

大学の研究・動向

フォトニックネットワーキング

情報学研究科 通信情報システム専攻

教授 高橋 達郎

takahasi@i.kyoto-u.ac.jp

助教授 朝香 卓也

asaka@i.kyoto-u.ac.jp

助手 新熊 亮一

shinkuma@i.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

光通信は、光伝送路の持つ広帯域性や光デバイス的高速性によりめざましい進歩を遂げている。1本のケーブルに異なる波長を持つ複数の光源からの信号を多重伝送する波長多重伝送がバックボーンネットワークに利用されている。1990年代後半から始まった、爆発的なインターネットトラフィックの増大を、光通信の高速化と多波長化が支えたと言っても過言ではない。

利用可能な波長の増加と共に、波長を2点間の大容量伝送に利用することにとどまらず、ネットワーク内のルーティングにも用いる、フォトニックネットワーキングが注目されている。本稿では、将来のバックボーンネットワーク技術と目されるフォトニックネットワーキングの研究状況を述べる。

2. フォトニックネットワーキングの発展段階

光伝送技術はめざましい進歩を遂げ、高速・大容量システムが利用され始めている。ベンダー各社は高速で高多重なシステムをラインアップしており、1本の光ケーブルあたり320波、1波毎の信号伝送速度10Gbpsの光伝送システムが（カタログ上の）フラッグシップ機種となっている。光ケーブルあたりの伝送容量はテラビットを超えている。一方、パケットをルーティングするルータは、現在電気回路で構成されており、ルータが収容可能な最大回線容量は、数百Gbpsのレベルにある。複数の伝送リンクを収容するノードシステムの容量が、リンク1本の容量を下回るアンバランスな状態にある。光技術の持つ高速性・並列性といった特徴を生かした大容量ノードの実現技術や、波長を用いた柔軟で効率的なネットワーキングの実現が期待されている。

情報源としてインターネットなどのパケット型通信を対象としたバックボーンネットワークにおける波長の利用には、図1に示す次の3段階が考えられる。最初のステップは、2点間の光ファイバー伝送において波長多重伝送を適用する段階であり、現在実利用が進められている。第2ステップは「光クロスコネク」を用いて、波長単

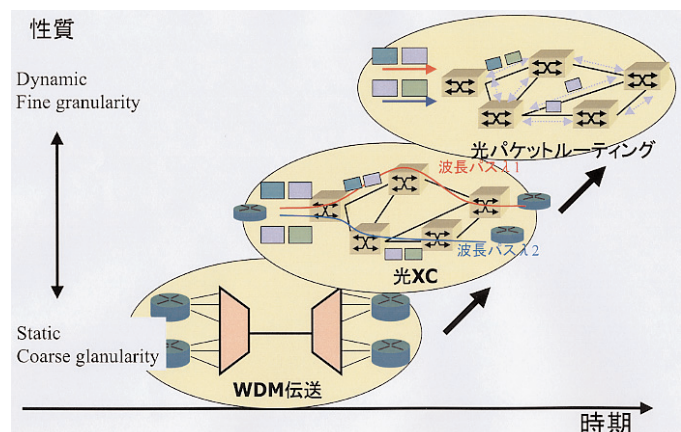


図1. フォトニックネットワーキング

位でネットワークのトポロジーをダイナミックに制御する。中継ノードで波長単位にルートを切り替えることができるため、1本のファイバーに異なる宛先の情報を多重化できる。光クロスコネクタは、光信号を電気信号に変換することなく光信号のまま中継するため、中継ノードを低コストで実現できる。比較的早期の実用化が期待され、さまざまなベンダーが開発を競っている。2002年のSupercomm展示会では、複数のベンダー間の相互接続実験が行われている。光クロスコネクタを用いる方式は、波長の制御に現在の電気ネットワークを用いることが可能で、切り替えの動作も低速でよい実現にあたってのハードルは低い。一方、中継ノードでは波長単位に切り替えるため、ノード相互間に1波長分の伝送容量に匹敵する大規模なパケットトラフィックが存在しない場合には効率が悪くなる。第3ステップは、パケット単位でルーティングを行う「光パケットルーティング」である。きめ細かなルーティングが可能のため、光技術の適用領域を拡大できる。一方、光による高速なスイッチングやヘッダ処理を含むルーティング制御など、その実現に向けた課題は多い。

3. 光パケットルーティング

光パケットルーティング実現の最大の課題は、パケット衝突時のバッファリングである。電気ルータでは、高速・大容量で安価なRAMを用いて、一時的な可変長パケットの蓄積により、回線の使用効率を高めることができる。一方光領域では、効率的なメモリデバイスが実現されていない。一定長の光ケーブルが固定時間の遅延素子として用いられる程度である。そのため、RAMによるパケットバッファを用いずに、光パケットルータを実現する方法が各種検討されている。代表的な方法として、①MACプロトコルの利用、②バーストルーティング、③遅延線によるパケットバッファリング等がある。

LAN等で用いられるMAC（メディアアクセス制御）プロトコルは、複数のユーザが伝送システムを共同利用するための規約であり、各端末がプロトコルに従って通信することにより、集中的な管理システムを用いずに、効率的な通信を行うことができる。MACプロトコルの中で衝突回避型のプロトコルを用いることにより、光領域でのバッファを不要にすることができる。主にメトロポリタンエリアネットワークを対象に、検討が進められている。しかしながら、この方式は適用距離が制約されるとともに、リングシステムなどのトポロジー上の制約もある。

バーストルーティングは図2に示すように、データの送信に先立って、ネットワークリソースを確保するための制御フレームが転送される。中継ノードは、リクエストフレームを受信した後、データフレームが到着するまでに次回線の空き波長を捕捉し、光スイッチを制御して次回線までのルートを予め設定しておく。回線交換同様に、予め経路を設定することにより、バッファを不要にする方式である。リクエストフレームを送信してから、実際にデータが送信されるまでのガードタイムが必要になる。ガードタイムの影響を限定するために、長いデータとする必要がある。バーストルーティングと呼ばれている。端末からのデータ送信が現状のインターネットプロトコルの場合には、バックボーンネットワークの出入り口で、パケットとバーストの変換が必要になる。国内でも、室内実験が始められている。

遅延線によりバッファを実現する試みもある。遅延時間の異なる各種の遅延線を用

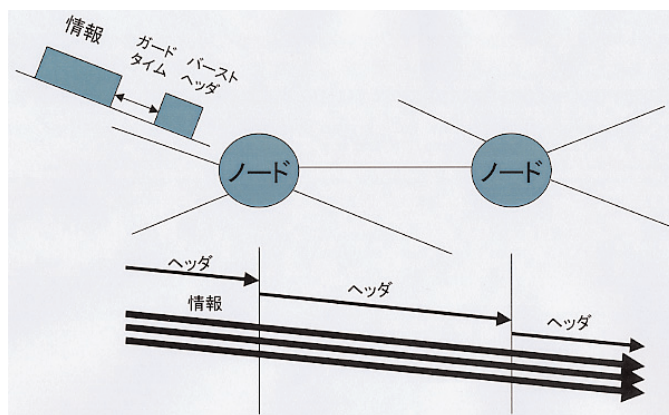


図2. バーストルーティングの原理

意し、信号の経路を切り替えることにより可変長パケットのバッファリングを行うことも不可能ではない。図3は、波長多重されたN本の入出力に対して、遅延時間の異なるD本の内部リンクを用い、波長変換可能な多段の光スイッチと遅延線群を組み合わせて、衝突を回避しながらルーティングを行う提案である。

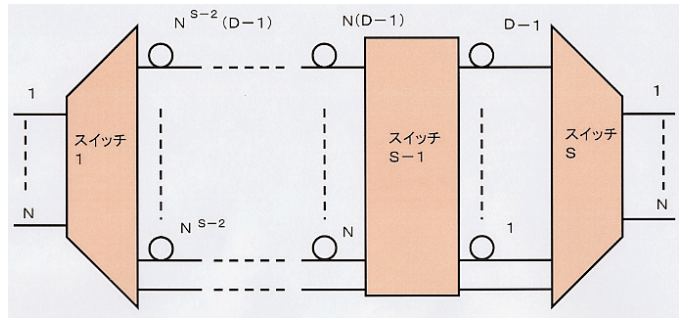


図3. 遅延線を用いたパケットルータ

4. 電気エッジルータを共通バッファとして用いる光ルータ

光パケットルータ実現に向けた現実的なアプローチとして、電気で構成されるエッジルータを、光ルータの共通バッファとしても活用する方法を提案している。図4にネットワークモデルを示す。ユーザから集められたパケットは、エッジノードで波長多重され、バックボーンネットワークに送り込まれる。バックボーンネットワークはWDM伝送路がコアノード相互間を接続し、コアノードでは光スイッチにより、パケット単位にルートを選択と波長の変換が行われる。コアノードは大都市などのパケットトラフィックを大量に発生する場所に設置されるため、一般にエッジノードも併置される。併置されたエッジノードを光スイッチのパケットバッファとしても併用すれば、光パケットルーティングのバッファ問題を解決できる。

図5は提案システムのアーキテクチャを示している。到着したパケットのヘッダ処理により出力先を選択し、出力回線に空きがあれば送信される。空きが無い場合は、バッファリングのためにエッジルータに転送され、出力回線に空きができるまで待たされる。入力部の遅延線は、ヘッダ処理に要する固定時間パケットを待たせるものである。このシステムでは、同時に多数のパケットがエッジルータに迂回するとパケット廃棄が発生する。一方、光の高速性を生かし経済的なシステムとするためには、システム容量に比べてバッファ帯域を十分小さなものとする必要がある。また、バッファリングされるパケットと、光のままカットスルー接続されるパケットで、ノード内の接続ルートが異なるため、パケットの順序逆転が発生することがある。従って、小さなバッファ帯域でパケットの順序逆転を防ぐ制御方法が必要となる。

近年のLANの高速化は著しいものの、バックボーン回線に比べると1桁以上速度が遅い。従ってバッファでの遅延時間を一定の範囲に収めることができればパケットの順序逆転を避けることができる。図6は、バッファでのQ長に応じて、バッファが捕捉する出回線の帯域を適応的に制御する場合の、順序逆転確率を評価している。バッファ帯域はノード容量の1/8である。LANや端末の伝送速

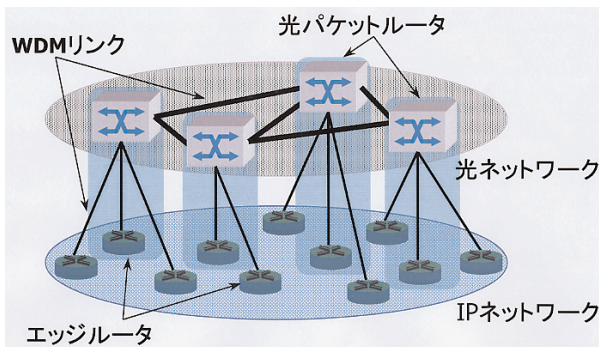


図4. ネットワーク構成

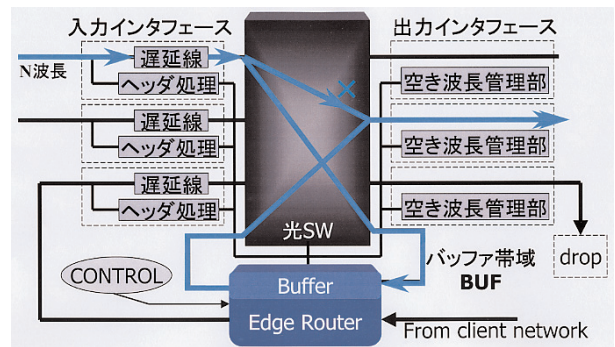


図5. エッジルータ共通バッファとして用いる光ルータ

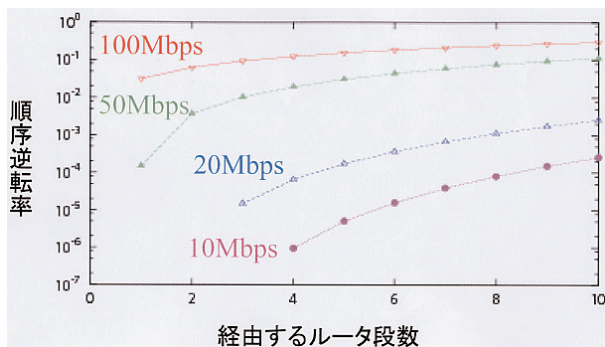
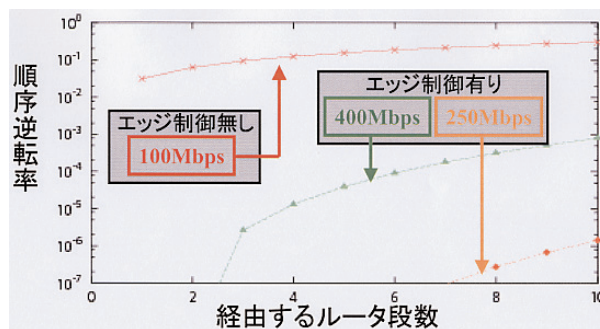


図 6. パケットの順序逆転確率（エッジ制御無し）

図 7. パケットの順序逆転確率（廃棄率 10^{-6} ）

度が10Mbps以下であれば、経路するコアノードが数ノードの範囲で、パケットの順序逆転を確率 10^{-5} 以下とできることを示している。

LANの高速化動向から、更に高速な回線もカバーできることが望まれる。そのため、出回線の状況に応じてエッジからの送信パケット速度を適応的に制御する方法を検討した。出力回線がふくそうすると、パケットがバッファに迂回する。迂回するパケット量に応じて、同一ルートへ向かうエッジからのパケットを一時待たせることにすれば、バッファへ迂回するトラフィック量を減らすとともに、バッファでの遅延時間も短縮することができる。エッジでの遅延時間は増大するものの、パケットの順序逆転は起こさない。ある制御パラメータでの性能評価例を図7に示す。順序逆転確率 10^{-5} の領域を数百MbpsのLANまで拡張できていることがわかる。制御パラメータのさらなるチューニングや回線能率を若干制限することにより、ギガイーサの領域までカバーでき、光ルータにおけるバッファ構成方法の近未来の解のひとつとして期待できる。

5. おわりに

フォトニックネットワーク技術の状況を述べた。デジタルカメラ付き携帯の急速な普及に象徴されるように、マルチメディアトラフィックがネットワークの容量を更に押し上げるのは確実であり、光技術のニーズは今後も拡大すると予想される。大量のパケットトラフィックを光領域でさばく光パケットルーティングの実現には、光デバイスはもとより、さまざまな方式的なアイデアが期待される。