_s * n_s)$ số trạng thái trên lược đồ ở Hình 2.3.

Xác suất trạng thái cân bằng $\pi_{w_1, c_1; w_2, c_2}$ có thể tính được theo hệ các hàm ở trạng thái ổn định như sau:

$$\begin{cases} (\gamma_{w_1} + \gamma_{w_2} + \mu_{w_1} + \mu_{w_2} + \gamma_{c_1} + \gamma_{c_2} + \mu_{c_1} + \mu_{c_2})\pi_{w_1, c_1; w_2, c_2} = \gamma_{w_1-1}\pi_{w_1-1, c_1; w_2, c_2} + \\ + \mu_{w_1+1}\pi_{w_1+1, c_1; w_2, c_2} + \gamma_{c_1-1}\pi_{w_1-1, c_1-1; w_2, c_2} + \mu_{c_1+1}\pi_{w_1+1, c_1+1; w_2, c_2} + \gamma_{c_2-1}\pi_{w_1, c_1; w_2-1, c_2-1} \\ + \mu_{c_2+1}\pi_{w_1, c_1; w_2+1, c_2+1} + \gamma_{w_2-1}\pi_{w_1, c_1; w_2-1, c_2} + \mu_{w_2+1}\pi_{w_1, c_1; w_2+1, c_2} \\ \sum_{w_1, c_1; w_2, c_2} \pi_{w_1, c_1; w_2, c_2} = 1, (0 \leq c_1, c_2 \leq w_1, w_2 \leq \omega; c_1, c_2 \leq C < \omega) \end{cases} \quad (2.2)$$

Theo các luật chuyển trạng thái được phân tích ở Hình 2.2 và lược đồ trạng thái ở Hình 2.3, xác suất tắc nghẽn của các chùm trong trường hợp này được tính theo các trường hợp sau:

- *Tắc nghẽn do thiếu bước sóng khả dụng*: trường hợp này xảy ra khi có một chùm quang mới đến nhưng đã hết bước sóng khả dụng trên cả hai cổng ra (tương ứng với các trạng thái $(\omega, c_1; \omega, c_2)$, với $0 \leq c_1, c_2 \leq C$).

- *Tắc nghẽn do thiếu thiết bị WC*: trường hợp này xảy ra khi có một chùm quang mới đến yêu cầu sử dụng một bước sóng trong số các bước sóng đã được sử dụng bởi các chùm trước đó (bước sóng yêu cầu đang bận trên cả hai cổng ra), và lúc này không còn bộ chuyển đổi bước sóng nào rồi (tương ứng với các trạng thái $(w_1, C; w_2, C)$, với $C \leq w_1 \leq \omega$ và $C \leq w_2 - 1 \leq \omega$).

- *Xác suất lệch hướng p* cũng được xem xét với khả năng lệch hướng từ cổng 1 sang cổng 2 (hoặc ngược lại), nên xác suất tắc nghẽn trong trường hợp này phải tính đến khi hệ thống ở trạng thái $(\omega, c_1; w_2, c_2)$, với $0 \leq c_1 \leq C$ và $(w_1, C; w_2, c_2)$, với $C \leq w_1 \leq \omega$; hoặc $(w_1, c_1; \omega, c_2)$, với $0 \leq c_2 \leq C$ và $(w_1, c_1; w_2, C)$, với $C \leq w_2 \leq \omega$ nhưng không có sự lệch hướng (xác suất $(1 - p)$).

- *Xác suất chuyển đổi bước sóng thành công τ_k* trong trường hợp có sử dụng bộ chuyển đổi bước sóng (tính theo các giá trị tốc độ chuyển trạng thái).

Do đó, xác suất tắc nghẽn (tương ứng *PB*) của nút lõi OBS được tính như sau:

$$PB = \sum_{c_2=0}^C \sum_{c_1=0}^C \pi_{\omega, c_1; \omega, c_2} + \sum_{w_2=C}^{\omega} \frac{w_2}{\omega} \left(\sum_{w_1=C}^{\omega-1} \frac{w_1}{\omega} \pi_{w_1, C; w_2, C} \right) + (1-p) \cdot \sum_{c_2=0}^C \sum_{w_2=c_2}^{\omega-1} \left(\sum_{c_1=0}^C \pi_{\omega, c_1; w_2, c_2} \right) + (1-p) \cdot \sum_{c_2=0}^{C-1} \sum_{w_2=c_2}^{\omega} \sum_{c_1=C}^{\omega-1} \pi_{w_1, C; w_2, c_2} \tag{2.3}$$

Để tính *PB* trong công thức (2.3), ta phải tính các giá trị xác suất trạng thái cân bằng $\pi_{w_1, c_1; w_2, c_2}$ bằng cách giải phương trình (2.2). Tiếp theo, ta xây dựng một thuật toán tính ma trận tốc độ trạng thái *Q*, từ đó giải các phương trình đại số tuyến tính (2.2).

3. THUẬT TOÁN XÂY DỰNG MA TRẬN Q

Bài báo xây dựng một phương pháp tính các xác suất trạng thái cân bằng $\pi_{w_1, c_1; w_2, c_2}$ bằng cách chuyển đổi công thức (2.2) sang dạng ma trận *Q* (xem [4]) như sau:

Input: Không gian trạng thái *S* (theo lược đồ trạng thái ở Hình 2.3).

Bước 1. Xây dựng ma trận tốc độ chuyển trạng thái *Q* như sau (Bảng 1):

Bảng 1. Ma trận tổng quát Q $((n_s * n_s) \times (n_s * n_s))$

QQJ₀	B⁰₂			
C¹₂	QQJ₁	B¹₂		
	C²₂	QQJ₂	...	
		B^j₂
			C^j₂	QQJ_C

Bảng 2. Ma trận QQJ_j (j=0 ÷ C) có kích thước $((\omega+1-j) * n_s) \times ((\omega+1-j) * n_s)$

QQ	A^j₂			
A^{j+1}₂	QQ	A^{j+1}₂		
	A^{j+2}₂	QQ	...	
		A^{\omega-1}₂
			A^{\omega}₂	QQ

Trong đó:

- **Bước 1.1.** Xây dựng các ma trận QQJ_j ($0 \leq j \leq C$) có dạng như sau (Bảng 2):

+ **Bước 1.1.1.** Với $A_2^j, A_2^{j+1}, \dots, A_2^{\omega-1}$, là các ma trận chuyển trạng thái tại cổng 2 (có kích thước $n_s \times n_s$), ứng với các trạng thái từ $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ sang $(w_1, c_1; w_2 + 1, c_2)$, ($0 \leq c_1 \leq C$, $0 \leq w_1 \leq \omega$; $0 \leq c_2 \leq j$, $j \leq w_2 \leq \omega - 1$), tốc độ chuyển trạng thái là $\gamma_{w_2} = (\omega - w_2)\gamma/\omega$ hoặc $p \cdot \gamma_{w_1}$ (khi $w_1 = \omega$).

+ **Bước 1.1.2.** Với $A_2^{j+1}, A_2^{j+2}, \dots, A_2^\omega$, là các ma trận chuyển trạng thái tại cổng 2 (có kích thước $n_s \times n_s$), ứng với các trạng thái từ $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ sang $(w_1, c_1; w_2 - 1, c_2)$, ($0 \leq c_1 \leq C$, $0 \leq w_1 \leq \omega$; $0 \leq c_2 \leq j$, $j + 1 \leq w_2 \leq \omega$), tốc độ chuyển trạng thái là $\mu_{w_2} = (w_2 - c_2)\mu$.

+ **Bước 1.1.3.** Các ma trận QQ được tạo thành từ các ma trận A_1^k, B_1^k, C_1^k , ứng với các quá trình chuyển trạng thái tại cổng 1 trong mỗi trạng thái của cổng 2 (tương ứng với lược đồ trạng thái ở Hình 2.3) (Bảng 3):

Bảng 3. Ma trận QQ ($0 \leq j \leq C$) có kích thước $(n_s \times n_s)$

A_1^0	B_1^0			
C_1^1	A_1^1	B_1^1		
	C_1^2	A_1^2	...	
		B_1^k
			C_1^k	A_1^k

Bảng 4. Ma trận B_2^j ($0 \leq j \leq C-1$) có kích thước $((\omega + 1 - j)n_s \times (\omega - j)n_s)$

BB_2^0				
	BB_2^1			
		BB_2^2		
			...	
				BB_2^k

trong đó, các ma trận A_1^k, B_1^k, C_1^k có dạng như sau:

(i) $A_1^k(m, n)$: xác định tốc độ chuyển từ trạng thái $(m, k; w_2, c_2)$ sang trạng thái $(n, k; w_2, c_2)$ với $k \leq m, n \leq \omega$; $0 \leq k \leq C$. Ma trận $A_1^k(m, n)$ có kích thước $(\omega + 1 - k) \times (\omega + 1 - k)$. Các phần tử khác 0 của ma trận $A_1^k(m, n)$ được tính như sau:

$$A_1^k(m, m - 1) = k\mu \text{ với } 1 \leq k \leq (\omega - j), \text{ và}$$

$$A_1^k(m, m + 1) = \gamma(1 - (m - k)/\omega) \text{ với } 0 \leq m \leq (\omega - 1 - k).$$

(ii) $B_1^k(m, n)$: xác định tốc độ chuyển từ trạng thái $(m, k; w_2, c_2)$ sang trạng thái $(n, k + 1; w_2, c_2)$ với $k \leq m \leq \omega$; $k + 1 \leq n \leq \omega$; $0 \leq k \leq C - 1$. Ma trận $B_1^k(m, n)$ có kích thước $(\omega + 1 - k) \times (\omega - k)$, ứng với tốc độ chuyển trạng thái γ'_{w_1} . Các phần tử khác 0 của ma trận $B_1^k(m, n)$ được tính như sau:

$$B_1^k(m, m) = \gamma((m + k)/\omega) \cdot \tau_k \text{ với } 0 \leq m \leq (\omega - 1 - k).$$

(iii) $C_1^k(m, n)$: xác định tốc độ chuyển từ trạng thái $(m, k; w_2, c_2)$ sang trạng thái $(n, k - 1; w_2, c_2)$ với $k \leq m \leq \omega$; $k - 1 \leq n \leq \omega$; $1 \leq k \leq C$. Ma trận $C_1^k(m, n)$ có kích thước $(\omega + 1 - k) \times (\omega + 2 - k)$. Các phần tử khác 0 của ma trận $C_1^k(m, n)$ được tính như sau:

$$C_1^k(m, m) = k\mu \text{ với } 0 \leq m \leq (\omega - k).$$

- Bước 1.2. Các ma trận B_2^j ($0 \leq j \leq C - 1$) xác định tốc độ chuyển từ trạng thái $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ sang trạng thái $(w_1, c_1; w_2 + 1, c_2 + 1)$, với mỗi trạng thái (w_1, c_1) và $0 \leq w_1 \leq \omega - 1, 0 \leq c_2 \leq C$ (bảng 4). Các ma trận B_2^j có kích thước $((\omega + 1 - j) * n_s) \times (\omega - j) * n_s$), ứng với tốc độ chuyển trạng thái γ'_{w_2} hoặc $p\gamma'_{w_1}$ (khi $w_1 = \omega$).

Mỗi ma trận BB_2^k ($0 \leq k \leq \omega - 1$) có kích thước $(n_s \times n_s)$ với các giá trị khác 0 như sau:

$$BB_2^k(m, m) = p \cdot \gamma(k/\omega) \cdot \tau_k \text{ với } 0 \leq m \leq (n_s - 1).$$

- Bước 1.3. Các ma trận C_2^j ($1 \leq j \leq C$) xác định tốc độ chuyển từ trạng thái $(w_1, c_1; w_2, c_2)$ sang trạng thái $(w_1, c_1; w_2 - 1, c_2 - 1)$, với mỗi trạng thái (w_1, c_1) và $1 \leq w_2 \leq \omega, 1 \leq c_2 \leq C$. Các ma trận C_2^j có kích thước $((\omega + 1 - j) * n_s) \times (\omega + 2 - j) * n_s$), ứng với tốc độ chuyển trạng thái $\mu'_{w_2} = c_2\mu$.

Mỗi ma trận C_2^j có các giá trị khác 0 sau (các phần tử còn lại bằng 0):

$$C_2^j(m, m) = j\mu \text{ với } 0 \leq m \leq (\omega + 1 - j) * n_s.$$

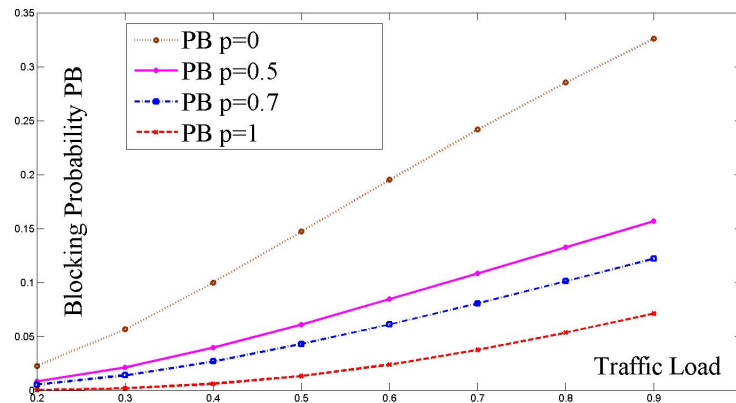
Bước 2. Tính các giá trị trên đường chéo ma trận Q , như sau:

$$Q(i, i) = - \sum_{i,j=0; j \neq i}^{n_s * n_s - 1} Q_{i,j}, \text{ ứng với } \sum_{i,j=0}^{n_s * n_s - 1} Q_{i,j} = 0$$

Output: Ma trận Q có kích thước $((n_s * n_s) \times (n_s * n_s))$.

Để tính vector Π (có kích thước $(n_s * n_s)$ chứa các xác suất trạng thái cân bằng, ta giải hệ phương trình đại số tuyến tính $\Pi \cdot Q = 0[4]$.

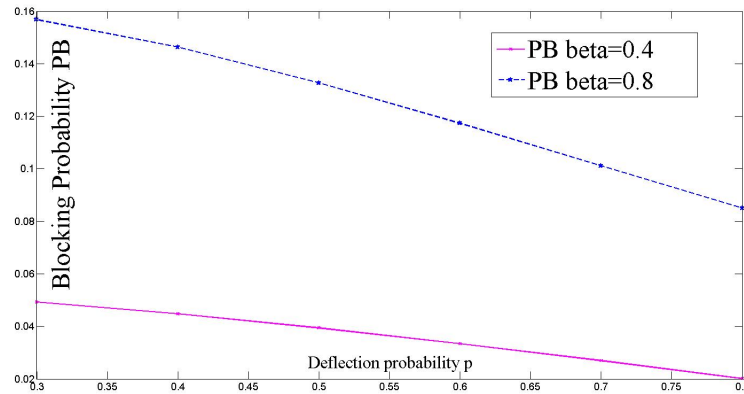
Trên cơ sở xác suất tắc nghẽn đã xác định được ở phương trình (2.3), sử dụng thuật toán xây dựng ở trên để tính các xác suất trạng thái cân bằng, chúng tôi tiến hành phân tích kết quả lý thuyết (sử dụng chương trình Mathematica) theo sự biến thiên của xác suất tắc nghẽn phụ thuộc vào lưu lượng tải mạng (ρ) và số bước sóng ω , cũng như số bộ chuyển đổi bước sóng C và giá trị xác suất τ_k . Kết quả phân tích cũng sẽ được so sánh với mô phỏng để đánh giá mô hình đề xuất. Gọi $\beta = \rho/\omega$ là hệ số lưu lượng tải mạng so với số bước sóng sử dụng, các tham số được lựa chọn trong phân tích và mô phỏng tương tự trong [2, 3], bao gồm $\beta = 0.2, \dots, 0.8$ (Erl), với các giá trị ω và C khác nhau ($C \leq \omega$).



Hình 3.4. Xác suất tắc nghẽn với $\omega = 3, C = 2$ và $p = [0, 0.5, 0.7, 1.0]$, $\tau_k = 1$ vs β .

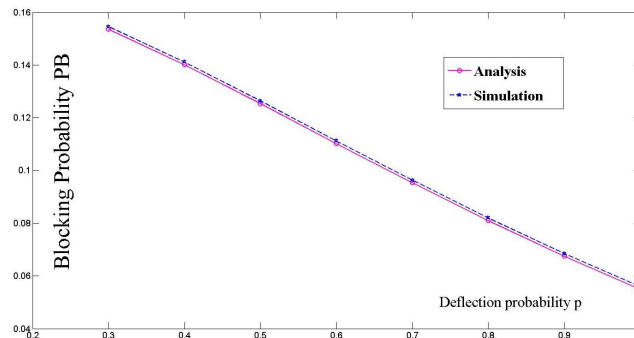
Kết quả trong hình 3.4 thu được với các trường hợp xác suất tắc nghẽn p thay đổi (bảng 0, 0.5, 0.7 và 1.0) với lưu lượng tải tăng dần (từ 0.2 đến 0.9). Rõ ràng, khi tải tăng cao, ảnh hưởng của xác suất lệch hướng càng rõ rệt. Tuy nhiên, lưu ý rằng, thực tế khi tải tăng cao, khả năng lệch hướng của các chùm thường giảm đi. Với trường hợp $p = 0$, tức là không có khả năng lệch hướng, kết quả trong hình 3.4 là hoàn toàn trùng khớp khi so sánh với mô hình chỉ xét với một cổng ra trong [3].

Xét với trường hợp thay đổi hai giá trị β với khoảng cách tương đối lớn ($\beta = 0.4$; $\beta = 0.8$), xác suất tắc nghẽn theo p cho thấy sự giảm nhanh hơn khi lưu lượng tải cao (hình 3.5).



Hình 3.5. Xác suất tắc nghẽn theo p với $\beta = 0.4$ và $\beta = 0.8$.

So sánh kết quả phân tích với kết quả mô phỏng (bằng chương trình OBS-ns) trong trường hợp chuyển đổi bước sóng hoàn toàn ($C = \omega = 3$, và $\tau_k = 1$), dưới tải lưu lượng cao ($\beta = 0.8$), cho kết quả như ở hình 3.6. Kết quả mô phỏng có giá trị cao hơn kết quả phân tích nhưng không đáng kể.



Hình 3.6. Xác suất tắc nghẽn theo p với $\beta = 0.8$ -phân tích và mô phỏng.

Phân tích với trường hợp giới hạn vùng chuyển đổi bước sóng ($\tau_k < 1$), kết quả chỉ ra ở bảng 5 cho thấy ảnh hưởng của giá trị τ_k đến xác suất tắc nghẽn. Rõ ràng khi hạn chế vùng chuyển đổi ($r < \omega$) thì xác suất tắc nghẽn sẽ lớn hơn so với trường hợp $r = \omega$.

Bảng 5. Xác suất tắc nghẽn với $\omega = 4$, $C = 2$, r thay đổi

β	0.2	0.3	0.4	0.5
$r = 4$	0.020089425	0.043768115	0.06859359	0.091022
$r = 3$	0.020106485	0.043827592	0.06869356	0.091114

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một mô hình chuỗi Markov 4-chiều để phân tích và đánh giá mô hình kết hợp của chuyển đổi bước sóng có giới hạn với định tuyến lệch hướng tại nút lõi OBS, xét với trường hợp nhiều cổng ra. Ứng với mô hình đề xuất, bài báo cũng cung cấp một thuật toán xây dựng ma trận chuyển trạng thái Q (theo mô hình Markov 4 chiều), từ đó tính các xác suất trạng thái cân bằng. Độ phức tạp theo thời gian của thuật toán tính được theo đa thức. Kết quả phân tích cũng như cài đặt thuật toán cho thấy tính đúng của mô hình và thuật toán mà chúng tôi đề xuất. Tuy nhiên, một vấn đề mà chúng tôi chưa thực sự xét đến trong bài báo đó là giá trị xác suất lệch hướng p trong thực tế. Giá trị p thay đổi theo trạng thái tại thời điểm đang xét của mạng và thường là không cố định. Hướng nghiên cứu tiếp theo của chúng tôi sẽ đề cập đến vấn đề này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Chen, C. Qiao, and X. Yu, Optical Burst switching: a new area in optical networking research, *IEEE Network* **18** (3) (2004) 16–23.
- [2] XU Yi, SHI Kai-yuan, FAN Ge, *Performance analysis of optical burst witching node with limited wavelength conversion capabilities*, Springer, (2009).
- [3] Hailong Li and Ian Li-Jin Thng, Performance analysis of a limited number of wavelength converters in an optical switching node, *IEEE Photonics Technology Letters* **17** (5) (May 2005).
- [4] Tien Van Do, Ram Chakka, An efficient method to compute the rate matrix for retrial queues with large number of servers, *Applied Mathematics Letters* **23** (2010) 638–643.
- [5] Hongyi Wu, Chunming Qiao, Modeling iCAR via multi-dimensional Markov chains, *Mobile Networks and Application* **8** (2003) 295–306.
- [6] Pedro Reviriego, Anna Maria Guidotti, Carla Raffaelli, Javier Aracil, Blocking of optical burst Switches with share wavelength converters: exact formulation and analytical approximations, *Photon Netw Commun*, Springer Science, 2008.
- [7] Md. Shamim Reza, Md. Maruf Hossain and Satya Prasad Majumder, Evaluation of Burst Loss Rate of an Optical Burst Switching (OBS) Network with Wavelength Conversion Capability, *Journal Of Telecommunications*, **2** (1) (APRIL 2010).

Nhận bài ngày 6 - 4 - 2011

Nhận lại sau sửa ngày 5 - 4 - 2012