

## 4 波長ルーティング・光バースト・光アクセス系

### 4 Wavelength routing / Optical burst switching / Optical Access Network

#### 4-1 光バーストスイッチネットワークテストベッドの開発と実証実験

##### 4-1 Experimental Study of a Burst-Switched WDM Network Testbed

孫 咏梅 橋口知弘 ヴー クァン ミン 王 溪 今泉英明 森川博之  
青山友紀

Yongmei Sun, HASHIGUCHI Tomohiro, Vu Quang Minh, Xi Wang, IMAIZUMI Hideaki,  
MORIKAWA Hiroyuki, and AOYAMA Tomonori

#### 要旨

光バーストスイッチングは、次世代の光インターネット構築における有望なスイッチング技術だと考えられている。その実現可能性を調査し、実証実験や性能評価、問題点や課題の洗い出しを行うため、筆者らは光バーストスイッチネットワークテストベッドをオーバーレイ方式で設計・実装した。電気的なバースト生成・分解と共に、通過バーストの中継も可能な「トランシーバ+中継」機能を持つ、柔軟性の高いノードアーキテクチャを提案する。本ノードアーキテクチャは、ローカル側で生成されるバーストに対して CoS (Class Of Service) と波長選択機能を実現し、カットスルー中継されるバーストに対して透過性を与えるように設計される。さらに、空間領域と波長領域において異なる衝突回避手法を効率よく組み合わせたスケジューリング方式について説明する。本ネットワークテストベッドに関し、エンドツーエンド遅延、バーストブロッキング率及び TCP スループットなどの性能を評価する。また、本テストベッドを用いたオンラインビデオサービスの実演デモを紹介する。最後にネットワーク性能の主な決定要因と将来の方向性についても触れる。

Optical burst switching is considered an attractive switching technology for building the next-generation optical Internet. To investigate its feasibility, evaluate its performance and explore its future direction, we designed and implemented an overlay-mode optical burst-switched network testbed. In this report, we present the node architecture, control algorithm, and performance evaluation of the testbed. A flexible "transceiver + forwarding" node architecture is proposed to perform both electronic burst assembly/disassembly and optical burst forwarding. It is designed to provide class of service and wavelength selection for locally generated bursts, and transparency to cut-through bursts. A scheduling mechanism, which efficiently combines two different contention resolutions in space and wavelength domains, is discussed in detail. Performances of the burst-switched network testbed, including end-to-end delay, burst blocking probability and TCP throughput, are evaluated; and online video services are demonstrated. Furthermore, key determinants of the network performance and future directions are also discussed.

## [キーワード]

光バーストスイッチング, バースト生成, 波長選択, バーストスケジューリング, 衝突回避手法  
Optical burst switching, Burst assembly, Wavelength selection, Burst scheduling,  
Contention resolution

## 1 はじめに

波長分割多重(WDM)技術の発展とインターネットトラフィックの急増に伴い、光ファイバの伝送能力と電気ルータのルーティング及び転送能力との間に大きな差が生じている。その差を埋めるべく、光スイッチング技術に関する研究開発が数多く行われてきた。光スイッチング技術のなかでもとりわけ有望だと考えられているのが光バーストスイッチング(OBS)[1][2]である。OBSは、光サーキットスイッチングと比較し波長使用効率が高く、光パケットスイッチングと比較し光デバイスへの要求条件が低く実現可能性が高い。

光バーストスイッチネットワークでは、バーストデータと制御信号とが別々のチャンネルで伝送され、それぞれ光領域と電気領域でスイッチングされる。バーストとは、同じ出口ノードアドレスを持つ複数のクライアントデータを一つにまとめたものをいう。バーストは予約確認応答を待つことなく、「オフセットタイム」と呼ばれる短い遅延時間だけ制御信号から遅れて送出される(一方向予約方式)。オフセットタイムを設けることにより、中継ノードはバーストが到着する前に制御信号の処理と光スイッチの制御処理を完了できるため、中継ノードに光バッファを設ける必要がなくなる。

OBSについてはバースト生成、シグナリング、スケジューリング、衝突回避など多くの課題が精力的に研究されており[3]–[8]、OBS技術の性能評価を行うためのネットワークテストベッドの開発が必要かつ重要となっている。バーストスイッチ用ノードのプロトタイプ及びテストベッドは既に幾つか開発・実証されているが[9]–[14]、そのほとんどは光スイッチやシグナリングプロトタイプといった要素技術をテーマにしており、総合的なOBS機能を備えた網羅的実験プラットフォームとはなり得ない。筆者らはOBSの実現可能性の調査、プロトタイプとアルゴリズムの評価及び将来の方向性の研究を目的とし、汎用的で高柔軟性の

OBSネットワークテストベッドを開発・実装した。本稿では、テストベッドにおけるノードアーキテクチャ、制御アルゴリズム及び性能評価について取り上げる。最初に「トランシーバ+中継」タイプの高柔軟性ノードアーキテクチャについて説明する。このアーキテクチャは透過的な光バーストスイッチングと電気バースト生成が行えるほか、CoSと波長選択の機能をサポートする。次に、空間領域と波長領域双方で異なる衝突回避手法を効果的に組み合わせたスケジューリング手法について説明する。最後に、一連の実証実験を通して得られたOBSネットワークテストベッドの性能に関して評価・考察する。

## 2 OBSネットワークテストベッドの設計方針

理想的なテストベッドでは、現実のOBSネットワークが最大限エミュレートされること、新しい発想や新たな技術に対応できる柔軟な実験プラットフォームが提供されること、さらに次世代光インターネットに対して存続可能な発展ソリューションに寄与することが期待される。特に(1)バーストの生成と分解、ネットワークプロトコル(例:ルーティングとシグナリング)、(2)制御手法(例:スケジューリングと衝突回避)、(3)規模とリソース(例:十分量のノード、WDMリンク及び波長)、(4)従来のレガシーネットワークとの融和性(例:IP網との相互接続)などの主要機能要件を満たすことが必要となる。これらの要求条件がクリアできるよう、我々は汎用的で高柔軟性のOBSネットワークテストベッドを設計した。設計に当たって筆者らが考慮した方針は次のとおりである。

### (1) IP網との融和性と相互運用性

IP網が広く普及していることを考えると、テストベッドは非同期の可変長バーストをスイッチ

ングできるように設計し、IP トラフィック本来の特性と融和させるのが理想的である。また同時に、IP 自体に変更・拡張することなく、IP 網の機能がテストベッドで動作し相互運用可能であることが望まれる。このためにはオーバーレイ方式を採用する必要がある。これらの目的を達成することは、次世代光インターネットに向けたネットワークの発展に貢献すると考えられる。

(2) 汎用性、モジュール性と拡張性

様々な機能や手法に対して開かれた評価環境を提供するには、汎用的なテストベッドの設計が必要である。汎用性を達成する上で、透過的なデータプレーンと再プログラム可能な制御プレーンが重要となる。これらを持つテストベッドは、IP 又はその他のトラフィックに対応したフロー／ラベル／波長スイッチング、JET (just-enough-time)<sup>[2]</sup> や JIT (just-in-time)<sup>[15]</sup> のプロトコルなど、様々なトラフィック、プロトコル、アルゴリズムをサポートできる。また将来の拡張を考えた場合、テストベッドの OBS ノードは各機能の一つ機能モジュール (例えばスイッチマトリクス) に分け、それぞれ着脱可能な回路基盤ボードに集積しモジュール性を高めることは非常に重要である。こうすることにより、ボードを交換するだけで将来登場する高速光スイッチなどの高性能デバイスが利用可能となる。また再構成可能なトポロジと十分なリソースも、テストベッドの汎用性を高める上で重要な要素である。

上記の方針を基に、高柔軟性ノードアーキテクチャ、高効率の JET シグナリングプロトコル及び新しいスケジューリングアルゴリズムを備えた汎用 OBS ネットワークテストベッド<sup>[16]</sup> を実装した。テストベッドは 1 台のコアノードと 3 台のエッジノードで構成される。IP 網にはエッジノードを介して OBS ネットワークに接続される。この入口エッジノードでは、同じ出口ノードアドレスを持つ複数の IP パケットが一つのバーストとして構築される。このバーストが OBS ネットワーク内をルーティング及び転送される。バーストは最後に出口エッジノードにおいて IP パケットに分解される。OBS ノードはバーストの伝送とスイッチングをデータプレーンで行い、制御信号の交換と処理を制御プレーンで行う。なお、コアノ

ードはエッジノードを単純化したものであるため、以下では主にエッジノードについて説明する。

### 3 「トランシーバ+中継」型のノードアーキテクチャ

これまでの多くの研究事例では、エッジノードは OBS ネットワークの境界点でバーストの生成と分解を行うだけであった。しかし、様々なネットワークトポロジと高い機能をサポートするために、筆者らはエッジノードが CoS と波長選択を実現するバーストの生成分解が行え、さらにバーストをカットスルーで転送できるように、「トランシーバ+中継」型の高柔軟性アーキテクチャを提案している。それを図 1 に示す。エッジノードは光スイッチングユニット、バースト送受信ユニット及び制御ユニットによって構成される。光スイッチングユニットは全光バーストスイッチングを行う。これはカプラ、MUX/DEMUX、光スイッチマトリクス、パワー等化器及び増幅器で構成される。バースト送受信ユニットはバーストの生成分解を行う。制御ユニットは制御信号の処理、光スイッチマトリクスの制御処理及びバースト送受信ユニットの制御を行う。

エッジノードは、図 1 に示すように 2 本のリモート WDM リンクと 4 本のローカルリンクを扱うことができる。説明を容易にするために、二つの OBS ノード間に張られた WDM リンクを「リモートリンク」と呼ぶことにする。リモートリンクは四つの DWDM バーストチャネル (波長) と一つの共用制御チャネル (波長) を備えている。同様にローカルリンクは OBS ノードとクライアントの IP 網をつなぐリンクである。ローカルリンクには

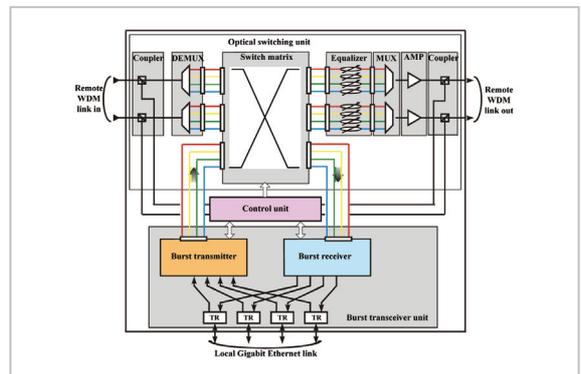


図 1 ノードアーキテクチャ

WDM 技術を用いない 1 本のパケットチャネルしかない。リモートリンクの場合、制御信号はカプラがバーストから抽出し、制御ユニットにおいて処理される。一方、多重分離(デマルチプレクス)されたバーストはスイッチマトリックスに送られる。等化、多重化、増幅の処理を受けたバーストと制御信号はカプラによって各リンクへと多重化される。ローカルリンクの場合、最初に複数の Ethernet フレームがバースト送信器でバーストに組み立てられる。次にこの光バーストはスイッチマトリックスに送られる。この 2 種類のバースト(それぞれ「リモートバースト」及び「ローカルバースト」と呼ぶ)はスイッチマトリックス内をカットスルーで通過し、制御信号内のルーティング情報に基づいて次のホップノード又はローカルバースト受信器へと転送される。バースト受信器はローカルスイッチマトリックスからバーストを受け取ったらそれを複数のパケットに分解し、それを従来の方法でレガシー IP 網に送り出す。

### 3.1 光スイッチングユニットの主な課題

光スイッチングユニットの設計で一番問題となるのは、光デバイスの限界と物理層の制約を踏まえた上で、高性能かつ透過的な光パスをいかに実現するかという点である。この目標を実現するためには、高性能な光デバイスとち密に設計された制御回路が必要となる。とりわけ光スイッチとパワーアンバランスの二つが問題となる。

今日では様々な光スイッチが存在するが[17]、速度、規模、信頼性を考えて市販の PLC スwitchを採用し、16×16 のノンブロッキングスイッチマトリックスを作製した。スイッチング速度は 3 ms 未満、挿入損失は 8 dB 未満である。

OBS ネットワークでは、異なるリンク間や波長間においてだけでなく、同一波長内でもパワーアンバランスが発生する。これは同一波長であってもバーストの発信元が異なったり通過するノードやパスが異なる可能性があるためである。このように急速なパワー変動は不安定性の原因となるばかりか、最悪の場合には障害を引き起こす。この問題を解決するため、我々はチャンネルレベルでのパワー等化方式を開発した。磁気光学式の変光減衰器 (VOA) アレイと高精度のフィードフォワード制御回路を用いることにより、パワー等化

を 3 ms 以内に終わらせることができる。これは VOA の応答時間とフィードフォワード処理を含んだ時間である。

### 3.2 CoS と波長選択に対応したバースト送信ユニット

OBS ネットワークにおける CoS と波長割当ての重要性を考え、バースト送受信ユニットの設計では CoS と波長選択を効率よくかつ柔軟にサポートすることに注力した。図 2 に示すような「3 段 FIFO+2 段スイッチ」の新しいバースト送信器アーキテクチャを提案し、それを Altera 社のハイエンド FPGA (フィールドプログラマブルゲートアレイ) によって実現した。3 段 FIFO (first-in first-out) をルーティング、バースト生成及びスケジューリングに使用する。1 段目のスイッチは送信先と CoS に基づいてバーストキューを分類し、2 段目のスイッチは波長選択を実行する。どのバーストもすべての波長を共用できるため、エッジノードは多様な波長割当てアルゴリズム——例えばランダムな割当てや優先度に基づく割当て[18]など——をサポートできる柔軟性を備える。バーストの生成に際しては、実装の簡略化のため同じ出口ノードあてのイーサフレームの集合、さらに IP トラフィックとの親和性を高めるため非同期・可変長となるようにした。また、非同期性によって同期化とバーストのアライメントが不要となり、実装が更に簡素化される。このバースト送信器の動作の詳細は以下のとおりである。

- (1) ギガビットイーサフレームは 1 段目の FIFO でバッファリングされたあと、出口ノードアドレスと CoS 属性に従って 2 段目の FIFO にスイッチングする。
- (2) 同一の 2 段目 FIFO にバッファリングされた複数個のフレームは、時間とデータ長に基づく生成方法[3]によって一つのバーストに組み立てられる。具体的に、生成時間又はバースト長のいずれかがしきい値に達したときにバーストが生成される。
- (3) チャンネルのスケジューリングが終わったら出力波長チャンネルと送出時間が決定される。生成されたバーストは 3 段目の FIFO にバッファリングされ、予定の時間になると送出される。

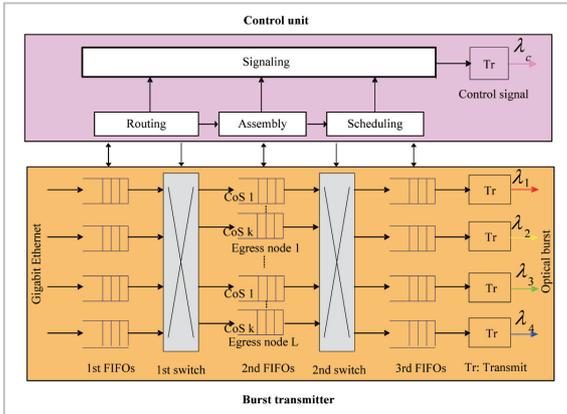


図2 バースト送信器と制御ユニット

## 4 衝突回避とバーストスケジューリング

バーストの転送は一方方向のコンネクションレスで行われる。光 RAM はまだ実用化されていないため、現在の OBS ネットワークでは衝突回避とバーストスケジューリングのほうが大きな課題となっている。衝突回避手法にはこれまでファイバ遅延線と波長変換が提案されてきたが、これらの方式が未成熟であること及び OBS ネットワークにとって完全な構成がまだ存在しないことから、他のアプローチの研究が必要になっている。衝突を効率よく減らし、かつバーストブロッキング率を下げることを目的として、シンプルなディフレクションルーティングプロトコル [19] 及び高度な波長割当てアルゴリズム (優先度に基づく波長割当て手法 (PWA) [18] という) が考案された。図 3 に示すように、ディフレクションルーティングでは衝突を起こすバーストに迂回パスを提供する。PWA では、各エッジノードが波長優先度データ

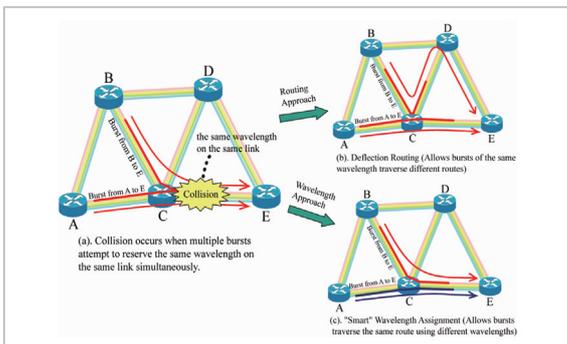


図3 ディフレクションルーティングと PWA の概念

ベースを管理する。このデータベースでは使用履歴の学習によって各波長があて先ごとに優先づけられ、動的に更新される。具体的には、バーストが正しく配信されたことを示す ACK をノードが受信すると、対応する波長の優先度を上げる。逆にバースト紛失を示す NACK を受信すると、対応する波長の優先度を下げる。波長を優先づけることにより、ノードは同じネットワークリンクを共有する個々のバーストに対して異なる波長を割り振る傾向を示すため、衝突の発生確率が低減される。

筆者らの OBS テストベッドでは、ち密に設計したバーストスケジューリング手法において上記二つの衝突回避方式を効率よく組み合わせた。制御信号において各バーストのディフレクション状態と障害理由を表すバースト状態情報を用いることで、ディフレクションルーティングの機能を活用しながら波長優先度を正しく更新することが可能になる。波長優先度データベース、スケジューリング情報テーブル及び転送手順を総合的に運用することにより、バーストブロッキング率の低下と帯域利用率の向上が実現する。バーストスケジューリング手順の詳細を以下に説明する。

スケジューリング情報は複数のスケジューリングテーブルに保存される。M 本の出力リンクをもち、各リンクに N 個のチャンネルがあるエッジノードには、 $M \times N$  個のスケジューリングテーブルがある。これを  $CST(m, n)$  で表記し、ここで  $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$  である。それぞれの  $CST(m, n)$  には、ある時間幅 TT に対応するスケジューリング情報が格納される。この情報にはスケジュールされる各バーストの開始時間と終了時間が含まれる。スケジューラは  $CST(m, n)$  を管理し、各チャンネルの未使用時間を記録する。

図 4 にバーストスケジューリング手順を示す。ローカルバーストの場合、この手続きは以下のステップに分けられる。

- (1) バーストが生成されると、その出力リンク L が取得される。スケジューラが  $CST(L, n)$  ( $1 \leq n \leq N$ ) を検索し、空き出力チャンネルの一つを見つける。この検索はチャンネル優先度に従って運用される。そのようなチャンネル C が存在したら下の (3) 項に進む。それ以外の場合は (2) 項に進む。

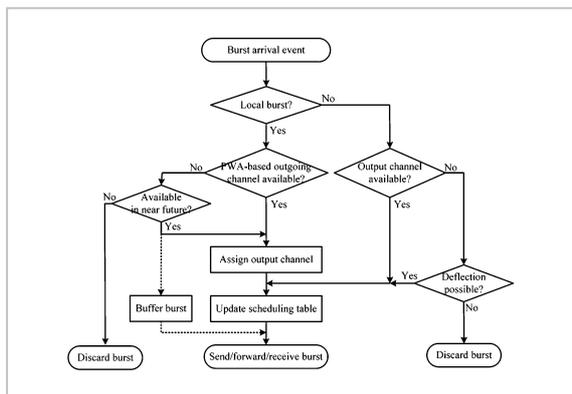


図4 バーストスケジューリング手順

- (2) スケジューラは TT 内の短い時間後に空き出力チャンネルがないか探す。見つければ(3)項に進む。見つからなければそのバーストは廃棄される。
- (3) 出力チャンネル C が割り当てられ、スケジューリングテーブル CST (L, C) が更新される。
- (4) バーストはバッファリングされ、予定の時間に送出される。

リモートバーストの場合、制御信号を解釈することによって出力リンク L と出力チャンネル C が取得される。その後、スケジューラは CST (L, C) を検索し、空いているかどうか調べる。空きが見つければ CST (L, C) を更新してバーストの転送又は受信を行う。見つからなければバーストは別経路に振り替えるか廃棄される。

このスケジューリング方式ではチャンネル優先度とスケジューリング情報の記録のために、それぞれ O (EN) と O (MN) のメモリが必要になる。ここで E はエッジノードの個数である。また、ランク付けした優先度リストの管理には O (logN) の時間が、適切な波長の発見には O (N) の時間がかかる。必要なメモリ容量はネットワークの規模に大きく左右される。しかし、最近は大容量メモリも価格が下がっているため容易に入手できる。優先度リストの管理と波長の選択に要する時間は波長の数のみに依存し、ノードの個数には関係しない。

## 5 評価と考察

筆者らが開発した OBS ノードを用いて光バーストスイッチネットワークテストベッドを構築した。その主な仕様を表 1 に示す。

表1 OBS テストベッドの仕様

項目		仕様
エッジノード	OBS WDM リンク数	2
	ローカル Ethernet リンク数	4
	パワー損失	< 0 dB
コアノード	OBS WDM リンク数	4
	パワー損失	< 0 dB
OBS WDM リンク	制御チャンネル	1510 nm, 100 Mb/s
	バーストチャンネル	1551.72, 1553.33, 1554.92, 1556.55 nm, 1.25 Gb/s
スイッチマトリックス (PLC)	ポート数	16×16
	スイッチング時間	3 ms
	挿入損失	< 8 dB
等化器 (VOA)	最大減衰量	15 dB
	分解能	1 dB
	応答時間	1 ms
増幅器 (EDFA)	出力パワー	> -2 dBm
	ゲイン平坦性	< 1dB
バースト送信器 (FPGA)	生成時間	0 ~ 32 s
	バースト長	72~15000 バイト

この OBS ネットワークテストベッドを使ってエンドツーエンド遅延、バーストブロッキング率、TCP スループットなどの重要な性能指標を評価し、考察した。さらにオンラインビデオサービスの実演も行った。図 5 はこの OBS ネットワークの実験構成を示した図である。3 台のエッジノードを 20 km 長の光ファイバで接続し、リング型ネットワークを構成した。バーストは時計回りの方向で伝送する。遅延と棄却率の実験では、Agilent ルータテストを用いて 3 台のクライアント

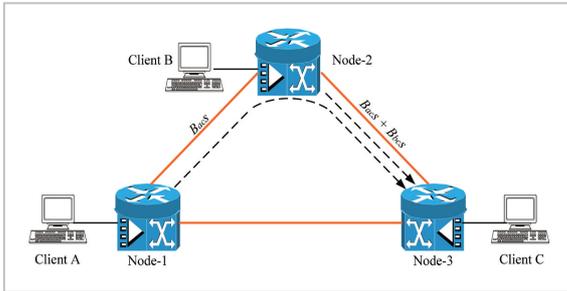


図5 実験用ネットワークの構成

トをエミュレートした。

### 5.1 エンドツーエンド遅延

IP パケットが OBS ネットワークに入ってからそれを出るまでに要する平均時間をエンドツーエンド遅延「D」と定義する。具体的には以下の四つの部分から成る。

$D_{in}$  : 入口ノードにおいて生じる遅延

TO : バーストと制御信号の時間差(オフセットタイム)

$D_t$  : 伝送遅延

$D_e$  : 出口ノードにおいて生じる遅延

OBS の特徴として、オフセットタイムはエンドツーエンド遅延における重要な要素である。そのためこれについて最初に論じる。既に述べたようなノードアーキテクチャ及び光デバイス特性を考え、光スイッチとパワー等化器の応答時間を補償するためのガードタイムを一方方向シグナリング手順に導入した。別の言い方をすると、バーストの到着よりガードタイムだけ早いタイミングで帯域予約を開始する。我々の OBS テストベッドの場合、測定されたガードタイムは 10 ms であった。制御信号処理のために余裕を残し、かつ伝送の信頼性を確保するため、今回の実験ではオフセットタイム TO を 13 ms とした。

バースト生成はエンドツーエンド遅延に対して大きな影響を与える。そのため、クライアント A と C との間のエンドツーエンド遅延を、バースト生成時間の関数として測定した。その結果をプロットしたのが図 6 である。今回の実験では  $D_t=0.2$  ms かつ  $D_e<1$  ms であるため、入口ノードにおいて生じる遅延もほぼ同じ軌跡を描いた。 $D_{in}$  はバースト生成時間よりも短いことが分かった。その原因は、各バーストについて生成処理の

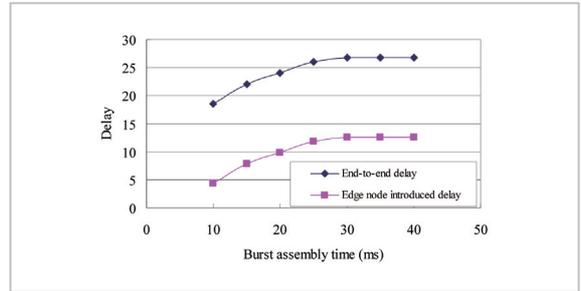


図6 遅延時間とバースト生成時間

全所要時間を待たねばならないのは最初のパケットのみであり、それ以外のパケットは待ち時間がそれより短い点にある。このほか、エンドツーエンド遅延の主な要因が入口ノードにおけるバースト処理時間とガードタイムであることも観察された。前者の主な要因はバースト生成とスケジューリングであり、後者の主な要因は光スイッチマトリックスの性能である。

### 5.2 バーストブロッキング率

バーストブロッキング率は通常、衝突回避の有効性評価のために使用される。今回の実験では、衝突回避なし、PWA のみ及びディフレクションのみ、という三つの場合についてバーストブロッキング率を測定した。各クライアントはそれぞれ他の二つのクライアントに IP パケットを送信する。生成されたバーストを時計回りの方向に転送した。ディフレクションルーティングの場合、衝突を起こすバーストは反時計回りの方向に迂回される。実験ではノード間距離が短いため、あて先ノードで生じた二回目の衝突は無視した。

実験結果をプロットしたのが図 7 である。全ノードで生成されたバーストを測定してそれをネットワークトラフィックとし、平均の bps (ビット毎秒) 値で表した。PWA とディフレクションルーティングを別々に実施したところ、衝突回避をしなかったときに比べてバーストブロッキング率は低下した。このことはネットワークトラフィックが多くないときに顕著であった。ディフレクションルーティングのほうが PWA より大きな効果があることが分かった。これは迂回路のほうが本来の経路よりもトラフィック負荷が小さいためである。そのため迂回したバーストのほとんどが先に到達できた。

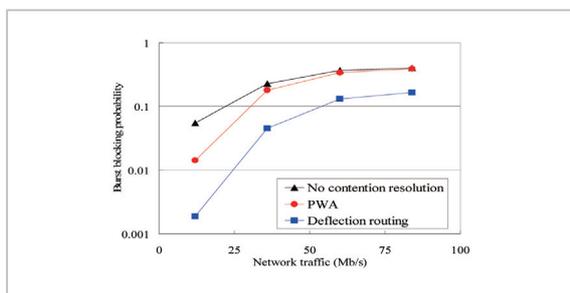


図7 バーストブロッキング率とネットワークトラフィックの関係

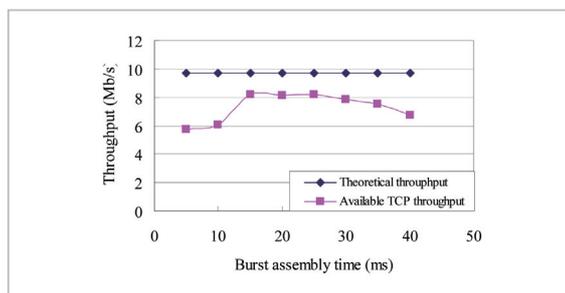


図8 スループットとバースト生成時間の関係

### 5.3 TCPスループット

TCPトラフィックは最も一般的なトラフィック種別であり、将来のインターネットにおいてもそうである可能性がある。そのため、OBSネットワークでTCPの性能調査を行うことは重要である。TCPはスロースタート、輻輳回避及び再送の機能を用いることによって、信頼性に欠けるネットワークレイヤの上に信頼性のあるトランスポートレイヤを構築する。OBSネットワークの場合、これらの機能は文献[20][21]に記載されるようなバースト生成アルゴリズム、バースト損失率及びバースト損失パターンによって影響を受けると考えられる。端的に言えば、OBSネットワークでは遅延、損失率、再送が増えるためにTCPスループットは低下する。一方、一つのバーストには複数のパケットが含まれるため、TCPはそれだけ大きい送信ウィンドウを確保でき、TCPスループットは向上する。

TCPスループットとバースト生成時間の関係を実験によって確かめた。図8に示すのは、クライアントAとCとの間の1波長における論理的スループットと実際のTCPスループットである。図は、OBSネットワークでTCPの性能が劣化したことを示している。このほか最適な生成時間が存在することも観察された。この現象は次のように説明できる。Aの場合はガードタイムが長いから、生成時間が短いとエッジノード内でのバースト紛失が増える、一方Bの場合は生成時間が長いとそれだけ遅延も大きくなる、よっていずれの場合もTCPスループットは最適生成時間の場合より低下する。

### 5.4 応用実験

図9に示すように、ビデオストリームデータのオンラインリアルタイム伝送をOBSテストベッドによって実演した。この実演において三つのクライアントは3台のパソコンであり、ノード2はインターネットに接続されている。2種類のリアルタイムビデオサービスを同時に実演することに成功した。一つはTCPによるAB間のビデオオンデマンドサービスである。もう一つは、UDPによるAC間のライブビデオチャットサービスであり、Windows Messengerをインターネット経由で使用した。ノード2では、これら2種類のビデオストリームの動的スイッチングがモニタできた。IP網との相互運用性のほか、実時性が要求されるTCP/UDPベースのビデオサービスがOBSテストベッド上で提供できることが検証された。

### 5.5 考察

上述の実験結果から、OBSネットワークの性能を決定する主な因子がバースト生成、光スイッチング及び衝突回避であることが分かる。エンド

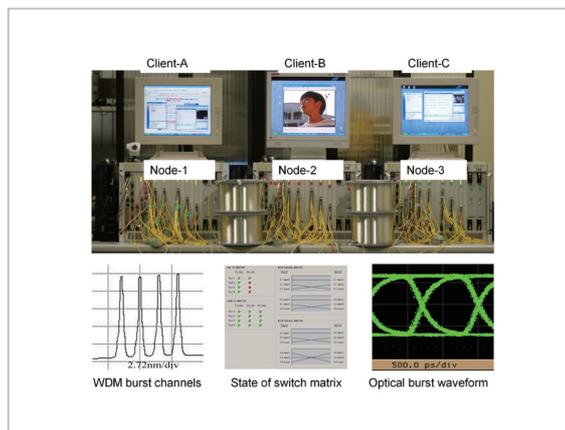


図9 OBSテストベッドを用いた応用実験

ツーエンド遅延は中継ノード数が増えるにつれて緩やかに増加する。これは、一方向シグナリングとカットスルー方式のバーストスイッチングによる。この点は拡張性にとって大きなメリットとなる。また、光スイッチの高速化とバースト処理の最適化は、遅延を効果的に短縮するものと期待される。これら二つのアプローチは、もう一つの重要な性能指標である帯域効率も改善し得る。帯域効率は、バースト長(時間領域)とバースト長+ガードタイムの和との比として定義される。現在の実装条件では、バースト長はFPGA内で使用できるメモリ容量の制限を受けるため、長いガードタイムに比べて小さい。そのため帯域効率は低く抑えられる。しかし専用の大容量メモリを用い、かつ高速スイッチを採用すれば、帯域効率は大幅に改善できる。OBSノードはモジュール設計であるため、ここで論じている性能の改善は、バースト送受信ユニットとスイッチの基板を交換することで実現できる。また、棄却率を下げるためには波長変換器や光バッファなどの新たなアイデアを検討する必要がある。

## 参考文献

- 1 J.S.Turner, "Terabit Burst Switching", J. High Speed Networks, Vol.8, No.1, pp.3-16, Jan.1999.
- 2 C.Qiao and M.Yoo, "Optical Burst Switching (OBS) - A New Paradigm for an Optical Internet", J. High Speed Networks, Vol.8, No.1, pp.69-84, Jan. 1999.
- 3 Y.Xiong, M.Vandenhoute, and H.Cankaya, "Control Architecture in Optical Burst-Switched WDM Networks", IEEE JSAC, Vol.18, No.10, pp.1838-1851, Oct. 2000.
- 4 L.Xu, H.G.Perros, and G.N.Rouskas, "Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching", IEEE Commun. Mag., Vol.39, No.1, pp.136-142, Jan. 2001.
- 5 V.M.Vokkarane, J.P.Jue, and S.Sitaraman, "Burst Segmentation: An Approach for Reducing Packet Loss in Optical Burst Switched Networks", Proc. ICC 2002, New York, NY, Apr. 2002.
- 6 S.Ovadia, C.Maciocco, M.Paniccia, and R.Rajaduray, "Photonics Burst Switching (PBS) Architecture for Hop and Span-Constrained Optical Networks", IEEE Commun. Mag., Vol.41, no.11, pp.s24-s32, Nov. 2003.
- 7 J.Li, C.Qiao, and Y.Chen, "Recent Progress in the Scheduling Algorithms in Optical-Burst-Switched Networks", J. Optical Networking, Vol.3, No.4, pp.229-241, Apr. 2004.
- 8 Y.Chen, C.Qiao and X.Yu, "Optical Burst Switching: A New Area in Optical Networking Research", IEEE Network, Vol.18, No.3, pp.16-23, May/Jun. 2004.
- 9 F.Masetti et al., "Design and Implementation of a Multi-Terabit Optical Burst/Package Router Prototype", Proc. OFC 2002, pp.FD1-1-FD1-3, Anaheim, CA, Mar. 2002.

## 6 まとめ

本稿では汎用 OBS テストベッドの設計、実装及び実験について説明した。このテストベッドは各種のトラフィックとプロトコルをサポートするほか、高度なデバイスを用いることでシステムのアップグレードが簡単に行える。また、重要な設計パラメータ(生成時間のしきい値など)が実験研究に応じて容易に変更できる。このテストベッドを用いて性能の評価と考察を行ったほか、オンラインビデオサービスを実演した。総合的な OBS 機能を備えたテストベッドを実装・実演するのは、我々の知る限りこれが世界初である。今後性能をより改善すれば、将来の光インターネットに向けた実用的ソリューションが提供できるものと期待される。

## 謝辞

本稿の研究に当たっては独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の支援を受けた。また、NTT エレクトロニクス株式会社による貴重な議論と技術的支援に対して深く感謝の意を表したい。

- 10 I.Baldine, M.Cassada, A.Bragg, G.Karmous-Edwards, and D.Stevenson, "Just-in-Time Optical Burst Switching Implementation in the ATDnet All-Optical Networking Testbed", Proc. Globecom 2003, pp.2777-2781, San Francisco, CA, Dec. 2003.
- 11 A.Sahara et al., "Demonstration of Optical Burst Switching Network Utilizing PLC and MEMS Switches with GMPLS Control", Proc. ECOC 2004, pp.896-897, Stockholm, Sweden, Sep. 2004.
- 12 K.Kitayama, M.Koga, H.Morikawa, S.Hara, and M.Kawai, "Optical Burst Switching Network Testbed in Japan", Proc. OFC2005, OWC3, Anaheim, USA, Mar. 2005.
- 13 H.Guo et al., "A Testbed for Optical Burst Switching Network", OFC2005, OFA6, Anaheim, USA, Mar. 2005.
- 14 H.Yoo et al., "Microsecond Optical Burst Add-Drop Multiplexing for WDM Ring Networks", Proc. COIN2005, pp.78-80, Chongqing, China, May-Jun. 2005.
- 15 I.Baldine, G.Rouskas, H.Perros, and D.Stevenson, "JumpStart: a Just-in-Time Signaling Architecture for WDM Burst-Switched Networks", IEEE Commun. Mag., Vol.40, No.2, pp.82-89, Feb. 2002.
- 16 Y.Sun, T.Hashiguchi, V.Minh, X.Wang, H.Morikawa, and T.Aoyama: "Design and Implementation of an Optical Burst-Switched Network Testbed", IEEE Commun. Mag., Vol.43, No.11, pp.s48-s55, Nov. 2005.
- 17 X.Ma and G.S.Kuo, "Optical Switching Technology Comparison: Optical MEMS vs. Other Technologies", IEEE Commun. Mag., Vol.41, No.11, pp.s16- s23, Nov. 2003.
- 18 X.Wang, H.Morikawa, and T.Aoyama, "Priority-based Wavelength Assignment Algorithm for Burst Switched WDM Optical Networks", IEICE Trans. Commun., Vol.E86-B, No.5, pp.1508-1514, May 2003.
- 19 X.Wang, H.Morikawa, and T.Aoyama, "Burst Optical Deflection Routing Protocol for Wavelength Routing WDM Networks", Opt. Net. Mag., Vol.3, No.6, pp.12-19, Nov./ Dec. 2002.
- 20 A.Detti and M.Listanti, "Impact of Segments Aggregation on TCP Reno Flows in Optical Burst Switching Networks", Proc INFOCOM, Vol.3, pp.1803-1812, 2002.
- 21 X.Yu, J.Li, X.Cao, Y.Chen, and C.Qiao, "Traffic Statistics and Performance Evaluation in Optical Burst Switched Networks", J. Lightwave Technology, Vol.22, No.12, pp.2722-2738, Dec. 2004.



**孫 咏梅 (Yongmei Sun)**  
 東京大学大学院情報理工学系研究科  
 博士 (工学)  
 フォトニックネットワーク



はしぐちひろ  
**橋口知弘**  
 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
 博士 (科学)  
 フォトニックネットワーク



**ヴー クァン ミン (Vu Quang Minh)**  
 東京大学大学院情報理工学系研究科  
 フォトニックネットワーク



**王 溪 (Xi Wang)**  
 東京大学大学院情報理工学系研究科特  
 任助手 博士 (工学)  
 フォトニックネットワーク



いまいひであき  
**今泉英明**  
 東京大学大学院情報理工学系研究科特  
 任助手 博士 (政策・メディア)  
 インターネットアーキテクチャ、ルー  
 ティング、フォトニックネットワーク



もりかわひろゆき  
**森川博之**  
 東京大学大学院新領域創成科学研究科  
 基盤情報学専攻助教授 博士 (工学)  
 ユビキタスネットワーク、モバイルネ  
 ットワーク



あおやまとものり  
**青山友紀**  
 東京大学大学院情報理工学系研究科電  
 子情報学専攻教授 工学博士  
 フォトニックネットワーク、ユビキ  
 タスネットワーク