

NAIST-IS-MT0251005

修士論文

光バーストスイッチングにおけるラウンドロビン型 バースト生成方式の提案と性能解析

安島 智也

2003年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

安島 智也

審査委員： 杉本 謙二 教授
西谷 紘一 教授
笠原 正治 助教授

光バーストスイッチングにおけるラウンドロビン型 バースト生成方式の提案と性能解析*

安島 智也

内容梗概

IP over WDM を実現するスイッチング技術の一つである光バーストスイッチングの新たなバースト生成方式として，目的地ごとに蓄積されたパケットからラウンドロビンに従ってバーストを生成し，スケジューラを介することで一定間隔でバーストを送信するラウンドロビン型バースト生成方式を提案する．提案手法の性能評価を行うために，一定間隔到着とポアソン到着を有する即時系待ち行列モデルを考え，待ち行列理論を用いてバースト棄却率とバーストスループットを導出する．数値例では，シミュレーション結果やアーラン呼損式による結果と比較し，理論解析と提案方式の有効性を示す．また，バーストスループットからパケットスループットを導出し，シミュレーション結果と比較することで，その有効性について議論する．

キーワード

光バーストスイッチング，バースト生成，ラウンドロビン，待ち行列理論，アーラン呼損式

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0251005, 2003年2月7日.

Round-Robin Burst Assembly for Optical Burst Switching and its Performance Evaluation*

Tomoya Ajima

Abstract

As a new technique of burst assembly for optical burst switching which is one of promising techniques for IP over WDM, we propose a round-robin burst assembly. In the proposed method, there are multiple buffers where IP packets are stored depending on their destination nodes, and bursts are assembled in round-robin fashion. Moreover, with our proposed method, bursts are transmitted at fixed intervals through a scheduler. To evaluate the performance of the proposed method, we construct a loss model with deterministic and Poisson arrivals, and derive burst loss probability and burst throughput with queueing theory. In numerical examples, we show the effectiveness of our analysis and the proposed method comparing our results with simulation and Erlang loss formula. Packet throughput is also derived from burst throughput and its accuracy is investigated by comparing the result with simulation.

Keywords:

Optical Burst Switching, Burst Assembly, Round-Robin, Queueing Theory, Erlang Loss Formula

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0251005, February 7, 2003.

目次

1. 序論	1
2. ラウンドロビン型バースト生成方式	4
3. 解析モデル	6
4. 理論解析	8
5. 数値例	14
5.1 バースト生成処理時間の影響	14
5.2 他ノードからのバースト到着の影響	16
5.3 波長数の影響	17
5.4 アクセス網からの到着率の影響	18
5.5 パケットスループット	20
6. 結論	21
謝辞	22
参考文献	23

目 次

1	ラウンドロビン型バースト生成方式	5
2	解析モデル	7
3	サンプルパス 1	8
4	状態遷移図	9
5	サンプルパス 2	11
6	バースト生成処理時間 T がバースト棄却率に与える影響, $W = 32, L = 5, \lambda = 1.0, \mu = 1.0$	15
7	バースト生成処理時間 T がバーストスループットに与える影響, $W = 32, L = 5, \lambda = 1.0, \mu = 1.0$	16
8	外部バースト到着率 λ_o がバースト棄却率に与える影響, アーラン呼損式との比較, $W = 32, L = 5, \lambda = 5.0, \mu = 1.0, T = 1000$	17
9	波長数 W がバースト棄却率に与える影響, アーラン呼損式との比較, $L = 5, \lambda = 10.0, \mu = 1.0, T = 1000, \lambda_o = 0.003$	18
10	アクセス網からの到着率がバースト棄却率に与える影響 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$	19
11	アクセス網からの到着率がバーストスループットに与える影響 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$	19
12	パケットスループットの解析結果とシミュレーションの比較 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$	21

表 目 次

1. 序論

近年，インターネットにおいて，音声・動画像転送の需要が急増し，それに伴いインターネットトラフィックが激増している．その結果，基幹網においては，より超高速大容量通信の必要性が高まってきた．そこで，この超高速大容量通信を実現するための技術として，1本の光ファイバに複数個の波長を多重化して通信する波長分割多重化 (WDM) 技術が発展してきた．ここで重要な問題として，インターネットの IP パケットをいかに WDM の複数個の波長に対応づけていくかという IP over WDM の問題がある [10, 18]．この対応づけの問題として検討されてきたスイッチング方式には，波長パススイッチング，光パケットスイッチングおよび光バーストスイッチングがある [5, 8]．

波長パススイッチングは波長パス単位にルーティングを行うコネクション型のスイッチング方式である．波長パススイッチングでは通信の開始時に送受信間で波長パスが設定され，通信が終了するとその波長パスは解放される．しかしながら，異なる波長パス間では同時に同じ波長を共有することができない．結果として，この方式では波長の利用効率が低く抑えられてしまう．

光パケットスイッチングは IP パケットを光領域で直接転送するスイッチング方式である．パケット単位で転送を行うので，波長の使用効率は高い．しかしながら，光パケットスイッチングを実現するために必要な光デバイス技術や光コンピューティング技術は現在研究開発段階であるが，実現の見通しが立っていない．

IP over WDM を実現するスイッチング方式として，近年，光バーストスイッチングが注目されている．光バーストスイッチングでは，複数の IP パケットで構成された可変長のバーストと，ルーティング情報などを持つ制御パケットによってデータ伝送が行われる [2, 4]．制御パケットは各中間ノードで光電気変換されて，経路設定などの波長予約処理を行う．一方，バーストは全ての間接ノードで光信号のまま転送される．

バースト送信時の経路設定のための波長予約方法として，Just-In-Time (JIT) と Just-Enough-Time (JET) がある [1, 5, 14]．JIT は波長予約に設定用と解放用の2種類の制御パケットを用意する．エッジノードはバーストの送信に先立ち，設定用制御パケットを送信する．この際，設定用制御パケットはバーストの長さ

に関する情報を持っていない．そして，全ての波長予約が成立したか否かの確認応答なしでバーストを送信する．最後に，通信が終了すると，波長を解放するための解放用制御パケットを送信する．

一方，JET は波長予約のための制御パケットを 1 種類しか持たない．この方式では，エッジノードから送信される波長予約用制御パケットにバーストの長さに関する情報を含めることによって，解放用制御パケットを省略している．JET は JIT に対して制御パケットの個数が半分で済むため，オーバーヘッドが大幅に改善される．また，バーストの到着時点からバーストの長さに相当する期間だけ波長が予約されることから，波長の予約期間に無駄がないという利点を有する [13]．

光バーストスイッチングネットワークのエッジノードには，目的ノードや QoS クラスごとにバッファが設けられており，伝送される IP パケットは対応するバッファ内に蓄積され [18]，一つのバッファに蓄積された複数の IP パケットから一つのバーストが生成される．バースト生成に関する過去の研究として，Threshold-Based バースト生成方式 [11]，Assured Horizon バースト生成方式 [3]，Generalized バースト生成方式 [12] などがある．

Threshold-Based バースト生成方式では，バーストを構成する IP パケットの数をしきい値によって決定することでバースト長を制御している．[11] では，すべてのバーストが最適なしきい値に従って生成されたときにパケット棄却率が最小になることが示されている．

Assured Horizon バースト生成方式では，バッファに最初の IP パケットが蓄積された時点でタイマーが始動し，タイマーの終了時にバーストが生成される．また，Generalized バースト生成方式では，異なる QoS クラスを持つ複数の IP パケットが優先クラスから降順に並べられて一つのバーストを生成する．

バースト送信時におけるスケジューリングには，さまざまなものが考えられる [12]．到着順方式においては，バーストは生成された順に処理される．優先権方式においては，バーストは自身より高い優先権を有するバーストがないときのみ処理される．重み付きラウンドロビン方式においては，各々の優先権バースト待ち行列はラウンドロビンに従って処理される．各待ち行列において一度に送信されるバーストの数は，予め決定されている重みにしたがって決定される．また，

待ち時間優先方式においては，バーストの優先権をその待ち時間の増加とともに増加させるようにする．

本稿では，新たなバースト生成方式として，目的ノードごとに設けたバッファに IP パケットを蓄積し，一定時間間隔のラウンドロビンに従って各バッファからバーストを生成するラウンドロビン型バースト生成方式を提案する．さらに，提案方式では，バースト送信のタイミングを制御するスケジューラを使用し，生成されたバーストを一定間隔で送信する．提案方式を用いることで，複数バッファにおけるバースト生成の制御を単純化し，一定間隔でバーストを送信することで，バースト棄却を抑制することが期待される．

本提案方式の性能評価を行うために，一定間隔到着とポアソン到着を有する即時系待ち行列モデルを構築し，待ち行列理論を用いた解析とシミュレーションによりバースト棄却率，バーストスループットおよびパケットスループットを導出する．数値例において，理論解析の妥当性を示し，さらに提案手法の有効性について検討する．

本論文は以下のように構成される．2 章において，提案するラウンドロビン型バースト生成方式の説明を行う．3 章で提案方式に対する解析モデルを示し，続く 4 章で解析により性能評価量を導出する．5 章において数値例を提示し，最後に結論を述べる．

2. ラウンドロビン型バースト生成方式

本稿で提案するラウンドロビン型バースト生成方式は、光バーストスイッチングネットワークのエッジノードに実装されることを前提とする。本提案方式で用いられるエッジノードは、図1に示されているように burstifier、スケジューラおよびスイッチで構成される。burstifier には目的ノードに応じて複数のバッファが設けられており、アクセス網から送られてくる IP パケットは目的ノードに従って特定のバッファに蓄積される。バーストは各バッファに蓄積された複数の IP パケットから生成され、ラウンドロビンに従ってバースト生成処理が行われる。各バッファのバースト生成処理時間は一定時間 T と仮定する。このとき、 L 個のバッファを持つ burstifier ではラウンドロビンの周期は LT となる。したがって、各バッファでは LT 間に蓄積された IP パケットからバーストが生成される。

burstifier で生成されたバーストは一旦スケジューラに送られ、スケジューラはバーストが一定間隔 T で送信されるように制御パケットを伝送する。このとき、スケジューラでは各バーストのオフセットタイムを考慮してスケジューリングが行われる。

一定間隔で送信されたバーストは出力波長にスイッチングされ、光バーストスイッチングネットワークに伝送される。出力波長は他ノードから送られてきたバーストも利用するため、同一の波長を利用するバーストが同時に到着すると一つのバーストだけが送信され、それ以外のバーストは棄却される。

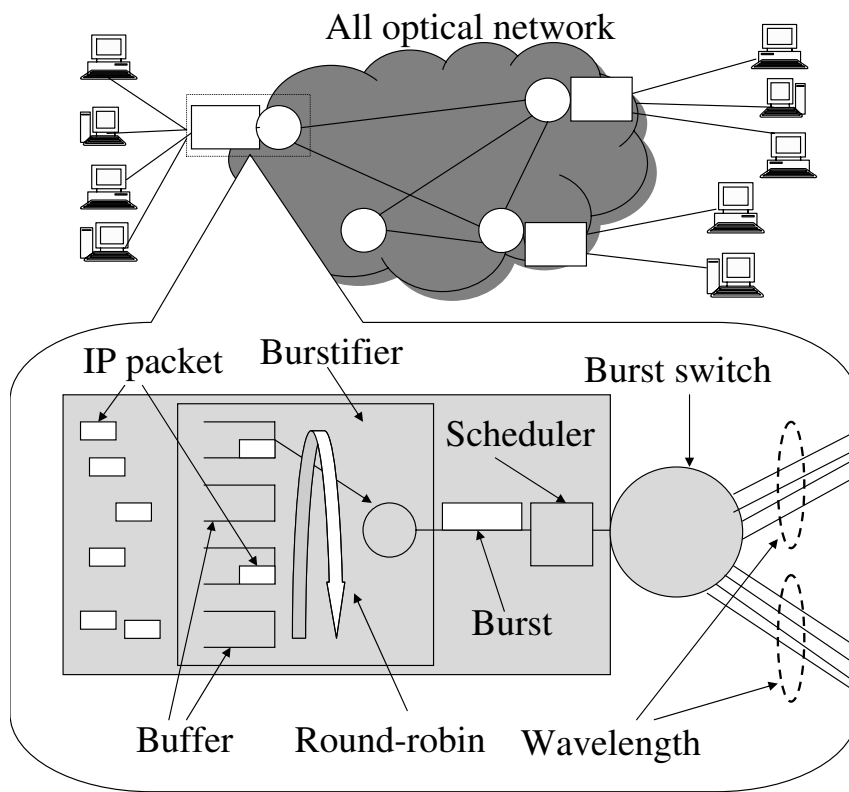


図 1 ラウンドロビン型バースト生成方式

3. 解析モデル

ラウンドロビン型バースト生成方式に従ってバーストを生成するエッジノードに注目する．エッジノードの burstifier には L 個のバッファが設けられており，IP パケットが蓄積される．

今，アクセス網から，IP パケットが率 λ でポアソン到着し，その 1 個の伝送処理時間は平均 $1/\mu$ と仮定する．エッジノードに到着した IP パケットの目的ノードは等確率で選ばれる．すなわち各バッファに等確率で振り分けられるものと仮定する．このとき，各バッファに対して IP パケットは率 λ/L でポアソン到着する．各バッファのバースト生成処理時間は一定で T とし，すべてのバッファは周期 LT のラウンドロビンに従って処理される．バースト生成処理が開始されるバッファには周期 LT 間に到着した IP パケットが蓄積されており，これらのパケットから 1 個のバーストが生成される．以下では，生成されるバーストの伝送処理時間は，率 $\mu/(\lambda T)$ の指数分布に従うものと仮定する．

生成されたバーストはスケジューラに送られ，制御パケットの送信タイミングを調整することでスケジューリングされた後，一定間隔 T で出力波長に送信される．出力波長は W 本で，出力波長には他のノードから送信されたバーストも率 λ_0 でポアソン到着し，その伝送処理時間は，エッジノードで生成されたバースト同様，率 $\mu/(\lambda T)$ の指数分布に従う．

以上の仮定により，対象システムは図 2 のような 2 種類の到着流を持つ $D, M/M/W/W$ 待ち行列となる．

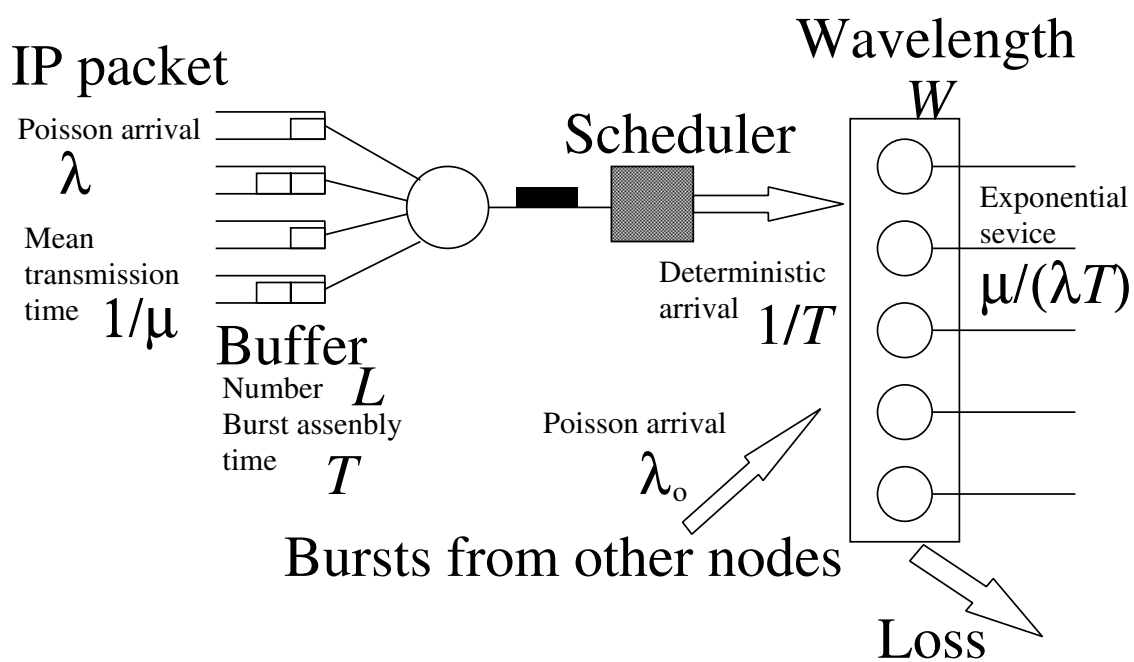


図 2 解析モデル

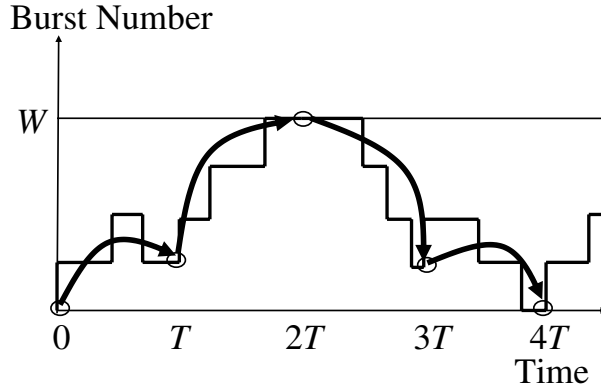


図 3 サンプルパス 1

4. 理論解析

以下では、定常状態での光バーストスイッチにおけるバースト棄却率、バーストスループットおよびパケットスループットを導出する。

最初に、一定間隔で到着するバーストが観察する状態 (図 3 の白丸) を考える。時刻 t でのシステム内バースト数を $N(t)$ とする。簡単のため、時刻 0 で一定到着バーストの到着が発生したと仮定する。このとき、 $N(0) = 1$ となる。

スケジューラから n 番目に出力されたバーストの到着直前のシステム内バースト数を $N_n^- = N(nT^-)$ ($n = 0, 1, \dots$) とする。このとき、他ノードから送られてくる外部バーストのポアソン到着および指数サービスの仮定より、 $\{N_n^- : n = 0, 1, \dots\}$ は離散時間マルコフ連鎖を形成する。その定常状態確率を $\{q_k : k = 0, \dots, W\}$ とおくと、 q_k はつぎのように定義される。

$$q_k = \lim_{n \rightarrow \infty} Pr\{N_n^- = k\}, \quad 0 \leq k \leq W. \quad (1)$$

q_k の遷移確率を導出するため、 N_n^- と N_{n+1}^- の間に起こる状態遷移に注目すると、外部ノードからのポアソン到着と指数サービス完了によるバースト離脱の 2 種類

I を用いて上式を解くと、時刻 t における状態遷移確率行列 $H(t)$ は

$$\mathbf{H}(t) = e^{\mathbf{Q}t}, \quad (4)$$

で与えられる。

n 番目と $n+1$ 番目の観察点の時間間隔は一定で T である。また、到着したバーストがシステムに受け付けられた場合はシステム内バースト数が 1 増加し、棄却された場合はシステム内バースト数に変化がないことに注意すると、 n 番目の観察点直後の状態は $\min(N_n^- + 1, W)$ で与えられる。よって、 q_k の遷移確率は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} U_{ij} &\equiv \Pr\{N_{n+1}^- = j | N_n^- = i\}, \\ &= \begin{cases} [\mathbf{H}(T)]_{i+1,j}, & 0 \leq i \leq W-1, 0 \leq j \leq W, \\ [\mathbf{H}(T)]_{W,j}, & i = W, 0 \leq j \leq W. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$U = [U_{ij}]$, $\mathbf{q} = (q_0, \dots, q_W)$, $\mathbf{e} = (1, \dots, 1)^T$ とすると、 \mathbf{q} は平衡状態方程式 $\mathbf{q} = \mathbf{q}U$ および確率保存式 $\mathbf{q}\mathbf{e} = 1$ より得られる。これより、一定到着バーストの棄却率は q_W で与えられる。

次に

$$p_k = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{N(t) = k\}, \quad (6)$$

で定義される任意時点での定常状態確率 $\{p_k : k = 0, \dots, W\}$ の導出を行う。今、一定到着が発生する時点に着目し、 $[nT, (n+1)T)$ を n 番目のサイクルと定義する。モデルの仮定より、図 5 に示すように、システム内バースト数過程はサイクルに関して独立・同一である。これより、任意時点での定常状態確率は、1 サイクル期間におけるシステム内バースト数の時間平均に等しくなることが分かる。すなわち

$$\begin{aligned} p_k &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t \mathbf{1}\{N(t) = k\} dt \\ &= \frac{1}{T} E\left[\int_0^{T-} \mathbf{1}\{N(t) = k\} dt\right], \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで $\mathbf{1}\{X\}$ は事象 X の指示関数である。以下では 1 サイクル期間におけるシステム内バースト数の時間平均を考える。

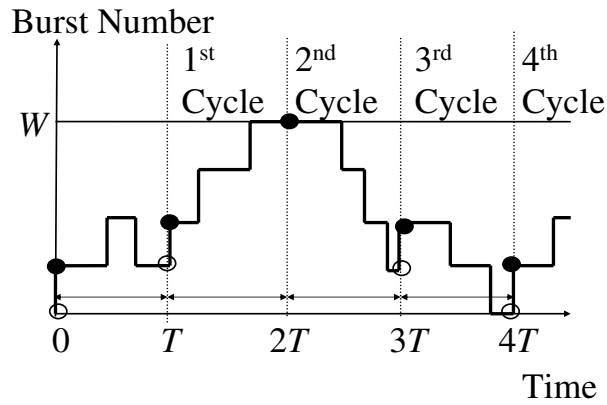


図 5 サンプルパス 2

ここでサイクルの初期状態 (図 5 の黒丸) を考える．サイクルの初期状態確率 $\{r_k : k = 0, \dots, W\}$ は，到着したバーストがシステムに受け付けられた場合はシステム内バーストが 1 増加し，棄却された場合はシステム内バースト数に変化がないことから，システム内バースト数の定常状態確率 q_k を用いて，次式で与えられる．

$$r_i = \begin{cases} 0, & i = 0, \\ q_{i-1}, & 0 < i < W, \\ q_{W-1} + q_W, & i = W. \end{cases} \quad (8)$$

ここで， $\mathbf{p} = (p_0, \dots, p_W)$ ， $\mathbf{r} = (r_0, \dots, r_W)$ とおく．初期状態確率が \mathbf{r} のとき，時刻 t での状態確率は，M/M/W/W の無限小生成作用素 Q を用いて， $\mathbf{r}e^{Qt}$ と表

現できる．よって， p はサイクル間の状態確率の推移を考えて，次のようになる．

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{1}{T} r \int_0^{T^-} e^{Qt} dt \\
 &= \frac{1}{T} r \int_0^T e^{Qt} dt \quad (e^{Qt} \text{ の連続性より}) \\
 &= \frac{1}{T} r \int_0^T \sum_{k=0}^{\infty} \frac{Q^k}{k!} t^k dt \\
 &= \frac{1}{T} r \sum_{k=0}^{\infty} \frac{Q^k}{k!} \cdot \frac{T^{k+1}}{k+1} \\
 &= \frac{1}{T} r \sum_{k=0}^{\infty} \frac{Q^k T^{k+1}}{(k+1)!}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

M/M/W/W の定常状態確率ベクトル π を考える． π は $\pi Q = 0, \pi e = 1$ を満たす．ここで，行列 $e\pi - Q$ を考える．この行列にはつぎの性質がある． $e\pi - Q$ の左から π をかけると，次式を得る．

$$\begin{aligned}
 \pi(e\pi - Q) &= \pi - \pi Q \quad (\pi e = 1 \text{ より}) \\
 &= \pi. \quad (\pi Q = 0 \text{ より})
 \end{aligned} \tag{10}$$

また， $e\pi - Q$ の列に着目して，要素の大きさを比較すると，それぞれの列でつねに対角要素の絶対値が最大となる．したがって，列に関して線形独立となるので， $e\pi - Q$ は正則行列となり，逆行列が存在する [7]．また

$$Q(e\pi - Q) = -Q^2, \quad (Qe = 0 \text{ より}) \tag{11}$$

が成立するので，次の式が成立する．

$$Q = Q^2(Q - e\pi)^{-1}. \tag{12}$$

よって, (9) 式は

$$\begin{aligned}
p &= \frac{1}{T} \mathbf{r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mathbf{Q}^k T^{k+1}}{(k+1)!} \\
&= \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T^{k+1}}{(k+1)!} \mathbf{Q}^k \right\} \\
&= \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T^{k+1}}{(k+1)!} \mathbf{Q}^{k-1} \cdot \mathbf{Q} \right\} \\
&= \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T^{k+1}}{(k+1)!} \mathbf{Q}^{k-1} \cdot \mathbf{Q}^2 (\mathbf{Q} - \mathbf{e}\pi)^{-1} \right\} \\
&= \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mathbf{Q}T)^{k+1}}{(k+1)!} (\mathbf{Q} - \mathbf{e}\pi)^{-1} \right\} \\
&= \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + (e^{\mathbf{Q}T} - \mathbf{I} - \mathbf{Q}T)(\mathbf{Q} - \mathbf{e}\pi)^{-1} \right\}
\end{aligned} \tag{13}$$

となり, 最終的に p は次式で与えられる.

$$p = \frac{1}{T} \mathbf{r} \left\{ \mathbf{I}T + (e^{\mathbf{Q}T} - \mathbf{I} - \mathbf{Q}T)(\mathbf{Q} - \mathbf{e}\pi)^{-1} \right\}. \tag{14}$$

外部バーストは, ポアソン到着するものと仮定しているので, PASTA の性質から, 外部バーストの棄却率は p_W で与えられる [15]. サイクル期間 T 内で生成されるバースト数と外部バーストの到着数の比に着目すると, バースト棄却率 P_{loss} は,

$$P_{loss} = \frac{(1/T)q_W + \lambda_o p_W}{(1/T) + \lambda_o} = \frac{q_W + \lambda_o T p_W}{1 + \lambda_o T}, \tag{15}$$

で与えられる. また, 単位時間当たりのバースト伝送数を表すバーストスループットは次式のように, それぞれのスループットの和で与えられる.

$$Thr_{burst} = \frac{1 - q_W}{T} + \lambda_o (1 - p_W). \tag{16}$$

各バッファに対して IP パケットは率 λ/L でポアソン到着し, すべてのバッファの周期は LT であることから, 1 個のバーストには IP パケットが平均 $\lambda/L \times LT = \lambda T$ 個含まれていると考えられる. したがって, パケットスループット Thr_{packet} は次式で与えられる.

$$\begin{aligned}
Thr_{packet} &= Thr_{burst} \times \lambda T \\
&= \lambda \{1 - q_W + \lambda_o T (1 - q_W)\}.
\end{aligned} \tag{17}$$

5. 数値例

現在，WDM ネットワークにおける波長のデータ伝送速度として，2,10 および 40Gbps が代表的であるが，本数値例では，波長の伝送速度を 10Gbps とする．また，アクセス網から到着するパケットの長さを 1250 バイトとする．このとき 1 パケットの伝送時間は，つぎのように計算される．

$$\frac{1250[\text{byte}] \times 8[\text{bit}/\text{byte}]}{10 [\text{Gbps}]} = 1[\mu\text{s}] \quad (18)$$

以下では，パケット 1 個の平均伝送時間 $1/\mu$ を $1[\mu\text{s}]$ と定める．

バースト棄却率およびバーストスループットについてのシミュレーションは，解析モデルと同様に D,M/M/W/W について実行される．すなわち，生成されたバーストはシステムに到着間隔 T で一定到着し，他ノードからの外部バーストは率 λ_0 のポアソン到着をし，それぞれのバーストは率 $\mu/(\lambda T)$ の指数分布に従うサービスを受ける．波長数は W で，波長を占有できないバーストは棄却される即時システムである．

一方で，パケットスループットのシミュレーションにおいては，1 個のバーストは IP パケットが周期 LT の間に率 λ/L のポアソン過程で到着した結果の個数から構成される．1 個の IP パケットのサービス時間は，大きさが一定の場合と指数分布により変化する場合を考え，それぞれを Simulation D と Simulation M と呼ぶ．

5.1 バースト生成処理時間の影響

最初に，バースト生成処理時間 T がバースト棄却率とバーストスループットに与える影響について検討する．以下では， $W = 32, L = 5, \lambda = 1.0, \mu = 1.0$ とし， λ_0 はシステム利用率 $\rho = \lambda(1 + \lambda_0 T)/(W\mu)$ が常に一定になるように設定される．

図 6 と図 7 はそれぞれ，システム利用率 $\rho = 0.5, 0.75, 1.0$ のときのバースト棄却率とバーストスループットの変化を示している．この 2 つの図には理論解析とシミュレーション結果が示されていて， T と ρ の値に関わらず解析結果とシミュレーション結果がほぼ一致していることがわかる．それゆえ，本稿における理論

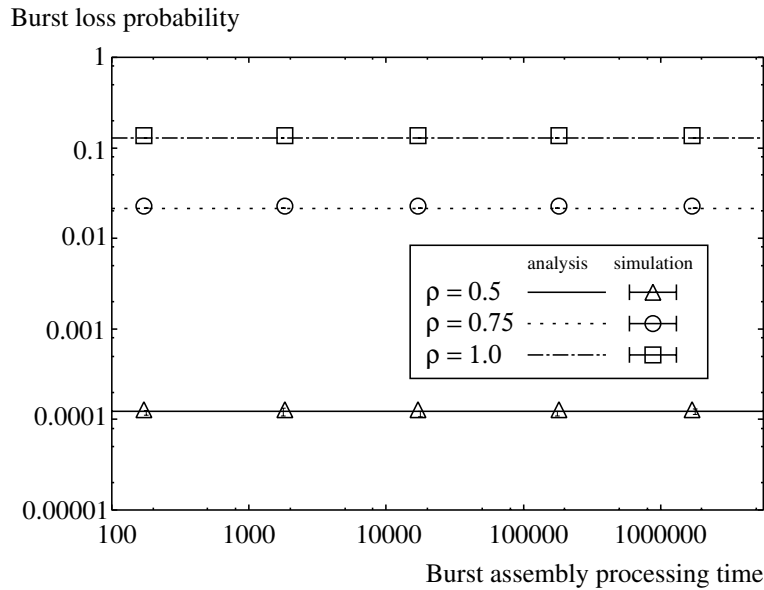


図 6 バースト生成処理時間 T がバースト棄却率に与える影響 , $W = 32, L = 5, \lambda = 1.0, \mu = 1.0$

解析は妥当であるといえる .

図 6 から , バースト生成処理時間 T が変化してもバースト棄却率が一定であることが観察される . これは , T が増加するにつれて生成されるバースト長は大きくなると同時に , バーストの送信間隔も大きくなるからである . 従って , 提案方式におけるバースト生成処理時間 T はシステム利用率 ρ が一定の下ではバースト棄却率に影響を与えない . しかしながら , ρ が減少すると , 棄却率は減少する .

一方 , 図 7 から , T が増加するに従ってバーストスループットが小さくなることがわかる . これは , T が増加するにつれてバーストの送信間隔が大きくなるためであり , バーストの伝送遅延が増加していることを意味している . また , システム利用率 ρ が減少するとスループットも減少するが , T と比較するとその影響は少ないといえる .

以上のことから , システムの負荷が一定の下では , バースト生成処理時間 T を大きくしてもバースト棄却率は変化しないが , バーストの伝送遅延が大きくなりスループットが減少する .

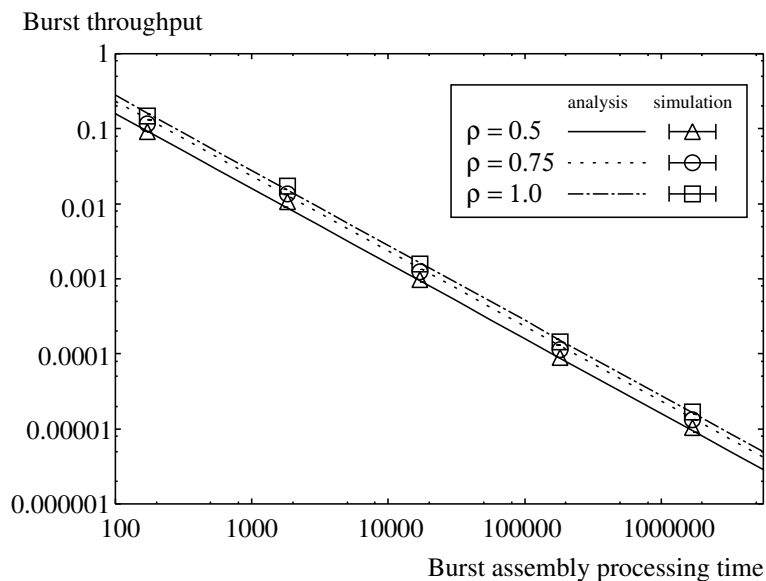


図7 バースト生成処理時間 T がバーストスループットに与える影響, $W = 32, L = 5, \lambda = 1.0, \mu = 1.0$

5.2 他ノードからのバースト到着の影響

次に, 他ノードから到着するバーストが提案方式の性能に与える影響について考える. また, 提案方式の比較対象として, エッジノードで生成されたバーストがスケジューラから指数分布間隔で送信される方式を考える. たとえば, バーストが生成されると直ちに送信される [2] などは, この方式に従う. この方式におけるバースト棄却率はアラン呼損式から得られる.

図8は, $W = 32, L = 5, \lambda = 5.0, \mu = 1.0, T = 1000$ のときに, 他ノードからのバースト到着率 λ_o がバースト棄却率に与える影響を示している. この図に示された理論解析結果は λ_o の値によらずシミュレーション結果とほぼ一致していることから, 理論解析が有効であることがわかる.

図8から, λ_o が増加するにつれて提案方式のバースト棄却率が増加していることがわかる. これは, 波長を利用しようとするバーストが増加するためである.

2つの方式の比較から, λ_o が小さいときには提案方式の方がより小さいバースト棄却率を示すことがわかる. これは, 一定間隔でバーストを送信するスケジュー

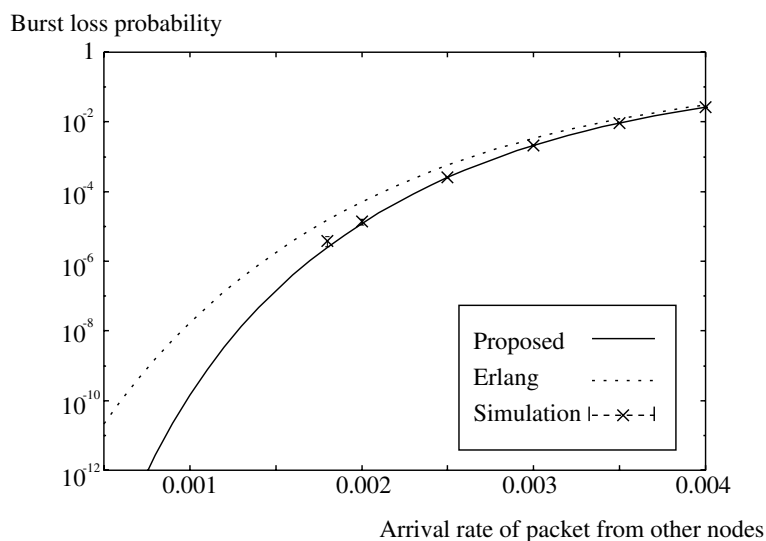


図 8 外部バースト到着率 λ_o がバースト棄却率に与える影響，アーラン呼損式との比較， $W = 32, L = 5, \lambda = 5.0, \mu = 1.0, T = 1000$

ラの有効性を表しており，外部からのバースト到着が少ないときには提案方式が有効であることがわかる．しかしながら， λ_o が増加するにつれて提案方式とアーラン呼損式から得られる棄却率との差が小さくなり， $\lambda_o = 0.004$ でほぼ一致する．

5.3 波長数の影響

ここでは，波長数 W がバースト棄却率に与える影響について検討する．以下では， $L = 5, \lambda = 10.0, \mu = 1.0, \lambda_o = 0.003$ とし， $T = 1000$ とする．

図 9 では，提案方式の理論解析とアーラン呼損式から得られたバースト棄却率を示している．この図から，波長数が増加するにつれて，両方のバースト棄却率がともに減少することが観察される．しかしながら，提案手法のバースト棄却率の方がアーラン呼損式から得られたバースト棄却率よりも減少していることがわかる．

前節と本節をまとめると，提案方式は波長数が多くバースト棄却率が低いネットワークで有効であるといえる．

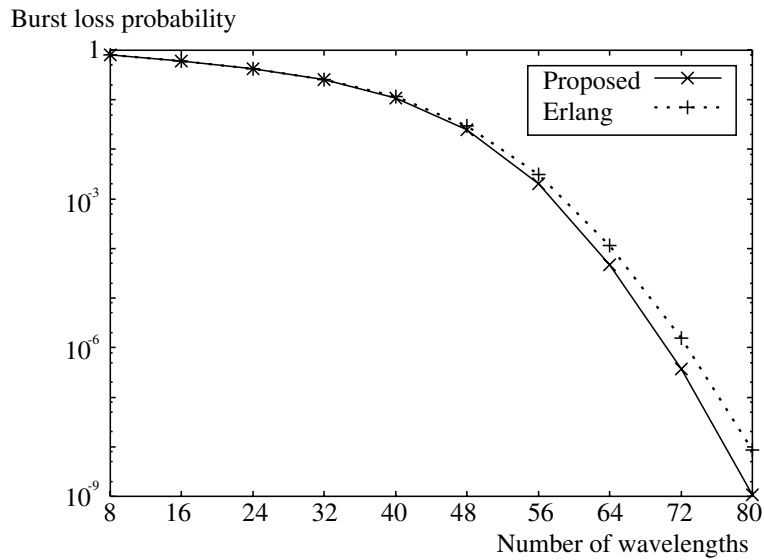


図 9 波長数 W がバースト棄却率に与える影響，アーラン呼損式との比較， $L = 5, \lambda = 10.0, \mu = 1.0, T = 1000, \lambda_o = 0.003$

5.4 アクセス網からの到着率の影響

つぎに，アクセス網からの IP パケットの到着率 λ に対するバースト棄却率とバーストスループットの解析に基づく数値計算結果を，それぞれ，図 10 と 11 に示す．図 10 はバースト棄却率を，図 11 はバーストスループットを示している． λ が増加すると生成されるバーストの大きさが増加して，ネットワーク負荷が増大する．したがって， λ の増加によりバースト棄却率が増加する．また， λ_o の増加によっても，バースト棄却率が増加することも観察される．さらに，図 11 から，IP パケットの到着率 λ が小さく，バースト棄却率が低いときは，外部からの到着率が高いほど，バーストスループットが高くなるが， λ の増加に伴い棄却率が高くなるにつれて，外部からの到着率 λ_o にかかわらず，一定の割合で減少していくことがわかる．これは λ の増加によりトラヒック負荷が増大していくためである．

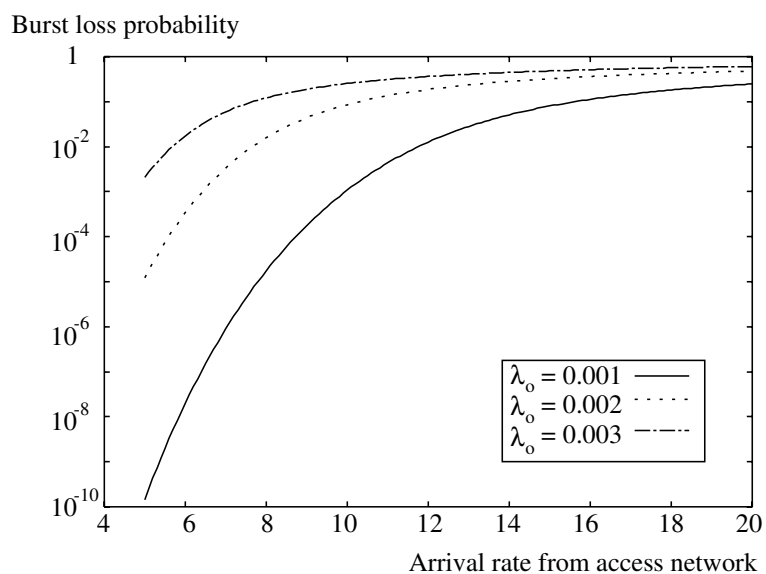


図 10 アクセス網からの到着率がバースト棄却率に与える影響 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$

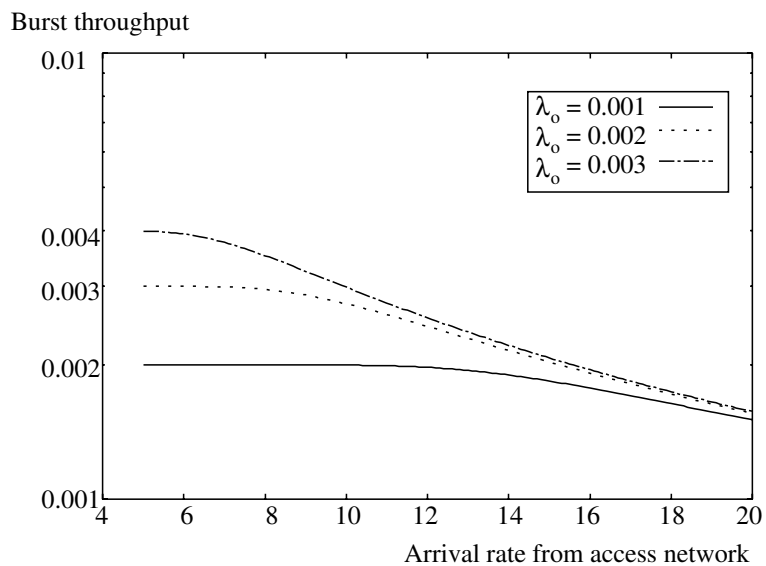


図 11 アクセス網からの到着率がバーストスループットに与える影響 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$

5.5 パケットスループット

最後に、アクセス網からの IP パケットの到着率がパケットスループットに与える影響の解析結果とシミュレーション結果を図 12 に示す。解析結果 Analysis はバーストスループット Thr_{burst} に 1 個当たりの平均パケット数 λT を乗じたものである。一方、シミュレーション結果 Simulation D は前述のごとく、すべての IP パケットが率 μ という一定値でサービスされるとした場合を表し、シミュレーション結果 Simulation M は、各 IP パケットのサービスが率 μ の指数分布に従う場合を表す。

アクセス網からの IP パケットの到着率が高くなるほど、解析値およびシミュレーション結果ともにパケットスループットが高くなり、最終的に $W\mu = 32.0$ に収束する。また、IP パケットの到着率が高くなるほど、解析値とシミュレーション結果との差異が若干大きくなっている。これは、 λT の値が大きくなるほど、バーストに含まれる IP パケット数のばらつきが大きくなるためと考えられる。しかしながら、解析値がシミュレーション結果と比較して安全側となっており、かつ差が小さいため、本解析は設計の際においても有効と考えられる。

また、Simulation D と Simulation M とでは、値に差異が見られないことが観察される。したがって、提案方式は IP パケットの大きさの分布に依存せずに、その平均のみでパケット棄却率およびパケットスループットが決まるものと予想される。

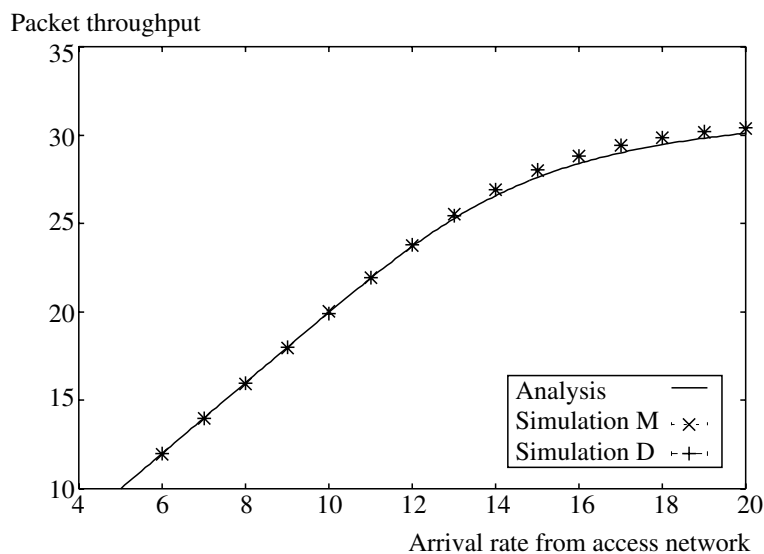


図 12 パケットスループットの解析結果とシミュレーションの比較 $W = 32, L = 5, \mu = 1.0, T = 1000$

6. 結論

本稿では，ラウンドロビン方式に従ってバーストを生成し，スケジューラによって一定間隔でバーストを送信するラウンドロビン型バースト生成方式を提案した．性能評価では， $D, M/M/W/W$ 待ち行列モデルを構築し，理論解析によってバースト棄却率，バーストスループットおよびパケットスループットを導出した．数値例において，ラウンドロビン方式によるバースト生成処理時間は一定負荷の下ではバースト棄却率に影響を与えないが，バースト生成処理時間を大きくするとバーストスループットの低下，すなわち遅延が増大することを示した．さらに，指数分布間隔でバーストを送出する方式との比較から，提案方式は波長数が多く他ノードからのバースト到着が少ないネットワークで有効であることが示された．最後に，パケットスループットの解析値については，シミュレーション結果の下限になっていることから，設計の際に有効であることが示された．

謝辞

本研究の遂行にあたって多くの方々のご指導ならびにご協力を得ることができました。以下にそのの方々へ感謝の意を表します。

杉本謙二教授には、定例研究会や発表練習会など、日頃から多大なるご指導をいただきました。心より感謝いたします。

西谷紘一教授には、副審査委員としまして、ゼミナールおよび審査会で、多大なるご指導をいただきました。心より感謝いたします。

笠原正治助教授には、日頃、研究の細部にわたり、多大なるご指導をいただきました。心より感謝いたします。

また、応用システム科学講座助手の安達直世氏には、日頃、ネットワーク技術につきまして、ご指導をいただきました。心より感謝いたします。

また、応用システム科学講座助手の佐藤淳氏には、日頃、数値計算技術等につきまして、ご指導をいただきました。心より感謝いたします。

また、応用システム科学講座博士後期課程在籍の橋拓至氏には、日頃、研究内容につきまして、多くのご助言をいただきました。心より感謝いたします。

また、応用システム科学講座の皆様には、日頃の研究活動で、さまざまなご協力をいただきました。心より感謝いたします。

また、特許庁特許審査第一部調整課において、留学の担当官であった佐藤匡氏および現担当官の藤井眞吾氏には、本学で学ぶにあたり様々な事務手続きのため多大なご尽力をいただきました。心より感謝いたします。

また、特許庁審査第四部部長、首席審査長、上席審査長およびインターフェイス審査長をはじめインターフェイスの皆様には、日頃の業務にもかかわらず、こうして奈良先端科学技術大学院大学での研究活動に専念させていただきました。心より感謝いたします。

最後に、留学中、無事に生まれて無事に育ってくれた息子和輝と、息子の世話で忙しいのに研究生活を一生懸命支えてくれた妻由香に、心より感謝いたします。

参考文献

- [1] I. Baldine, H. G. Perros, G. N. Rouskas, and D. Stevenson, “JumpStart: A Just-in-Time Signaling Architecture for WDM Burst-Switched Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 82-89, Feb. 2002.
- [2] A. Detti, and M. Listanti, “Impact of Segments Aggregation on TCP Reno Flows in Optical Burst Switching Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2002*, New York, NY, June 2002.
- [3] K. Dolzer, “Assured Horizon – A New Combined Framework for Burst Assembly and Reservation in Optical Burst Switched Networks,” in *Proc. 7th European Conference on Networks & Optical Communications*, Darmstadt, Germany, June 2002.
- [4] A. Ge, F. Callegati, and L. S. Tamil, “On Optical Burst Switching and Self-Similar Traffic,” *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 98-100, Mar. 2000.
- [5] C. F. Hsu, T. L. Liu, and N. F. Huang, “Performance Analysis of Deflection Routing in Optical Burst-Switched Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM 2002*, New York, NY, June 2002.
- [6] L. Kleinrock, *Queueing Systems, Volume I: Theory*. New York: Willey, 1975.
- [7] D. Lucantoni, K. S. Meier-Hellstern, and M. F. Neuts, “A Single Server Queue with Server Vacations and a Class of Non-renewal Arrival Processes,” *Adv. Appl. Probab.*, vol. 22, pp. 676-705, 1990.
- [8] C. Qiao, and M. Yoo, “Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching,” *Optical Networking Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 36-44, Apr. 2000.
- [9] C. Qiao, “Labeled Optical Burst Switching for IP-over-WDM Integration,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, no. 9, pp. 104-114, Sept. 2000.

- [10] R. Ramaswami, and K. N. Sivarajan, *Optical Networks: a Practical Perspective, Second Edition*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [11] V. M. Vokkarane, K. Haridoss, and J. P. Jue, "Threshold-Based Burst Assembly Policies for Qos Support in Optical Burst-Switched Networks," in *Proc. Optical Networking and Communication Conference 2002*, Boston, MA, July 2002.
- [12] V. M. Vokkarane, Q. Zhang, J. P. Jue, and B. Chen, "Generalized Burst Assembly and Scheduling Techniques for Qos Support in Optical Burst-Switched Networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2002*, Taipei, Taiwan, Nov. 2002.
- [13] H. L. Vu, and M. Zukerman, "Blocking Probability for Priority Classes in Optical Burst Switching Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 214-216, May 2002.
- [14] J. White, M. Zukerman, and H. L. Vu, "A Framework for Optical Burst Switching Network Design," *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 268-270, June 2002.
- [15] R. W. Wolff, *Stochastic Modeling and the Theory of Queues*. Prentice Hall, 1989.
- [16] L. Xu, H. G. Perros, and George Rouskas, "Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 1, pp. 136-142, Jan. 2001.
- [17] M. Yoo, C. Qiao, and S. Dixit, "Optical Burst Switching for Service Differentiation in the Next-Generation Optical Internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, No. 2, pp. 98-104, Feb. 2001.
- [18] M. Yoo, C. Qiao, and S. Dixit, "Qos Performance of Optical Burst Switching

in IP-over-WDM Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 10, pp. 2062-2071, Oct. 2000.