

フォトニックネットワークにおける高速データ転送のための
波長割当方式の性能解析荒川 伸一[†] 宮本健太郎[†] 村田 正幸[†] 宮原 秀夫[†]Performance Analysis of Wavelength Assignment Method
for High-Speed Data Transfer in Photonic NetworksShin'ichi ARAKAWA[†], Kentaro MIYAMOTO[†], Masayuki MURATA[†], and Hideo
MIYAHARA[†]

あらまし WDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術を適用したデータ通信方式として、データ発生時にコネクション設定を高速に行い、波長割当を行った後に高速にデータ転送を行う方式が考えられる。しかし、回線容量が大きくなると、リンクの伝搬遅延時間の影響が相対的に増大し、無視できなくなる。そこで、本論文では、コネクション設定に必要な伝搬遅延時間を考慮したフォトニックネットワークにおけるコネクション設定方式を対象とした近似解析手法を示す。設定方式として、送信側から順に波長割当を行うフォワード型と、逆に受信側から波長割当を行うバックワード型を対象とする。近似解析では、回線交換ネットワークにおいて利用される *Reduced Load Approximation* 方式を拡張し、性能指標としてデータ転送要求のブロッキング率を導出する。この性能指標をシミュレーション結果と比較を行うことで近似解析の妥当性を示す。次にその性能指標を基に設定方式間の性能比較を行い、さらに、それらの設定方式に対する伝搬遅延時間の性能への影響を明らかにしている。

キーワード フォトニックネットワーク、データ転送、波長分割多重、波長予約、近似解析

1. はじめに

WDM 技術の高速データ通信への適用形態として、データ発生時に波長を割当て、コネクション設定を高速に行い、その後にデータ転送を行う方式が考えられている [1] ~ [3]。しかし、1 波長あたりの伝送容量が増大すると、データ転送時間は短くなるため、リンクの伝搬遅延時間が相対的に増加し、その影響を無視できなくなる。ところが、これまでの多くの研究では伝搬遅延時間が無視されてきた [4] ~ [6]。

リンクの伝搬遅延時間を考慮した研究として文献 [1], [7] がある。文献 [1] では、コネクション設定時における波長の予約時間、予約する波長数の違

い、および中間ノードにおける制御信号のためのバッファの有無などの違いに基づいて、いくつかのコネクション設定方式が提案されている。それらのひとつに、コネクション設定に用いる波長を送信側、または、受信側から予約するコネクション設定方式 (それぞれ、フォワード方式、バックワード方式) があり、それらの比較評価がシミュレーションによって行われている。その結果、文献 [1] では、波長の予約時間を短くすることで性能が向上する傾向が示され、フォワード型のコネクション設定方式よりもバックワード型のコネクション設定方式の性能が良いことが示されている。

文献 [3] では、伝搬遅延時間を考慮した光交換ネットワークの近似解析手法が提案され、フォワード型に対する解析のみが示されているが、本論文では、バックワード型のコネクション設定方式に対してその近似解析手法を示す。また、文献 [1] では、到着率及び波長数に対する評価しか示されていないが、本論文では、解析結果に基づいて重要

[†] 大阪大学大学院 基礎工学研究科 情報数理系専攻, 豊中市
Department of Informatics and Mathematical Science,
Graduate School of Engineering Science, Osaka University,
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, 560-8531
Japan

なパラメータであるリンクの伝搬遅延時間の影響についても示す。

本論文では、フォワード型のコネクション設定方式 (*Reservation-along-the-Forward-Path*、以降、RFP 方式)、バックワード型のコネクション設定方式 (*Reservation-along-the-Backward-Path*、以降 RBP 方式)、さらにバックワード型の改良版 (*Reservation-along-the-Backward-Path-with-Dropping*、以降 RBPD 方式) の 3 種類のコネクション設定方式を導入し、それぞれに対して近似解析解を与えるとともに、3 方式を比較検討する。

以下に本論文の構成を示す。まず 2.において、本論文で扱う 3 種類のコネクション設定方式を述べる。次に、3.で近似解析のモデル化、及び、近似解析解の導出方法を述べる。4.で性能指標としてブロッキング率の導出を行う。さらに 5.では解析に基づく数値例、および、その妥当性検証のためのシミュレーション結果を示し、また、各コネクション設定方式の比較を行う。最後の 6.で結論と今後の課題を述べる。

2. コネクション設定方式

本章では、比較評価の対象とする 3 種類のコネクション設定方式を述べる。詳細は以下の各節に述べるが、基本的な違いは以下ようになる。まず、RFP 方式は送信ノードから受信ノードに向かって各リンクで波長を予約していくフォワード型のコネクション設定方式である (図 1(a)参照)。一方、RBP 方式はバックワード型のコネクション設定方式であり、送信ノードから受信ノードへ向かう時は各リンクの波長の利用状況を調べるのみで、それに基づいて受信ノードから送信ノードに向かって各リンクの波長を予約していく。また、RBPD 方式は、RBP 方式に基づくものであるが、RBP 方式では波長予約に失敗した場合は送信ノードに到着してから波長解放信号を送出する (図 1(b)) のに対して、RBPD 方式では、波長の予約に失敗した時点で途中ノードが解放信号を下流にも送信する点が異なる (図 1(c))。本論文で対象とするコネクション設定方式では、同時に予約する波長はただ一つであり、各リンクにおいて波長変換は行わないものとする。波長変換を行う設定方式も考えられるが、波長変換機能をノードに実装する

のは依然として高価であるため、本論文では対象外としている。そのため各コネクション設定方式では、各リンクにおいて共通の同一の波長を一つだけ要求することになる。以下、各設定方式を詳しく述べていく。

2.1 RFP 方式

(1) 送信ノードの動作

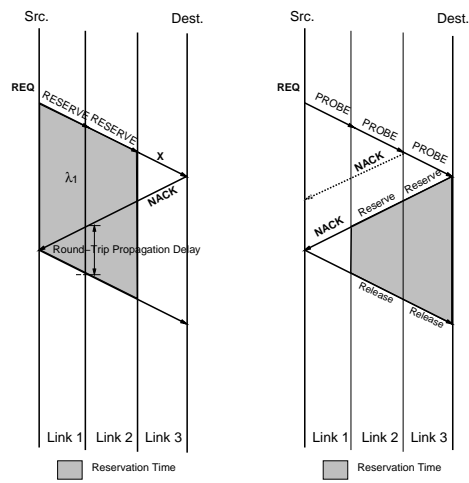
- (S1) 端末から設定要求を受取ると、送信ノードに接続されているリンクの波長の利用状況を調べ、空いている波長を候補波長とする。候補波長の中から 1 波長をランダムに選び、それを予約波長として RES (予約) 信号に書き込む。次のリンクにおいて、選んだ波長を予約するとともに次のノードに送出する。
- (S2) 中間 (受信) ノードから ACK 信号を受取ると、端末へコネクション設定が完了したことを知らせる。
- (S3) NACK 信号を受取ると、端末へコネクションが失敗したことを知らせるとともに、予約波長が書き込まれた REL (解放) 信号を受信端末に送出する。
- (S4) データ転送が終わると最初のリンクで予約された波長を解放するとともに予約波長が書き込まれた REL 信号を受信端末へ送出する。

(2) 中間ノードの動作

- (I1) RES 信号を受取ると、RES 信号に書き込まれた予約波長の集合と次のリンクでの空き波長の集合の積集合をとる。予約波長の集合が空集合でない場合は 次のリンクにおいて予約波長を予約するとともに次のノードへ RES 信号を送出する。それ以外の場合は予約波長を空集合として、次のリンクへ RES 信号を送出する。
- (I2) NACK 信号、あるいは、ACK 信号を受取ると、それらをそのまま次のノードへ送出する。
- (I3) REL 信号を受取ると、次のリンクの予約波長を解放し、次のノードへ REL 信号を送出する。

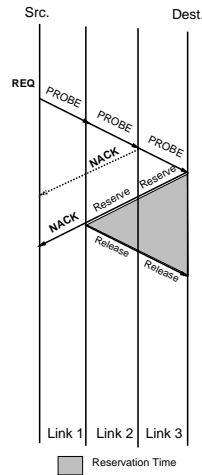
(3) 受信ノードの動作

- (R1) RES 信号を受取ると、RES 信号中の予約波長を調べ、空集合の場合は NACK 信号



(a) RFP 方式の動作例

(b) RBP 方式の動作例



(c) RBPD 方式の動作例

図 1 コネクション設定方式 (ブロッキングとなる場合)

を送信ノードへ送出する。空集合以外の場合は ACK 信号を送信ノードへ送出する。

2.2 RBP/RBPD 方式

(1) 送信ノードの動作

- (S1) 端末から設定要求を受取ると PROBE (予備的検査) 信号を生成し、最初のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、次のノードへ送出する。

- (S2) 中間 (受信) ノードから RES 信号を受取ると、端末へコネクション設定が完了したことを知らせる。
- (S3) NACK 信号を受取ると (予約波長が空集合の場合) 端末へコネクション設定が失敗したことを知らせる。
- (S4) NACK 信号を受取ると (予約波長が空集合以外の場合)、端末へコネクションが失敗したことを知らせるとともに、予約波長が書き込まれた REL 信号を受信端末に送出する。
- (S5) データ転送が終わると最初のリンクで予約された波長解放するとともに予約波長が書き込まれた REL 信号を受信端末へ送出する。

(2) 中間ノードの動作

- (I1) PROBE 信号を受取ると次のリンクでの空き波長の集合と、PROBE 信号中の候補波長の集合の積集合をとる。候補波長が空集合になれば、送信ノードへ NACK 信号を送出する。それ以外の場合は次のノードへ PROBE 信号を送出する。
- (I2) RES 信号を受取ると RES 信号中の予約波長の集合と次のリンクの空き波長の集合の積集合をとる。予約波長が空集合でない場合は RES 信号を次のノードへ送出する。予約波長が空集合である場合、RBP 方式では NACK 信号を送信ノードに向けて送出する。また、RBPD 方式では NACK 信号を送信ノードに向けて送出すると共に、直前のリンクの予約波長を解放し、REL 信号を受信ノードに向けて送出する。
- (I3) NACK 信号を受取ると、そのまま次のノードへ送出する。
- (I4) REL 信号を受取ると、次のリンクの予約波長を解放し、次のノードへ REL 信号を送出する。

(3) 受信ノードの動作

- (R1) PROBE 信号を受取ると、PROBE 信号中の空き波長を調べ 1 波長をランダム選び予約波長とする。次に、受信ノードにつながった、ノード間の最後のリンクでその予約波長が空いているかを調べる。空いてい

ない場合は予約波長を空集合とし、NACK 信号を送信ノードへ送出する。空いている場合には予約波長を予約し、RES 信号を送信ノードへ送出する。

3. 解析モデル

3.1 記号の導入

まず、以下の記号を導入する。

- (1) ネットワークポロジは与えられるものとし、そのリンク数を J とする。
- (2) 各リンクの波長数はすべて等しく W とし、順に $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W$ と表わす。
- (3) エンドノードの組 a に対するコネクション設定要求は到着率 e_a のポアソン過程に従い、コネクション設定に成功した場合、その継続時間は平均 $1/\mu_a$ の指数分布に従う。
- (4) エンドノードの組 a に対して、コネクション設定要求が発生すると、予め定められた経路 R_a でのみその設定の可否が調べられる。経路 R_a 上のリンク集合を上流リンクから順に a_1, a_2, \dots, a_{h_a} とする。ただし、 h_a を経路 R_a のホップ数とする。
- (5) $m_w^{(j)}$ をリンク j の波長 λ_w において使われていない波長の数とする。すなわち、すでにコネクションが設定されている、または、設定のために予約されている場合 $m_w^{(j)} = 0$ 、そうでない場合 $m_w^{(j)} = 1$ である。ネットワークの状態は

$$\mathbf{m} = (m_{11}, \dots, m_{J1}, \dots, m_{1W}, \dots, m_{JW})$$

で表される。

- (6) コネクション設定の可否判断をするために、制御用の回線が各リンクに一つ別に用意されている。設定要求が発生すると、送信側から受信側に制御信号が送られる。
- (7) リンク j の往復伝播遅延時間を $D^{(j)}$ とする。記述の簡単化のため、本論文では、これらはすべてのリンクで等しく、 $D^{(j)} \equiv D$ とする。
- (8) ノードでの制御のための処理遅延は 0 とする。

3.2 解析のあらまし

定常状態においてリンク j の波長 λ_w に対して $X_w^{(j)}$ を利用可能な波長数とし、その確率を

$$q_w^{(j)}(m_w^{(j)}) = P(X_w^{(j)} = m_w^{(j)}), \quad m_w^{(j)} = 0, 1$$

とする。ネットワーク全体では、

$$q(\mathbf{m}) = \prod_{j=1}^J \prod_{w=1}^W q_w^{(j)}(m_w^{(j)})$$

となる。ただし、本論文で扱うコネクション設定方式では、波長をランダムに選択するので、すべてのリンクにおいて定常状態確率は等しく、

$$q_1^{(j)}(m) = q_2^{(j)}(m) = \dots = q_W^{(j)}(m)$$

となる。以降では記述を簡単にするために、

- $q^{(j)}(0)$: 波長が予約、または実際にデータが転送されている状態
- $q^{(j)}(1)$: 利用可能な状態

とする。リンク j の各波長へのコネクション設定要求は、 $X_w^{(j)} = 1$ の時、到着率 $\Lambda^{(j)}$ のポアソン過程に従うとする。一つのコネクション設定要求に対して、各リンクの波長が使用または予約されている時間（以降、リンク使用時間）は、コネクションが設定される場合（予約時間とデータ転送時間）および、コネクション設定のために予約されるがコネクションが設定されない場合（予約時間のみ）でその分布が異なる。従って、本論文では、リンク使用時間の分布は一般分布に従うとし、その平均を $1/T^{(j)}$ とする。この場合、リンク j の各波長の定常状態確率は M/G/1/1 待ち行列を利用して導出することができ、

$$q^{(j)}(0) + q^{(j)}(1) = 1, \quad \Lambda^{(j)} q^{(j)}(1) = T^{(j)} q^{(j)}(0)$$

となる。すなわち、

$$\begin{aligned} q^{(j)}(0) &= \frac{\Lambda^{(j)}}{\Lambda^{(j)} + T^{(j)}}, \\ q^{(j)}(1) &= \frac{T^{(j)}}{\Lambda^{(j)} + T^{(j)}} \end{aligned} \quad (1)$$

が近似的に与えられる。

以上より、 $\Lambda^{(j)}, T^{(j)}$ を導出すれば、各波長の各状態に対する定常状態確率を求めることができる。その導出のために、本論文では文献 [3] と同様に、回線交換ネットワークにおいて一般的に利用される Reduced Load Approximation 方式 [8] を用いる。その結果、エンドノードの組 a に対するブロッキング率 L_a を求めることができる。以下にその手法をまとめる。詳細は以下の各節において順次述べていく。

- (i) すべてのコネクション $\{a\}$ に対して、ブロッキング率 $L_a = 0$ と初期化し、 $q^{(j)}(1) = 1$ 、 $q^{(j)}(0) = 0$ とする。
- (ii) 波長への到着率 $\Lambda^{(j)}$ ($j = 1, \dots, J$) を求める。
- (iii) リンク使用時間 $T^{(j)}$ ($j = 1, \dots, J$) を求める。
- (iv) すべてのリンク上の波長における定常状態確率 $\{q(m)\}$ を式 (1) を用いて求める。
- (v) すべてのエンドノード間の組 $\{a\}$ に対してブロッキング率 L_a を計算する。もし新たに求めた L_a が収束すれば、反復を終了し、次のステップへ。そうでない場合、ステップ (ii) へ戻り、次の反復を開始する。本論文では、収束条件が 10^{-6} の結果を示す。

3.3 $\Lambda^{(j)}$ 、 $T^{(j)}$ の導出

まず、あるコネクション a に着目する。コネクション a の i 番目のリンクに到着するコネクション設定要求の到着率を $\gamma^{(a_i)}$ とし、次に示すようなクラス 1、2 に分ける。

- クラス 1: エンドノード間のすべてのリンクで同一波長が空いているため受付られるコネクション設定要求

- クラス 2: いったん予約されるものの、以降のリンクの同一波長がすでに使用され受付られないために解放されるコネクション設定要求

クラス 1、2 に対する到着率をそれぞれ $\alpha^{(a_i)}$ 、 $\beta^{(a_i)}$ とする。すなわち、

$$\gamma^{(a_i)} = \alpha^{(a_i)} + \beta^{(a_i)} \quad (2)$$

となる。また、RES 信号が通過してから、REL 信号が通過するまでにかかる時間をクラス 1、2 それぞれ $s^{(a_i)}$ 、 $t^{(a_i)}$ とする。以下、RFP 方式ではリンク $a_{h_1}, a_{h_2}, \dots, a_{h_a}$ の順に、また RBP/RBP 方式ではリンク $a_{h_a}, a_{h_a-1}, \dots, a_1$ の順に $\gamma^{(a_i)}$ 、 $\alpha^{(a_i)}$ 、 $\beta^{(a_i)}$ 、 $s^{(a_i)}$ 、 $t^{(a_i)}$ を導出する。

3.3.1 $\gamma^{(a_i)}$ の導出

RFP 方式

まず送信ノードにつながったリンクの到着率を求める。

送信ノードにつながったリンク a_1 において、ある波長が空いている確率は

$$q^{(a_1)}(1)$$

である。 σ_a を送信ノードにおいて、波長予約の要求の到着率とする。波長予約の要求は、 a_1 において、一波長以上空きがある時に発生するので、

$$\sigma_a = e_a \left(1 - (1 - q^{(a_1)}(1))^W\right)$$

となる。RFP 方式では送信ノードにおいて、リンク a_1 における空き波長の集合からランダムに一つ選択すると仮定しているので、リンク a_1 における一波長あたりの RES 信号の到着率は、

$$\gamma^{(a_1)} = \sigma_a \cdot \sigma_{select}$$

で与えられる。ここで σ_{select} は、ある波長が空いている場合にその波長が選択される確率であり、送信ノードに波長予約要求が生じた時の空き波長数の期待値の逆数となる。

$$\begin{aligned} (\sigma_{select})^{-1} &= \sum_{k=0}^{W-1} (k+1) \cdot \binom{W-1}{k} \\ &\quad \times (q^{(a_1)}(1))^k \\ &\quad \times (1 - q^{(a_1)}(1))^{(W-k-1)} \end{aligned}$$

また、RFP 方式の場合、送信ノードにつながっているリンク a_1 において空いている波長を選ぶ。一旦波長が選ばれると、リンク a_1 上ではコネクション設定要求がブロックされることなくリンク a_2 に到着する。そのため、リンク a_1 のある波長へのコネクション設定要求の到着率とリンク a_2 のそれは等しくなる。

すなわち、 $i = 2$ の場合、

$$\gamma^{(a_i)} = \gamma^{(a_{i-1})}$$

となる。

$i \geq 3$ の場合、

$$\gamma^{(a_i)} = \gamma^{(a_{i-1})} q^{(a_{i-1})}(1)$$

RES 信号が成功するのは、すべてのリンクに別コネクションの RES 信号が到着していないときであるので、

$$\alpha^{(a_i)} = \gamma^{(a_i)} \prod_{j=i+1}^{h_a} q^{(a_j)}(1)$$

さらに式 (2) より、

$$\beta^{(a_i)} = \gamma^{(a_i)} - \alpha^{(a_i)}$$

となる ($i \geq 1$)、

RBP/RBPD 方式

送信ノードから受信ノードまでの全てのリンクにおいて、ある波長が空いている確率は

$$\prod_{i=1}^{h_a} q^{(a_i)}(1)$$

である。 σ'_a を受信ノードに到着する PROBE 信号の到着率とすると、

$$\sigma'_a = e_a \left(1 - \left(1 - \prod_{i=1}^{h_a} q^{(a_i)}(1) \right)^W \right)$$

となる。RBP/RBPD 方式では受信ノードにおいて、空き波長の中からランダムに一つ選択すると仮定しているので、リンク a_{h_a} における一波長あたりの RES 信号の到着率は、

$$\gamma^{(a_{h_a})} = \sigma'_a \cdot \sigma'_{select}$$

で与えられる。ここで σ'_{select} は、ある波長が空いている場合にその波長が選択される確率であり、受信ノードに PROBE 信号が届いた時の空き波長数の期待値の逆数となる。

$$\begin{aligned} (\sigma'_{select})^{-1} &= \sum_{k=0}^{W-1} (k+1) \cdot \binom{W-1}{k} \\ &\quad \times \left(\prod_{i=1}^{h_a} q^{(a_i)}(1) \right)^{(k)} \\ &\quad \times \left(1 - \prod_{i=1}^{h_a} q^{(a_i)}(1) \right)^{(W-k-1)} \end{aligned}$$

また、RES 信号が成功するのは、すべてのリンクに別コネクシオンの RES 信号が到着していないときである。そのため、RBP/RBPD 方式において、PROBE 信号が通過してから、RES 信号が再び戻って来るまでの時間に、他の RES 信号が到着しない確率を求めれば、RES 信号が受理される確率になる。本論文では各リンクのある波長への到着過程はポアソンに従うと仮定しているため、その確率は指数関数を用いて導出でき、

$$\begin{aligned} \alpha^{(a_{h_a})} &= \gamma^{(a_{h_a})} \prod_{k=1}^{h_a-1} [e^{-\Lambda^{(a_k)}(h_a-k+\frac{1}{2}) \cdot D}] \\ \beta^{(a_{h_a})} &= \gamma^{(a_{h_a})} - \alpha^{(a_{h_a})} \end{aligned}$$

6

となる。同様にリンク a_i ($1 \leq i \leq h_a - 1$) においては、

$$\begin{aligned} \gamma^{(a_i)} &= \gamma^{(a_{i+1})} e^{-\Lambda^{(a_{i+1})}(h_a-(i+1)+\frac{1}{2})D} \\ \alpha^{(a_i)} &= \gamma^{(a_i)} \prod_{k=1}^{i-1} [e^{-\Lambda^{(a_k)}(h_a-k+\frac{1}{2}) \cdot D}] \\ \beta^{(a_i)} &= \gamma^{(a_i)} - \alpha^{(a_i)} \end{aligned}$$

3.3.2 サービス時間

次にリンク a_i における仮想的なサービス時間を求める。

RFP 方式の場合

$$s^{(a_i)} = h_a \cdot D + \frac{1}{\mu_a}; \quad t^{(a_i)} = h_a \cdot D$$

RBP 方式の場合

$$s^{(a_i)} = iD - \frac{D}{2} + \frac{1}{\mu_a}; \quad t^{(a_i)} = iD - \frac{D}{2}$$

RBPD 方式の場合

$$s^{(a_i)} = iD - \frac{D}{2} + \frac{1}{\mu_a}; \quad t^{(a_i)} = N_{a_i} \cdot D$$

ここで、 N_{a_i} はリンク a_i の波長 λ_w が空いていて、かつ、送信ノードまでに波長 λ_w が空いていない場合における、NACK 信号が発生するまでに調べられるリンク数の期待値であり、文献 [3] より、

$$N_{a_i} = \sum_{n=1}^{i-1} n \frac{\prod_{k=1}^{n-1} \chi_{a_{i-k}}(1) \cdot \chi_{a_{i-n}}(0)}{\sum_{m=1}^{i-1} \prod_{k=1}^{m-1} \chi_{a_{i-k}}(1) \cdot \chi_{a_{i-m}}(0)}$$

$$\chi_{a_j}(1) = e^{-\Lambda^{(a_j)}(h_a-j+\frac{1}{2})D}$$

$$\chi_{a_j}(0) = 1 - \chi_{a_j}(1)$$

で与えられる。以上をもとに各リンクでの $\Lambda^{(j)}$ と $T^{(j)}$ を求める。

$$\Lambda^{(j)} = \sum_{a_i=j} \gamma^{(a_i)}$$

$$\frac{1}{T^{(j)}} = \frac{\sum_{a_i=j} (\alpha^{(a_i)} s^{(a_i)} + \beta^{(a_i)} t^{(a_i)})}{\sum_{a_i=j} \gamma^{(a_i)}}$$

4. 性能指標の導出

本節では、性能指標としてデータ転送要求が受け付けられない確率（ブロッキング率）を導出する **RFP 方式の場合**

RFP 方式において、送信ノードでは送信ノードに接続したリンク上の各波長の利用状況を調べ、空き波長を候補波長とする。

この場合、全ての波長が既に使われており、そのため候補波長が空集合となり、波長予約を行うことなくブロッキングとなる確率 $S_{fwd}^{(a)}$ は、

$$S_{fwd}^{(a)} = \left(1 - q^{(a_1)}(1)\right)^W \quad (3)$$

次に、波長予約を行うものの、経路上の各リンクにおいて共通の同一の波長を予約できずにブロッキングとなる確率を求めます。これは、RFP 方式において、もう一つのブロッキングになる事象である。RFP 方式において、ノードペア a で一波長以上候補波長が残る確率は、式 (3) より、

$$1 - S_{fwd}^{(a)} \quad (4)$$

また、送信ノードから RES 信号を送った時に、下流のリンクにおいて同一の波長予約に失敗し、ブロッキングになる確率は、

$$1 - \prod_{i=2}^{h_a} q^{(a_i)}(1) \quad (5)$$

となる。式 (4) と式 (5) より、ノードペア a で一波長以上候補波長が残る、一旦波長を予約するものの、経路上の各リンクにおいて共通の同一波長を予約できずにブロッキングになる確率は、

$$\left(1 - S_{fwd}^{(a)}\right) \cdot \left(1 - \prod_{i=2}^{h_a} q^{(a_i)}(1)\right) \quad (6)$$

となる。

RFP 方式におけるブロッキング率は、式 (3) と式 (6) の和となり、以下の式で表される。

$$L_a = S_{fwd}^{(a)} + \left(1 - S_{fwd}^{(a)}\right) \cdot \left(1 - \prod_{i=2}^{h_a} q^{(a_i)}(1)\right)$$

RBP/RBPD 方式の場合

RBP と RBPD 方式の違いはリンクの予約時間の相違のみで、ブロッキング率の導出に対しては変

わらない。送信端末から受信端末へ向けて送信した PROBE 信号が受信端末に届く前に NACK 信号となって返ってくる確率 $S_{bwd}^{(a)}$ は、

$$S_{bwd}^{(a)} = \left(1 - \prod_{i=1}^{h_a} q^{(a_i)}(1)\right)^W \quad (7)$$

となる。

次に、受信ノードから予約を開始した後に、波長が予約出来ない確率を求めます。RBP/RBPD 方式において、ノードペア a で一波長以上候補波長が残る確率は、すなわち受信ノードに PROBE 信号が届く確率は、式 (7) より、

$$1 - S_{bwd}^{(a)} \quad (8)$$

となる。各リンクのある波長への到着過程はポアソンに従うと仮定しているため、受信ノードから送信ノードに RES 信号を送るものの、上流リンクの波長予約に失敗して、ブロッキングとなる確率は、

$$1 - \prod_{k=1}^{h_a} \left[e^{-\Lambda^{(a_k)}(h_a - k + \frac{1}{2}) \cdot D} \right] \quad (9)$$

となる。

式 (8) と式 (9) より、ノードペア a で一波長以上候補波長が残る、一旦波長を予約するものの、経路上の各リンクにおいて共通の同一波長を予約できずにブロッキングになる確率は、

$$\left(1 - S_{bwd}^{(a)}\right) \times \left(1 - \prod_{k=1}^{h_a} \left[e^{-\Lambda^{(a_k)}(h_a - k + \frac{1}{2}) \cdot D} \right] \right) \quad (10)$$

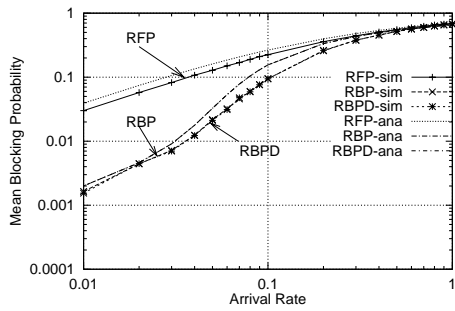
RBP/RBPD 方式においてブロッキング率は、式 (7) と式 (10) の和で与えられ、

$$L_a = S_{bwd}^{(a)} + \left[\left(1 - S_{bwd}^{(a)}\right) \times \left(1 - \prod_{k=1}^{h_a} \left[e^{-\Lambda^{(a_k)}(h_a - k + \frac{1}{2}) \cdot D} \right] \right) \right]$$

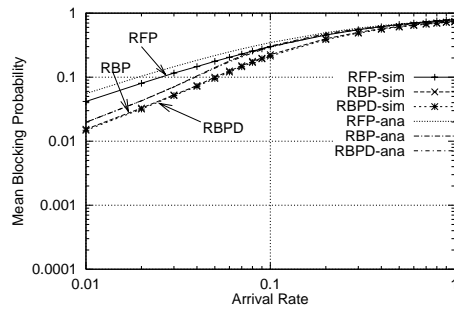
となる。

RFP/RBP/RBPD 方式いずれの場合も、すべてのエンドノード間のブロッキング率の平均は以下の式で与えられる。

$$\bar{L} = \sum_a e_a L_a / \sum_a e_a \quad (11)$$



(a) 波長数 $W=5$, データ転送時間 $1/\mu=1$, 伝搬遅延 $D=0.02$ の場合



(b) 波長数 $W=5$, データ転送時間 $1/\mu=1$, 伝搬遅延 $D=0.2$ の場合

図3 平均ブロッキング率の比較

5. 数値例

本章では、フォワード型のRFP方式、バックワード型のRBP方式、RBDP方式の3種類のコネクション設定方式の比較評価を行う。ネットワークモデルには図2に示されているような、16ノードメッシュトラスネットワークを用いる。エンドノード間のコネクション設定要求の到着率はすべて等しく e とし、また、平均データ転送時間も等しく $1/\mu$ とする。各コネクションの経路は、最短経路が1経路用意されているとする。本論文では、性能指標として式(11)で与えられる、すべてのエンドノード間のブロッキング率の平均を用いる。図3(a)に波長数 $W=5$ 、データ転送時間 $1/\mu=1$ 、ノード間伝搬遅延時間 $D=0.02$ とした場合、図3(b)に伝搬遅延時間を $D=0.2$ とした場合の、RFP/RBP/RBDP方式のブロッキング率の解析結果とシミュレーション結果をそれぞれ示す。RFP/RBP/RBDP方式のシミュレーション結果は、図中シンボルを用いて示している。平均ブロッキング率に対する解析結果を見ると、誤差

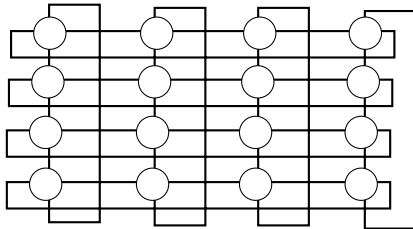


図2 ネットワークモデル

はあるものの、安全側に見積もられており、概ね一致しているといえる。

図3(b)、図3(a)ともにRFP方式に比べRBP/RBDP方式の方がブロッキング率はかなり小さいことがわかる。ただし、リンクの伝搬遅延時間が大きくなると、RFP方式とRBP/RBDP方式の差は小さくなる。また、RBP方式に対して、下流に対しても波長予約を解放する信号を送出するRBDP方式の効果はほとんどないことも示されている。

なお、図3(a)では、到着率0.03付近において曲線の傾きが変わっているが、これは以下の理由による。バックワード型のコネクション設定方式においてブロッキングとなるのは、受信ノードに到着する前に空き波長がなくなる場合(2.2章(I1)参照)と、受信ノードから予約を開始した後に、波長が予約できない場合(2.2章(I2)参照)である。前

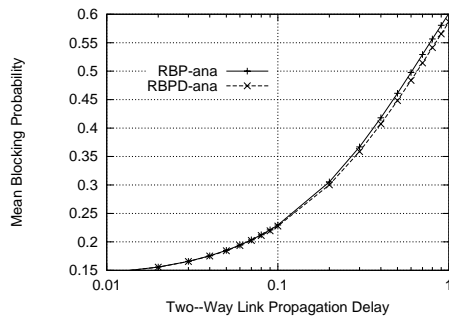


図4 伝搬遅延時間に対する平均ブロッキング率：波長数 $W=5$, データ転送時間 $1/\mu=1$, 到着率 $e=0.1$ 。

者は波長すべてが空いていない場合に起こるため、急激にブロッキング率は小さくなる。一方、後者は1波長が空いていない場合に起こり、急激に小さくなるようなことはない。図3(a)において、到着率0.03付近において曲線の傾きが変わっているが、到着率がそれより小さくなると後者によるブロッキングが優位を占めるようになるからである。一方、図3(b)の場合にはそのような現象は現れていない。この場合、もともと1波長が空いていない確率が高い。これは、リンクの伝搬遅延時間が大きくなると、送信ノードから受信ノードに信号を送った時に調べた波長の利用状況が、大きく変化してしまうからである。

[9]では、RBP/RBPD方式間の相違についても述べている。[9]では、到着率をパラメータとした場合の結果が記されており、その結果、到着率が高くなるにつれRBP/RBPD方式間の差が開いていることが述べられている。本論文では、さらに、伝搬遅延時間をパラメータとして、方式間の性能比較を行う。図4に波長数 $W = 5$ 、データ転送時間 $1/\mu = 1$ 、到着率 $e = 0.1$ と固定し、リンクの往復伝搬遅延時間 D を変化させた場合の平均ブロッキング率を示す。これらの値は解析によって得られたものである。図4を見ると、伝搬遅延時間が大きくなるにつれRBP/RBPD方式間の差は大きくなるのがわかる。これは、リンクの伝搬遅延時間が大きくなると、リンクを使用している時間が大きくなり、その間に到着するコネクション設定要求の数が多くなる。その結果RBP方式ではよりブロッキングになり易くなるため、同じバックワード型の設定方式であるRBPD方式との間に性能差が現れてくる。

6. ま と め

本論文では、コネクション設定方式の性能評価のための近似解析手法を示した。また、近似解析結果を用いて、RFP/RBP/RBPD方式のコネクション設定方式の性能比較を行った。その結果、RFP方式に比べRBP/RBPD方式の方がブロッキング性能が向上することがわかった。一方、同じバックワード型のRBP方式とRBPD方式に関しては、到着率が高く、さらにリンクの伝搬遅延時間がデータ転送時間に対して比較的大きい時には、設定方式間で性能差が現れる。しかし、到着率、も

しくはリンクの伝搬遅延時間が比較的小さい時には、大幅な向上は見られないことがわかった。また、本論文ではデータ転送要求の発生に対するブロッキング率を示した。しかし、データ転送要求がブロックされた場合、ある時間において再送要求を行うのがより現実的である。今後は、再送要求のバックオフを考慮した場合の近似解析、および、方式比較を行っていく予定である。

文 献

- [1] X. Yuan, R. Gupta, and R. Melhem, "Distributed control in optical WDM networks," available at <http://www.cse.buffalo.edu/~qiao/journal.ps.gz>.
- [2] 宮本, 原井, 村田, 宮原, "光交換ネットワークにおけるコネクション設定方式の検討," 信学技報 (SSE97-163), pp. 1-6, Feb 1998.
- [3] 原井 洋明, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "コネクション設定のための伝搬遅延時間を考慮した光交換ネットワークの性能解析," 信学技報 (SSE97-164), pp. 7-12, Feb 1998.
- [4] 原井 洋明, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "光交換ネットワークにおけるルーチング方式の性能評価," 信学論 (B-I), vol. J80-B-I, pp. 74-86, Feb 1997.
- [5] I. Chlamtac *et al.*, "Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN's," *IEEE Transactions on Commun.*, vol. 40, pp. 1171-1182, July 1992.
- [6] M. Kovačević *et al.*, "Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks," *IEEE J. Select. Areas in Commun.*, vol. 14, pp. 868-880, June 1996.
- [7] A. Sengupta *et al.*, "On an adaptive algorithm for routing in all-optical networks," *SPIE All-Optical Communication Systems*, pp. 288-299, Nov 1997.
- [8] A. Girard, *Routing and Dimensioning in Circuit-Switched Networks*. Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [9] 荒川, 宮本, 村田, 宮原, "フォトニックネットワークにおける高速データ転送のための波長割当方式の性能解析," 信学技報 (SSE98-165), pp. 1-6, December 1998.

(平成×年×月×日受付)

荒川 伸一

平10 阪大・基礎工・情報退学。現在、同大大学院修士課程 在学中。光交換ネットワークにおける性能評価に

関する研究に従事。

宮本健太郎

平 9 阪大・基礎工・情報卒。平 11 同大大学院修士課程了。現在、日本アイ・ピー・エム(株)勤務。

村田 正幸 (正員)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒。昭 59 同大大学院修士課程了。同年日本アイ・ピー・エム(株)入社。同社東京基礎研究所を経て、昭 62 阪大・大型計算機センター・助手。平 1 阪大・基礎工・助手。平 3 同講師。平 4 同助教授。平 11 同教授。待ち行列理論、システム性能評価、高速ネットワークアーキテクチャなどの研究に従事。工博。IEEE、ACM、Internet Society 各会員。

宮原 秀夫 (正員)

昭 42 阪大・工・通信卒。昭 47 同大大学院博士課程了。昭 48 京大・工・助手。昭 57 阪大・基礎工・助教授。昭 62 阪大・大型計算機センター・教授。平 1 阪大・基礎工・情報・教授。平 7 阪大・大型計算機センター・センター長併任。昭 58 - 昭 59 米国 IBM トーマスワトソン研究所客員研究員。システム性能評価、マルチメディアシステム、広帯域通信網、ネットワーク管理に関する研究に従事。工博。平 3 本学会論文賞。IEEE、情報処理学会各会員。