

上流優先スイッチングと分散公平性制御を用いた光バースト交換リングネットワーク

荒川 豊[†] 山中 直明[†] 笹瀬 巖[†]

Optical Burst Switched Ring Network with Upstream Prioritized Switching and Distributed Fairness Control

Yutaka ARAKAWA[†], Naoaki YAMANAKA[†], and Iwao SASASE[†]

あらまし 本論文では、バースト性の高いトラフィックを柔軟に扱うことができるメトロポリタンネットワークの構築を目的とし、上流優先スイッチングと分散公平性制御を用いた光バースト交換リングネットワークを提案する。一方予約を用いる光バースト交換では、中間ノードにおける高いバースト棄却率が問題となる。提案方式では、上流優先スイッチングを用いることにより、中継ノードにおけるバースト信号の棄却をなくす。同時に、分散公平性制御により上流優先スイッチングの問題点である、あて先から遠い送信ノードほど高い優先度となる位置優先度による不公平を解決する。さらに、送信中断後にトレーラパケットにより下流ノードの予約を変更することで、無駄な帯域を減らしスループットを改善する。計算機シミュレーションにより、スループットおよびスループットに関する公平性を評価し、提案アーキテクチャがある特定のあて先に対してトラフィックが集中するホットスポットトラフィック下においても良好な特性を示すことを示す。

キーワード 光バースト交換, リングネットワーク, 上流優先スイッチング, 公平性制御

1. はじめに

近年, ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や FTTH (Fiber To The Home) などの高速なアクセスネットワークの普及に伴い, それらを収容するメトロポリタンエリアネットワーク (MAN: Metropolitan Area Network) の高速・大容量化が求められている。現在の MAN は, 信頼性に優れた SONET (Synchronous Optical Network) が主流である。SONET は, 音声中心のトラフィックを想定しており, 固定的な帯域割当が行われる。しかしながら現在のトラフィックは, ファイル転送を中心とした P2P トラフィックや大容量コンテンツ配信によるトラフィックなどのバースト性の高いトラフィックが急増している。

そこで, バースト性を有するトラフィックを柔軟

に扱うことができる MAN として, 光バースト交換 (OBS: Optical Burst Switching) [1]- [4] を用いた MAN (以降, OBS-MAN と略) が注目されている [5]- [7]。OBS は, エッジルータにおいて同一の宛先かつ同一の品質要求を持つパケットをバースト性を有するパケット列 (以下, バースト信号と略) として転送することにより, 中継ノードにおける処理量を削減することができる。また, ヘッダはペイロードと異なる波長を用いて送信され, 中継ノードではヘッダのみが電氣的に処理され, バースト信号は光段階でカッタールーされるため, 電氣的処理によるボトルネックを解消することが可能である。このように OBS は, 電氣的の柔軟性と光の高速性を兼ね備えたスイッチング方式である。また, 光パケットスイッチングと比較して, スwitching 粒度を大きくできるため, 現行の光デバイスと親和性の高いスイッチング方式である。

文献 [5] では, 波長変換器および FDL (Fiber Delay Line) バッファを備えた光バーストスイッチにより構成されるノードを用いた OBS-MAN が提案されている。そして, 遅延およびスループットに関して, SONET

[†] 慶應義塾大学理工学研究所, 神奈川県
Department of Information and Computer Science, Keio
University 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku, Yokohama,
223-8522, JAPAN

と比べ OBS-MAN が優位であることが示されている。文献 [6] は、波長パスを用いてパースト信号を転送する OBS-MAN が提案されている。データを送信する際は、トークンを用いて波長予約を行い光パスを設定する。光パスを用いることにより中継ノードにおける棄却をなくすことが可能である。これらの二方式と比較して、ノード構成の簡略さやコスト、実現性の点で優れた方式として、ノード毎にあらかじめ波長を割り当て、割り当てられた波長のみを Add-Drop 可能な光 ADM (Add-Drop Multiplexer) でノードを構成する方式が提案されている [7]。この方式は、波長 λ_i を割り当てられた送信ノード以外のノードは、波長 λ_i を利用しないため中継ノードにおけるパースト信号の競合がない方式である。しかしながら、受信ノードにおいて自身宛のパースト信号を複数検知した場合、ランダムに選択された 1 つを除いてすべてのパースト信号が棄却される。このように受信側で競合を検知する方式は、棄却された場合、送信ノードから受信ノードまでの帯域を浪費するとともに、再送までの遅延が大きいという問題がある。

そこで本論文では、光 ADM により構成されるノードを用い、各ノードに対してあらかじめ受信波長を固定的に割り当てることにより受信側での競合がない OBS-MAN を提案する。提案方式は、上流優先スイッチング、分散公平性制御、およびトレーラ送信による予約変更から構成される。上流優先スイッチングとは、あるノードがパースト信号送信中に上流からのパースト信号を検知した場合に、自身の送信を中断し、上流からのパースト信号を優先的に転送する方式である。これにより、送信に成功したパースト信号は必ず宛先に到達することができるため、受信側で競合が起きる方式と比較して、一方向予約を用い予約成否の確認を行わない OBS ネットワークに適していると考えられる。しかしながらこの方式は、ノードの位置により送信成功率が異なり近くの宛先に送信できない位置優先度の問題、および送信中断によって生じた不完全パースト信号によるスループット低下という問題がある。そこで前者の問題を解決するために分散公平性制御を提案し、後者の問題を解決するためにトレーラパケット送信による予約変更を提案する。提案分散公平性制御方式は、従来のキュー長に基づいた Longest Queue First (LQF) 方式を改善し、キューイング時間も考慮することにより、ホットスポットトラヒックにおいても高い公平性を実現することができる。また、パース

ト信号の送信を中断した際に、パースト信号長および構成パケットの変更を伝達するトレーラパケットを送信することにより、下流における無駄な予約と無効なパースト信号を低減し、スループットを改善することができる。計算機シミュレーションにより、均一およびホットスポットトラヒックにおけるスループットおよびスループットに関する公平性を評価し、提案方式が不均一なホットスポットトラヒック下においても、高スループットかつ公平な OBS-MAN を実現可能であることを示す。

本論文の構成は以下の通りである。2 章では、従来の諸研究に関して述べ、3 章では、提案 OBS-MAN について説明する。4 章では、計算機シミュレーションにより、スループットおよびスループットに関する公平度を評価し、提案方式の有効性を示す。最後に 5 章で結論を述べる。

2. 従来の諸研究

ここでは、これまでに提案されている OBS-MAN、WDM パケットリングネットワーク、および分散公平性制御に関する従来の諸研究に関して述べる。

2.1 OBS-MAN

これまで、リングトポロジを用いたさまざまな OBS-MAN が検討されている [5]-[8]。本論文では、コストや実現性の観点から、あらかじめ割り当てられた波長のみを Add-Drop 可能なシンプルな光 ADM (Add-Drop Multiplexer) を用いた OBS-MAN について検討する。OBS-MAN におけるパースト信号棄却の要因として、送信時の競合 (以降、送信競合)、中継ノードにおける競合 (以降、中継競合)、受信時の競合 (以降、受信競合) の 3 つが考えられる。文献 [7] では、各ノードに対して送信波長を固定的に割り当てることにより、送信競合と中継競合を回避している。しかしながら、受信時に複数のパースト信号を検知した場合、受信競合によりランダムに選択された 1 つを除いてすべてのパースト信号が棄却される。このように受信側で競合を検知する方式は、棄却された場合、それまでに利用したリソースが無駄になるとともに、再送する場合は遅延が大きいという問題がある。

2.2 WDM パケットリングネットワーク

ある宛先 i に対して受信波長 λ_i を固定的に割り当て共有する Bus 型のネットワークと上流優先スイッチングを組み合わせた方式は、WDM パケットリングネットワークにおいてこれまでいくつかの提案がなされてい

る [9]-[12]. RINGO(RING Optical) ネットワーク [9] は、固定長の packets を前提とした方式で、送信器として複数の固定波長レーザーを用いるためマルチキャスト packets の送信に優れた方式である。また、可変長 packets を考慮した方式として HORNET(Hybrid Optoelectronic Ring NETWORK) [10] [11] がある。HORNET では、ノードが宛先ノードに割り当てられた波長を用いて packets を送信している間に、同一の波長で上流ノードから到着した packets を検知した場合、ノードは packets 間の衝突を回避するため即座に packets の送信を中止し、送信途中の無効な packets の最後に全ノード間で既知であるジャミング信号を付加する。HORNET は、ホップ毎に蓄積転送を行うため、ジャミング信号を付加された無効な packets は下流ノードによって削除することが可能である。

可変長データを扱うことができる HORNET を用いてバースト信号を転送することも考えられるが、以下の問題がある。まず、packets と比較してデータ長が非常に長いバースト信号をホップ毎に最後まで受信し完全性を確認して次のノードに転送することは非効率的であることから、OBS ではデータの完全性にかかわらず、別波長を用いて事前に送信されるヘッダ packets により次々と予約が行われる。そのため、HORNET のようにすぐ下流のノードにおいて無効なデータを削除することができず、下流の予約を変更する仕組みが必要となる。また、バースト信号は複数の packets から構成されるため、一部が欠如した場合も有効活用でき [13] [14], HORNET のように単純に削除するのではなく、残りの部分についても考慮する必要がある。そのため、送信中断により生じる不完全バースト信号に関する処理が重要となる。

2.3 最長キュー優先方式

上流優先スイッチングは、ある宛先ノードに対して上流に位置する送信ノードほど優先度が高く、宛先ノードに近い送信ノードほど送信成功率が低いという位置優先度の問題がある。図 1 に位置優先度による不公平性について示す。ノード 1~3 がノード 4 に対してバースト信号を送信する場合、ノード 4 に対して最も上流に位置するノード 1 は、最も下流に位置するノード 3 と比較して高い位置優先度を持つ。そのため、ノード 3 からノード 4 に対するデータ送信は困難になる。HORNET の場合も、これまでいくつかの位置優先度問題を解決する方式が検討されている。文献 [16] において、RS(Random Selection),

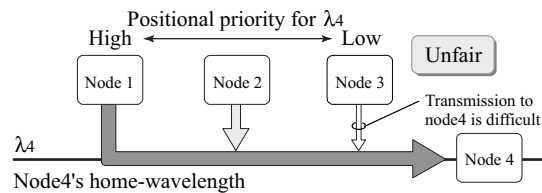


図 1 位置優先度による不公平性
Fig. 1 Positional priority unfairness problem

LQF(Longest Queue First) [15], DPQ(Destination Priority Queueing), SPF(Shortest Packet First) の 4 方式を比較し、キュー長に基づく分散公平性制御である最長キュー優先方式 LQF が均一トラフィックにおいて高い公平性を実現できることが示されている。LQF は、宛先ごとの待ち行列の中からキュー長が最も長いキューを選択する方式である。最も長いキューを、最も送信できていない宛先への待ち行列と見なし、送信成功率の低い宛先に対する送信を優先的に行う。送信キューの選択方法により、位置優先度の不公平性が改善される理由を以下に示す。図 1 を 4 ノードから構成されるリングネットワークと想定する。ノード 1 について考えた場合、ノード 4 に対しては最も上流に位置するため、ノード 4 宛の送信に関しては最高位置優先度となる。しかしながら、ノード 2 宛の送信に関しては、上流にノード 3,4 があるため最低位置優先度となる。同様に他のノードも、位置優先度が高い宛先と低い宛先を持つ。位置優先度の低い宛先へのキューは、キュー長が他の宛先のキューより長くなるため、送信優先度が高くなる。つまりキュー選択により、各ノードは最も送信成功率が低い宛先、すなわち隣接ノードに対する送信を優先的に行うため、下流ノードにおいて送信競合の原因となるトラフィックが減少する。その結果、位置優先度の低い宛先に対しても送信することが可能となる。しかしながら、ある特定の宛先に対してトラフィックが集中するホットスポットトラフィックの場合、送信できているにもかかわらずキュー長が長い待ち行列、送信できていないのにキュー長が短い待ち行列が生じ、キュー長が必ずしも送信成功率を表すとは限らない。そのため、そのようなトラフィックにおいて LQF を用いた場合、トラフィックが集中しているキューに送信権が偏るため、公平性を維持できないと予想される。また、トラフィックの多いキュー長の長いキューへ常に送信権が与えられ、トラフィックが少ない波長に対して送信権が回らないため、ネットワーク全

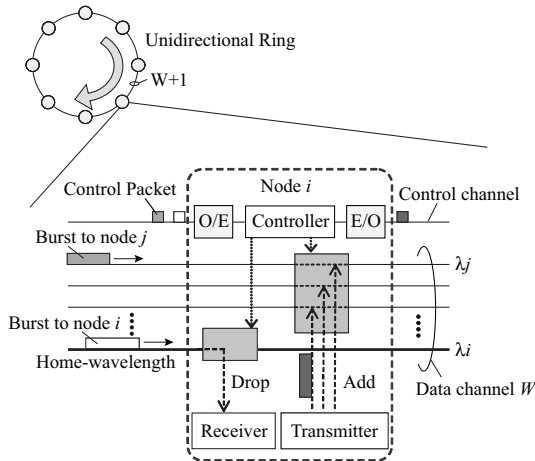


図2 OBSリングネットワークとノードアーキテクチャ
Fig. 2 OBS ring network and node architecture

体のスループットが劣化する可能性も考えられる。

3. 提案 OBS-MAN

本論文では、各ノードに対してあらかじめ受信波長を固定的に割り当てることにより受信側での競合がない OBS-MAN を提案する。提案 OBS-MAN は、各ノードに対して受信波長を固定的に割り当てることにより受信競合を回避し、上流優先スイッチングを行うことにより中継競合を回避する。上流優先スイッチングにより、送信されたパースト信号は下流ノードにおいて棄却されることなく宛先まで転送されるため、信頼性の高い OBS ネットワークの構築が可能となる。また、受信側で競合を検知する方式と比較して、送信側で競合を検知できるため、データをすぐに再送可能であるという利点もある。さらに、提案 OBS-MAN において送信中断した場合、パースト信号長および構成パケットの変更を伝達するトレーラパケットを送信し、下流ノードの予約を変更する。これにより、無駄な予約が取り消されるとともに、一部が欠如したパースト信号も有効なデータとして受信側で処理できるためスループットを改善することが可能となる。また、送信キューを決定する際に、キュー長だけでなくキューイング時間を考慮することにより、ホットスポットトラヒックにおいても公平なアクセスを実現することができる。以下に、提案 OBS-MAN を構成する、ネットワークおよびノードアーキテクチャ、上流優先スイッチングおよびトレーラ送信による予約変更、分散公平性制御、についてそれぞれ示す。

3.1 ネットワークおよびノードアーキテクチャ

図2に提案する OBS-MAN およびそのノードアーキテクチャについて示す。OBS-MAN は、 N 個のノードから構成され、各ノードは1本の WDM リンクにより接続されている。すべての宛先に対して同一方向にデータが転送される片方向リングネットワークとする。各 WDM リンクは、 $W + 1$ 波長から構成され、そのうち W 波長がデータ転送に、残りの1波長が制御パケットの転送に用いられる。本論文では、各ノードに対してデータ受信用に1波長を固定的に割り当てるため、 $N = W$ となる。そのため、提案方式は、ノード数に比例して必要な波長も増大するが、近年 WDM で多重可能な波長数は増加しており、MAN を構成するノード数に対して十分に対応できるものと考えられる。シングリング方式として、波長利用効率に優れた Just Enough Time (JET) [1] を用いる。JET とは、制御パケットにはパースト信号の伝送開始までのオフセット時間、パースト信号長が含まれており、中継ノードではパースト信号の到着時刻を推定し、転送に必要な時間だけ波長を予約する方式である。

各ノードは、制御パケットを送受信するための固定波長送受信器、データを送信するための可変波長送信器、およびデータを受信するための固定波長受信器から構成される。受信波長を固定的に割り当てる方式は、受信側に複数のパースト信号が同時に到着することがなく、受信競合がないアーキテクチャである。各ノードは、複数のアクセス網に接続されており、同一エッジルータを目指す複数のパケットからパースト信号を生成する機能、および、パースト信号からパケットを再生する機能を有する。アクセス網からノードに到着したパケットは、宛先情報に基づき、宛先エッジルータごとに設けられたバッファ (VOQs: Virtual Output Queues) に格納される。そして VOQ がパースト生成の条件を満たしたとき、VOQ に格納されたパケットはパースト信号として送信される。パースト生成の条件として、時間と長さに基づく方式を用いる [17]。VOQ がある長さに達した場合、あるいは達していなくても先頭のパケットが到着してある時間を経過した場合、パースト信号が生成される。パースト信号を送信する場合、まず制御波長を用いて制御パケットを送信し、オフセットと呼ばれる時間間隔を空けた後にパースト信号を送信する。

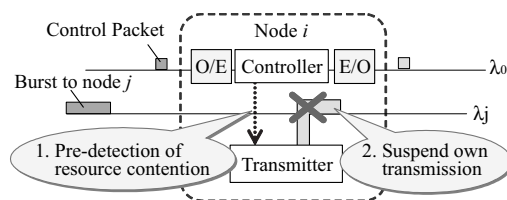


図 3 上流優先スイッチングの動作
Fig. 3 Operation of Upstream Prioritized Switching

3.2 上流優先スイッチングとトレーラパケット送信による予約変更

提案 OBS-MAN は、各ノードに対して受信用の波長を割り当てるため、ある宛先に送信したいすべてのノードが同一波長にアクセスする。そのため、あるノードの上流から送信されたデータとそのノードから送信中のデータが衝突する可能性がある。OBS ネットワークの場合、制御パケットがバースト信号に先立ち送信されるため、事前にこの送信競合を検知可能である。

図 3 に上流優先スイッチングを用いた場合の動作を示す。ノード i がノード j に対してデータを送信する場合、波長 λ_j の利用状況を調べる。波長 λ_j が利用可能な場合は、直ちに制御パケットを制御波長 λ_0 を用いて送信し、オフセット時間経過後にバースト信号を送信する。その後、上流からノード j 宛へのバースト送信の制御信号を検知した場合、自ノードからの送信を中断し、上流からのバースト信号を優先する。このような動作を各ノードが分散的に行うことにより、送信されたバースト信号は下流ノードにおいて棄却されることなく宛先まで転送されるため、信頼性の高い OBS ネットワークの構築が可能となる。

次に、図 4 にトレーラパケット送信による予約変更について示す。上流からのバースト信号を検知した送信ノードは、直ちに自身の送信を中止し、送信が中断されたことを示すトレーラパケットを下流へ送信する。そして、トレーラパケット送信後、上流からの制御パケットを下流に転送する。トレーラパケットは、JIT(Just In Time) シグナリング [18] におけるリリース信号やバーストセグメンテーション [14] におけるトレーラパケットと同様に、ヘッダにより先立って予約された波長の予約情報を変更するものである。単純な上流優先スイッチング方式と比較し、トレーラパケットを送信することにより、下流における無駄な予約を取り消し、スループットを改善することができる。ま

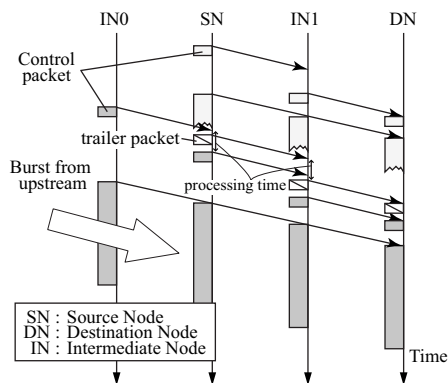


図 4 トレーラ送信による予約変更
Fig. 4 Change reservation by a trailer packet

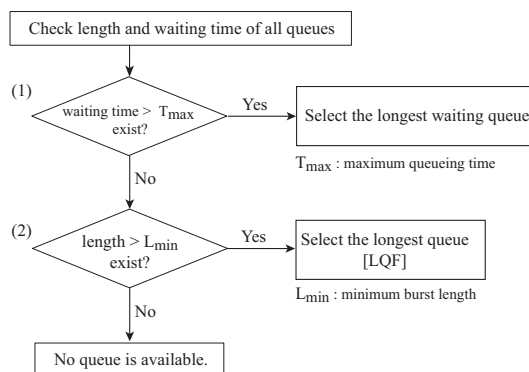


図 5 提案アルゴリズム oLQF のフローチャート
Fig. 5 Flowchart of proposed algorithm (oLQF)

た、トレーラパケットには、競合するまでに送信成功したパケット数に関する情報を保持しており、あて先エッジルータにおいてバースト信号からパケットに戻す際に、一部が欠如した不完全パケットを判別することが可能となる。

3.3 分散公平性制御方式

LQF がうまく機能しないと予想される偏りのあるコンディションでも平等でかつ、スケラビリティに優れた分散公平性制御方式を提案する。提案方式は、従来の LQF を拡張し、キューの長さだけでなく、先頭パケットが到着してからバースト信号生成までのパケットのキューイング時間 (以降、キューイング時間と略) を考慮し、送信キューを決定する。以下に、提案方式を用いた場合の、あるノードにおける送信キュー決定手順を示す。

まず、すべてのキューの中から「長さ」と「キューイング時間」のいずれかがバースト信号生成の条件を

満たすキューを選択する．本論文では，文献 [17] に基づき，パースト信号生成の条件を，(1) キューイング時間がパースト生成時間の最大値を超過，あるいは(2) キュー長が最低パースト信号長以上，と定める．従来の LQF の場合，これらの条件を満たすキューのうち，キュー長が最も長いキューを送信キューとする．図 5 に，提案アルゴリズムのフローチャートを示す．提案方式では，まず条件 (1) を満たすキューを選択し，その中から最もキューイング時間が長いキューを送信キューとする．そして，条件 (1) を満たすキューが存在しない場合，条件 (2) を満たすキューを選択し，その中から最もキュー長が長いキューを送信キューとする．そして，送信キュー選択後，送信に用いる波長の利用状況を確認し，利用可能であれば，パースト信号を生成する．

LQF はキュー長だけで送信キューを決定するため，ホットスポットトラヒックにより送信できているにもかかわらずキュー長が長いキューも送信成功率の低いキューと判断する．一方，本方式ではまずキューイング時間で判断する．キューイング時間は，送信できている場合は短くなり，送信できていない場合は長くなるため，ホットスポットトラヒックにおいても最も送信成功率の低い宛先を判断することが可能となる．

4. 特性評価

4.1 シミュレーションモデル

本論文では，パケット到着過程として，Modified Interrupted Poisson Process (IPP) [19] に基づいた ON-OFF トラヒックを使用する [7]．ON-OFF トラヒックにおいて，ON 状態はパケットの到着期間を表し，ON 状態中の各タイムスロットに到着率 1.0 でパケットが連続的に到着する．一方，OFF 状態ではパケットが到着しない．ON 状態，OFF 状態それぞれの期間長は，幾何分布に従い，ON 状態の最小期間長は 1[タイムスロット]，OFF 状態の最小期間長は 0[タイムスロット] とする．本論文では，1 タイムスロットのスロット長を 1[μsec] とし，100 万タイムスロット分の送受信に関して評価する．IPP では，パケット到着のパースト性を表す指標として，以下の式で表される Squared Coefficient of Variation c^2 を用いる．

$$c^2 = 1 + \frac{2\lambda\mu_1}{(\mu_1 + \mu_2)^2}$$

ここで， $1/\mu_1$ ， $1/\mu_2$ ，それぞれ平均 ON 長および平

均 OFF 長を表す．また， λ はパースト信号到着率を表し，1 波長あたりの伝送速度を 2.5Gbps，平均パケット長を 500 bytes とすると， $1/\lambda = (500 \text{ bytes})/(2.5 \text{ Gbps}) = 1.6 \mu\text{sec}$ と計算できる．

$$\rho_{node} = 2.5[\text{Gbps}] \times \frac{\mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

以上の 2 式に c^2 および ρ_{node} を与えることにより， μ_1 ， μ_2 を求めることができる．

以降の評価において，入力負荷 ρ は各ノードへの平均パケット到着率を示し，スループットは到着データ量に対する受信成功データ量を示す．トレーラを送信しない場合，送信中断によりパースト信号の後半が欠如したパースト信号は，無効なデータとみなし，受信成功データ量に含めないものとする．データは，送信完了後に VOQ から削除するものとし，単純上流優先方式において送信中断した場合は再送するものとする．

また，本論文ではあて先毎のスループットのばらつきを，以下の式で定義される公平度 (Fairness Index) を用いて評価する [20]．

$$f(P_1, P_2, \dots, P_n) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n P_i^2}$$

ここで P_i は各ノードにおけるノード i 宛てのスループットを示す．公平度は，スループットのばらつきが小さい場合にはその値は 1 に近づき，逆にばらつきが大きい場合にはその値は 1 から遠ざかる．IPP で用いる Squared Coefficient of Variation c^2 は文献 [7] と同じ 20 とし，平均パケット長を 500byte，最低パースト信号長を 5 Kbytes，最大パースト信号長を 50 Kbytes，パースト生成時間を 4 msec，オフセット時間は 10[μsec] とする．また，各ノードにおいて VOQ は有限バッファから構成されるものとし，キューイング可能なデータ量は合計 10Mbyte までとする．表 1 にその他のシミュレーション諸元を示す．

以降の評価では，従来方式として送信中断の際に何も行わない方式（以降，単純上流優先方式），提案方式としてトレーラを送信する方式（以降，トレーラ送信方式）を比較する．また，送信キュー決定方式として，公平性制御制御を行わず均等に送信権を与えるラウンドロビン方式（以降，RR:Round-Robin）とキュー長に基づいた最長キュー優先方式（以降，LQF:Longest

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation Parameter

The number of Node : N	8 - 32
Distance of each node	4 Km
The number of Data Wavelength : W	8 - 32
The number of Control Wavelength	1
Transmission Rate	2.5 Gbps

Queue First) を従来方式とし、キュー長とキューイング時間を考慮した提案方式 (以降、oLQF:obs-extended LQF) と比較する。

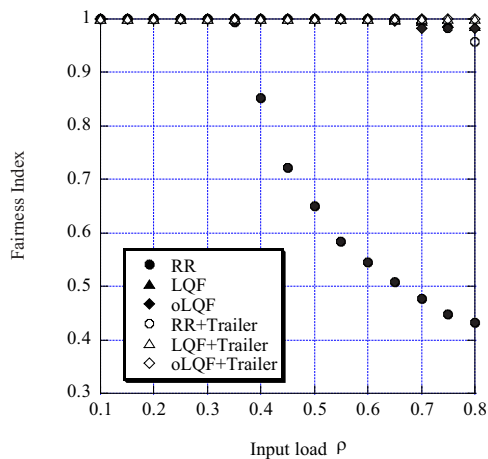


図 6 入力負荷 ρ に対するスループットの公平度 (均一トラフィック, $N=W=8$)

Fig. 6 Fairness Index versus input load ρ (uniform traffic, $N=W=8$)

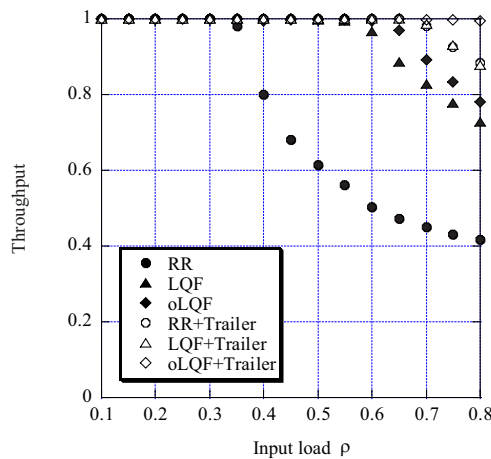


図 7 入力負荷 ρ に対するスループット (均一トラフィック, $N=W=8$)

Fig. 7 Throughput versus input load ρ (uniform traffic, $N=W=8$)

4.2 均一トラフィックにおける特性

まず、均一トラフィックにおけるスループットおよびスループットに関する公平度を評価する。ここで均一トラフィックとは、到着パケットの宛先分布が均一であることを示す。

図 6 に、入力負荷 ρ に対するスループット公平度を示す。このときノード数および波長数は 8 とする。単純上流優先方式は、公平性制御を行わない場合、中負荷以降大きく公平度が劣化するものの、公平性制御を適用することにより改善できることがわかる。これは公平性制御により送信中断率を改善できるためである。一方、トレーラ送信方式は公平性制御にかかわらず公平なスループットを維持できることがわかる。これは、送信中断が多い場合もトレーラ送信により下流における無駄な予約を取り消すと同時に、不完全なバースト信号を有効にできるからである。次に図 7 に入力負荷 ρ に対するスループットを示す。ノード数および波長数は 8 である。図より、単純上流優先方式の場合、公平性制御を行うことによりスループットを大幅に改善できることがわかる。また、トレーラを送信することにより、さらにスループットを改善でき、oLQF の場合はスループットをほぼ 1 にすることができる。これは、トレーラ送信により無駄な予約および無効なバースト信号が低減するためである。

4.3 ホットスポットトラフィックにおける特性

次に、LQF において問題となると予想されるホットスポットトラフィックの場合について、スループット、スループットに関する公平度、送信中断率を評価する。ホットスポットトラフィックとして、ある特定の宛先ノード (ホットスポット) 宛に集中的にパケットが到着するホットスポットトラフィックを用いる。各ノードにおけるホットスポット宛のパケットの割合を Hotspot Ratio[%] として、以下のように定義する。

$$\text{Hotspot Ratio} = \frac{\rho_{\text{hotspot}}}{\rho_{\text{node}}} \times 100$$

ここで ρ_{node} は 1 ノードあたりの負荷を表し、 ρ_{hotspot} は ρ_{node} 中に含まれるホットスポット宛の負荷を表す。

以降の評価では、ホットスポットをノード 4 とし、各ノードにノード 4 宛のパケットが Hotspot Ratio[%]、他の宛先には均一にパケットが到着するものとする。また、ノード 4 にはすべての宛先に対して均一にパケットが到着するものとする。図 8 に、入力負荷 ρ に

対するスループット公平度を示す．ノード数および波長数は 8，Hotspot Ratio は 30%とする．図より，単純上流優先の場合，LQF はホットスポットトラヒックにおいて公平性が劣化することがわかる．特に中負荷では公平性制御を行わない RR よりも悪い特性となる．また，不均一の度合いを変化させた場合の評価として，図 9 に Hotspot Ratio に対するスループットを示す．このとき，ノード数および波長数は 8 とし，各ノードの入力負荷 ρ は 0.4 とする．この図より，LQF は不均一性が高くなるにつれてスループットが低下することがわかる．このようにホットスポットトラヒックにおいて LQF の特性が劣化する理由は，LQF がキュー長を元に送信キューを決定するため，トラヒックの偏りによって常にキュー長が長い特定のキューを選択し続けてしまうからである．oLQF は，LQF と比較して良好な特性であるが，同様の理由から不均一性が高くなるにつれ劣化する．また，RR は，送信権が順に回るため，ある程度不均一性まではスループットを維持できるが，不均一性が高い場合は送信中断が増加するため，スループットが低下する．一方，トレーラ送信を組み合わせることにより，不均一性が非常に高いトラヒックにおいても高い公平性を維持できることがわかる．これは，トレーラを送信することにより送信中段による不完全なパースト信号を有効にできるからである．

次に分散公平性制御とトレーラ送信の効果に関して，

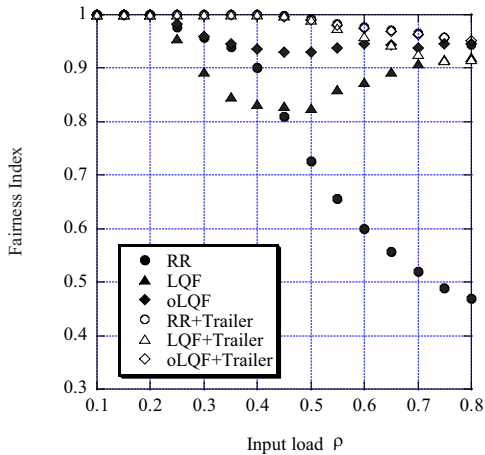


図 8 入力負荷 ρ に対するスループットの公平度 (Hotspot Ratio = 30%, N=W=8)
 Fig. 8 Fairness Index versus input load ρ (Hotspot Ratio = 30%, N=W=8)

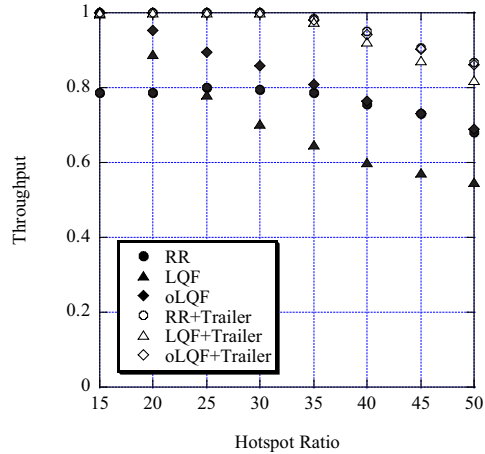


図 9 Hotspot Ratio に対するスループット (入力負荷 $\rho = 0.4$, N=W=8)
 Fig. 9 Throughput versus hotspot ratio (Input load $\rho = 0.4$, N=W=8)

送信競合による送信中断率から検証する．図 10 に入力負荷に対する送信中断率を示す．ノード数および波長数は 8，Hotspot Ratio は 30%とする．図より，公平性制御を行わない RR の送信中断率が負荷の増大に伴い劣化するのに対し，LQF や oLQF を用いた場合は送信中断率の増加を抑制できることがわかる．また，トレーラ送信方式は中負荷までは RR の場合も送信中断率が低いことがわかる．これは，トレーラを送信することにより中断したデータも有効データとできることから再送が減るため，トレーラを送信せずすべて再送となる方式と比較して，ネットワーク全体の負荷が低くなるためである．そのためトレーラ送信を行うだけで，図 7 に示されるように，公平性制御を行わない場合も良好なスループット特性を得ることが可能となる．また，図 10 において負荷が高い場合，LQF が最も送信中断率が低いことがわかる．送信中断は，下流ノードがパースト信号を生成して送信開始し，その後，上流からパースト信号が到着した際に発生する．高負荷条件では，生成されるパースト信号の信号長が非常に長くなり，波長の予約時間が長くなる．そのため，下流においては常に上流からのパースト信号により波長が利用されている状態となり，送信中断の対象となるパースト信号が生成されないため，送信中断率が低下する．特にトレーラ送信を行わない場合は，再送により各ノードにおけるホットスポット宛のキュー長が長くなり，パースト信号長が長くなることから，送信

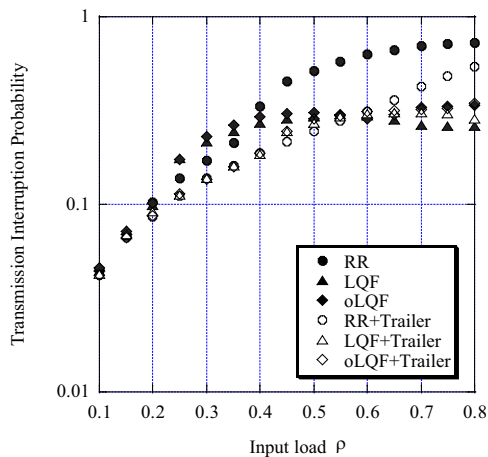


図 10 入力負荷に対する送信中断率
(Hotspot Ratio = 30%, $N=W=8$)

Fig. 10 Transmission Interruption Probability versus input load ρ
(Hotspot Ratio = 30%, $N=W=8$)

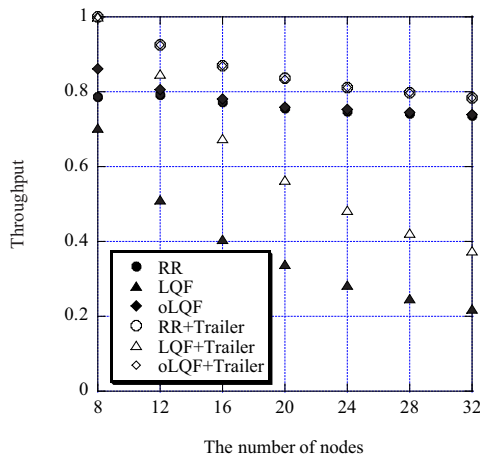


図 11 ノード数 N に対するスループット
(入力負荷 $\rho = 0.4$, Hotspot Ratio = 30%)

Fig. 11 Throughput versus the number of nodes N
(Input load $\rho = 0.4$, Hotspot Ratio = 30%)

中断率が低下すると考えられる。

図 11 にノード数 N に対するスループットを示す。このとき、データ送信用の波長数はそれぞれノード数と同一とし、入力負荷 ρ は 0.4, Hotspot Ratio は 30% とする。図より、LQF を用いた場合、トレーラ送信の有無にかかわらずノード数の増加にともないスループットが劣化することがわかる。これは、ノード数が多いほど、一つの宛先の上流に位置するノードが多いため、トラフィックがより不均一になるためであ

る。一方、oLQF と RR は、キュー長に依らず送信権を順々に移行できるとともに、トレーラ送信することにより無効バースト信号を低減できるため、ノード数が増加し送信中断が多い条件下でもスループットの劣化を抑制できていることがわかる。

5. むすび

本論文では、バースト性の高いトラフィックを柔軟に扱うことができるメトロポリタンネットワークの構築を目的とし、上流優先スイッチングと分散公平性制御を用いた光バースト交換リングネットワークを提案した。提案方式では、上流優先スイッチングにより、中継ノードにおけるバースト信号の棄却をなくし、分散公平性制御により上流優先スイッチングの位置優先度による不公平を解決する。特に oLQF は、キュー長だけでなくキューイング時間も考慮することにより、ホットスポットトラフィック環境下においても公平なアクセスを実現する。さらに、送信中断による不完全バースト信号をなくし、下流における無駄な予約を取り消すため、トレーラ packets を送信し予約の変更を行う。それにより、ホットスポットトラフィックにおいても高い公平性と高いスループットを実現することができる。計算機シミュレーションにより、均一およびホットスポットトラフィックにおけるスループット、スループットに関する公平性、送信中断率を評価し、提案公平性制御方式が不均一なホットスポットトラフィック下においても高い公平性を実現可能であることを示した。今後の課題として、ホットスポットが複数存在する場合についても検討を行う予定である。

謝 辞

本研究は慶應義塾大学大学院 21 世紀 COE プログラム「アクセス網高度化光・電子デバイス」、財団法人テレコム先端技術研究支援センターの援助によって行われた。関係者各位に深謝する。

文 献

- [1] C. Qiao and M. Yoo, "Optical burst switching(OBS) - A new paradigm for an optical internet," *J. High Speed Networks*, vol.8, pp.69-84, 1999.
- [2] J. Turner, "Terabit burst switching," *J. High Speed Networks*, vol.8, pp.3-16, 1999.
- [3] Yijun Xiong, Marc Vandenhoute and Hakki C. Cankaya, "Control Architecture in Optical Burst-Switched WDM Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.18, no.10, pp.1838-1851, Oct. 2000.

- [4] X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, "Priority-based Wavelength Assignment Algorithm for Burst Switched WDM Optical Networks," *IEICE Transactions on Communications, Joint Special Issue on Recent Progress in Optoelectronics and Communications*, vol.E86-B, no.5, pp.1508-1514, May 2003.
- [5] S. Sheeshia, Y. Chen, V. Anand, and C. Qiao, "Performance Comparison of OBS and SONET in Metropolitan Ring Networks," *IEEE JSAC*, vol.22, no.8, pp.1474-1482, 2004.
- [6] A. Fumagalli and P. Krishnamoorthy, "A Low-Latency and Bandwidth Efficient Distributed Optical Burst Switching Architecture for Metro Ring," in *Proc. IEEE ICC*, vol.2, pp.11-15, 2003
- [7] Lisong Xu, Harry G. Perros, and George N. Rouskas, "A simulation study of optical burst switching and access protocols for WDM ring networks," *Computer Networks*, 41, pp.143-160, 2003.
- [8] Ching-Fong Su, Takeo Hamada, and Richard Rabbat, "Optical Burst Transport Scheme on WDM Rings," *10th OptoElectronics and Communications Conference*, vol.6A2-3, pp.136-137, July 2005.
- [9] C. Andrea, V. De Feo, J.M. Finochietto, R. Gaudino, F. Neri, C. Piglione, P. Poggiolini, "RINGO: An Experimental WDM Optical Packet Network for Metro Applications," *IEEE JSAC*, Vol. 22, No. 8, pp. 1561-1571, October 2004.
- [10] K. Shrikhande, I. M. White, D. Wonglumsom, S. M. Gemelos, M. S. Rogge, Y. Fukashiro, M. Avenarius and L. G. Kazovsky, "HORNET: A Packet-Over-WDM Multiple Access Metropolitan Area Ring Network," *IEEE JSAC*, vol.18, no.10, pp. 2004-2016, Oct. 2000.
- [11] Kyeong Soo Kim, Hiroshi Okagawa, Kapil Shrikhande, and Leonid G. Kazovsky, "Unslotted optical CSMA/CA MAC protocol with fairness control in metro WDM ring networks," *Proc. of GLOBECOM 2002*, vol.3, pp.2370-2374, Nov. 2002.
- [12] 北村強, 佐久田誠, 笹瀬巖, "HORNET における可変長パケットを考慮したメディアアクセス制御方式," *電子情報通信学会論文誌*, Vol.B86-B, No.10, pp.2134-2144, 2003年10月.
- [13] Andrea Detti, V. Eramo, and M. Listanti, "Performance Evaluation of a New Technique for IP Support in a WDM Optical Network: Optical Composite Burst Switching (OCBS)," *J. Lightwave Technology*, vol.20, No.2, pp.154-165, Feb. 2002.
- [14] Vinod Vokkarane, Jason Jue, and Sriranjani Sitaraman, "Burst Segmentation: an Approach for Reducing Packet Loss in Optical Burst-Switched Networks," *Proceedings, IEEE International Conference on Communications (ICC) 2002*, vol. 5, pp.2673-2677, Apr. 2002.
- [15] Duan-Shin Lee, "Generalized longest queue first: an adaptive scheduling discipline for ATM networks," *Proc. of INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol.1, pp.318-325, April 1997.
- [16] K. S. Kim and L. G. Kazovsky, "Design and performance evaluation of scheduling algorithms for unslotted CSMA/CA with backoff MAC protocol in multiple-access WDM ring networks," *Information and Science*, vol.149, No.1-3, pp. 135-149, Jan. 2003.
- [17] X. Yu, Y. Chen, and C. Qiao, "Study of traffic statistics of assembled burst traffic in optical burst-switched networks," in *Proc. of OptiComm*, pp.149-159, July-Aug. 2002.
- [18] J. Y. Wei, and R. I. McFarland Jr, "Just-in-time signaling for WDM optical burst switching networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 12, pp. 2019-2037, Dec. 2000.
- [19] W. Fischer, K. Meier-Hellstern, "The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook," *Performance Evaluation*, 18, pp.149-171, 1992.
- [20] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," Tech. Rep. DEC-TR-301, Digital Equipment Corporation, Sept. 1984.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

荒川 豊 (学生員)

平 13 慶大・理工・情報卒 . 平 15 同大学院修士課程了 . 現在 , 慶大大学院博士課程在学中 . 主として , 通信ネットワークおよび情報セキュリティに関する研究に従事 . IEEE , 情報処理学会会員 .

山中 直明 (正員)

昭 56 慶大・理工・計測卒 . 昭 58 同大学院修士課程了 . 同年日本電信電話公社 (現 , 日本電信電話 (株)) 武蔵野電気通信研究所入所 . 以来 , 将来の Broadband ISDN , 高速・広帯域交換方式の研究開発 , ATM 網におけるトラヒックマネージメントに関する研究 , 超高速 ATM ノードシステムの研究開発 , GMPLS , 光バックボーンの研究に従事 . 平 16 慶大・理工・情報・教授 , 現在に至る . 工博 . 平 2 , 6 , 11 IEEE ECTC 40th, IEEE ECTC 44th および IEEE ECTC 49th Best Paper Award , 平 7 IEEE CPMT Part・B The Best Transaction Paper Award , 平 7 電気通信普及財団テレコムシステム技術賞 , 平 10 マイクロエレクトロニクスシンポジウム最優秀論文賞 , 平 11 IEMT/IMT Best Paper Award , 平 11 本会論文賞受賞 . IEEE Communication Surveys BroadBand Network Area

Editor, IEEE Com. Mag. Technical Editor, 本会フォト
ニックネットワーク研究会委員長, IEEE フェロー.



笹瀬 巖 (正員)

昭 54 慶大・工・電気卒, 昭 59 同大大学
院博士課程了, 同年オタワ大・理工・電気・
ポストドクトラルフェロー, 昭 60 同大学
講師, 昭 61 慶大・理工・電気助手, 昭 63
同大専任講師, 平 4 同助教授, 平 11 同大・
理工・情報・教授, 現在に至る. 主として,

デジタル通信, 通信ネットワーク, 光通信理論, マイクロ波
通信, 非線形通信システム, 通信理論, 符号理論に関する研究
に従事. 工博. 昭 59 年度 IEEE COM. SOC. 学生論文賞.
昭 62 第 3 回井上研究奨励賞受賞, 昭 63 第 1 回安藤博記学術
奨励賞, 昭 63 篠原記念学術奨励賞, 平 8 年度本会交換システ
ム研究会優秀論文賞受賞. IEEE Senior Member, 情報理論
とその応用学会, 情報処理学会各会員.