

フォトニックネットワークの構成法に関する研究

A study on photonic Network Architecture

原井洋明 久保田文人
Hiroaki HARAI and Fumito KUBOTA

要旨

光技術はネットワークを大容量にするといわれ、光パスを用いたフォトニックネットワークが構築されつつある。我々はさらにトラヒックの増加する将来を対象に、光パケット交換を用いたフォトニックネットワークの構成法を研究している。さまざまな通信トラヒックが集中するバックボーンに本ネットワークを適用するためには、より大容量、高スループット、高機能に拡張することが不可欠である。そのために必要となるネットワークアーキテクチャ、パケット衝突の回避、高効率化、高信頼化、高機能化、ネットワークの移行などの課題を列挙し、それぞれの研究計画を述べる。

We study photonic network architecture based on photonic packet switching. The architecture is promising in one or two decades, when the amount of traffic is increased tremendously. In order to apply our architecture to a backbone area of a network, it is inevitable to construct a photonic network that has a large link capacity, high-throughput node capability, and intelligency. We mention problems that should be solved for the application. These are related to our future plan, which is to investigate on efficient contention resolution, efficient routing, reliability and migration as well as network architecture itself.

1 はじめに

インターネットの爆発的な普及に伴い、ネットワークが処理すべき通信量は急速に増加している。すでに電話(音声)トラヒック量を上回ったデータトラヒックを転送するのに効率的なパケット交換型の大容量ネットワーク構築が期待されている。バックボーンの中継ノードでは、テラビットからペタビット級のトラヒック中継能力(スループット)が必要になる可能性がある。既存のIP(Internet protocol)ルータやATM(asynchronous transfer mode)交換機のように電子技術による中継処理では、パケットのヘッダ処理等においてメモリのアクセス速度やLSIの動作速度が制約になり、中継処理能力が限界に達する。そのため、大容量ネットワークの実現には、光技術が不可欠といわれている。

光技術の中継ノードに用いると、光ファイバを通過する広帯域の信号を光電変換なしで中継

できる。すなわち、エッジノードから送出されたデータが、電気的な変換なく受信エッジノードまで転送されるいわゆるフォトニックネットワークを構成する。フォトニックネットワークの導入は、中継ノード装置の簡素化、伝送路の高速(高ビットレート)化、ネットワーク全体の低コスト化が期待できるなどメリットが大きい。

フォトニックネットワークの適用領域にはいろいろあるが、我々が対象とする領域はFTTH(fiber to the home)など一般家庭のアクセス系や企業内・学内LAN[1]ではなく、それらのエンドユーザから送出されたトラヒックが集中するバックボーン領域である。バックボーンを対象に、伝送リンクと中継ノードを光技術によって大容量高スループットにし、トラヒック制御によってさらにネットワークスループット(本稿での定義はバックボーンのエッジノードで受け取るトラヒック量の総和)を改善することが我々の研究

目的である。

バックボーンネットワーク構築に関わりのある光技術の動向をみると、伝送リンクでは波長分割多重(WDM; wavelength division multiplexing) 技術を用いて1ファイバあたり100Gbps以上のトラヒックを伝送する装置が商用化されている。実験レベルではすでに数Tbpsになっている。これらは1.55 μm 帯における光の広帯域性を利用し、光ファイバに1波あたり2.5~10Gbpsの光信号を複数波多重して実現する。WDM光信号が流れる光ファイバの束を中継ノード間に提供することによって、大容量のリンクをもつネットワークを構築できる(例えば[2])。また、既設のシングルモードファイバを利用できるので、低コストで大容量のリンクができる。

中継ノードにおいても光技術が適用され、光付加分岐装置(OADM; optical add-drop multiplexer)、光クロスコネクタ(OXC; optical cross-connect) 等が商用になっている。光MEMS(micro-electro-mechanical switch)などを用いて、大規模なOXCの開発も行なわれている。ネットワーク構成に関する研究もなされ[3][4]、これらを組み合わせれば、大容量のフォトニックネットワークを構成できる。

ところが、OXCは広帯域性に富む一方で中継ノードの機能が少なく、WDMリンクの一波の帯域に対して、データが占める割合(トラヒック収容効率)が小さくなる場合もある。OXCを用いれば隣接しないノード間に光信号を転送できるが、高スループット、高効率化という点で課題が残る。トラヒック収容効率を増すには中継ノードでのパケット交換処理が有効であり、中継処理の高速化には光レベルでのパケット交換が望ましい。

そこで我々は、大容量かつ高スループットネットワークの実現を目指して、フォトニックネットワークの一方式である光パケット交換ネットワークを対象とした研究を行なっている[5][6][7][8]。具体的には大容量光ネットワークアーキテクチャ、中継ノードのスループット向上のための競合制御、ネットワーク内資源を有効利用し、ネットワークスループットを向上するための経路制御の検討である。また、既存のIPネットワークやSONET/SDH(synchronous optical net-

work/ synchronous digital hierarchy) のように故障回復を自動的に行ない、ネットワークが高い信頼性を持つことも不可欠である。

ただし、現状でこれらすべてを光技術のみで実現するのは難しい。本研究では、電子処理技術を最小限に抑えつつ、光のメリットを最大限に活用した光パケット交換ネットワークを構成する。光パケット交換機とよばれるものは、[9][10][11][12][13][14]等が提案されているが、それと本研究で検討する光パケット交換機の違いは**2**で述べる。

光技術はトータルのネットワークスループットを増やし、ユーザー一人あたり、より大きな帯域を利用したデータ通信を行なうことができる。一方で、ユーザーごとにさまざまなサービス品質(QoS)を提供することは難しい。QoSには複雑なキューイング処理やルーチング処理を要するため、電子処理技術によって行なうことが現実的である。ところが、これらの処理をネットワーク内で行なうと、光技術によるメリットを活かせず、スループット低下の要因になる。スループットを低下させずQoSを提供するためには、光技術と電子技術の棲み分けが必要で、QoSはネットワークの出入口において電子技術で提供するのが有効である。さらにネットワークスループットを高く維持するために、入口でのトラヒック制御も有用である。すなわち、我々は、電子技術によるエッジノードシステムの高機能化も検討する。以上のネットワークの機能分担を図1に示す。

以下に本稿の構成を示す。まず、**2**において光ネットワークアーキテクチャの進展を簡単に述べ、**3**で我々が提案している光ネットワークアー

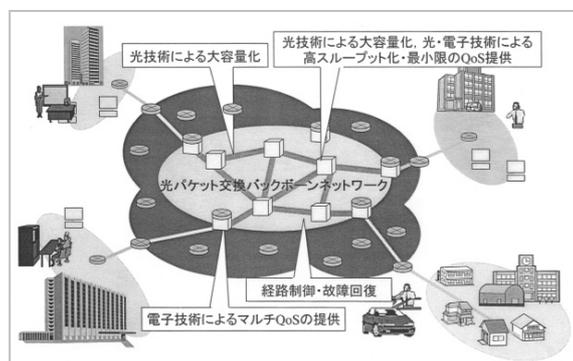


図1 バックボーンネットワークの機能分担

キテクチャについて説明する。4で今後計画する研究について述べる。最後に5で本稿のまとめを行なう。

2 光ネットワークアーキテクチャの進展

2.1 WDMリンクネットワーク

中継ノードに電子技術を用い、ノード間の伝送リンクをWDM技術で大容量にしたネットワークである。例えばIP over WDM^{[2][15]}があげはまる。IP over WDMの中継ノード(ルータ)ではIPパケットのヘッダをルーティング表と比較し、出力ポートを決定する(以降フォワーディングと呼ぶ)。ルータへ到着するトラフィック量が多くなると、ルーティング表を構成するメモリへのアクセス速度がボトルネックとなって、ルータに到着するパケットをすべて処理できなくなる。リンク容量の増加と比べて、電気技術による処理能力の伸びは小さく^[16]、WDM伝送技術の導入がネットワークスループットの大幅増加をもたらすとは限らない。また、送受信端末間の中継ノードが多くなると、中継ノードでの遅延が問題になる。

2.2 WDM光パスネットワーク

現在、パケット交換型ネットワークアーキテクチャにおいて、WDMリンクを流れるトラフィックの一部をOXC、OADMのみで中継する手法が注目されている。すべてのトラフィックをOXCのみで中継すれば(WDM)光パスネットワーク^[3]とよばれるフォトニックネットワークとなる。送信ノードではデータがある波長の光信号に変換され、ネットワークに流れる。OXCでは波長が識別子となり、適切な下流リンクに光信号を中継する。波長を受信ノードの識別子として与えることもできるが、ネットワークを大規模にする場合には、適切な手段ではない。長距離伝送に利用できる波長は100波から数1000波といわれるため、ネットワーク内の受信ノード数が制限されるからである。

パケット交換網を大容量にするためにWDMとOXCを導入するネットワークにはいろいろ提案がある。IPネットワークの視点からみれば、

それはMP λ S(multi-protocol lambda switching)^[17]を用いたIP over WDMネットワークである。一方、光技術の視点からみたネットワークには光パスネットワーク^[3]、マルチホップ光パスネットワーク^[4]等である。以降IP over WDMネットワークを例にとってWDM光パスネットワークの特徴を述べる。ただし、いずれのネットワークにもこれらの特徴は共通する。

先述のように、OXCは波長ごとの振分け処理を行ない、パケットレベルの処理を行なわない。従って、あるルータに入力されたトラフィックの一部をOXCで中継することで、そのルータの下流にあたるルータは別のトラフィックを中継することができる。その結果、ネットワークスループットは増加する。また、OXCで中継したトラフィックの送受信間の遅延は減少する。

ただし、ファイバへのトラフィック収容効率の点で課題がある。OXCは異なる方路から入力された同一波長のデータを、同一波長同一出力ポートに多重できない。IPパケットへの波長割当は、ルータにおいてIPルーティング表を参照して決められるため、一波のトラフィックが非常に少ない状況が起こりうる。OXCは異なる方路からのトラフィックをその波長に流すことはできず、波長が提供する帯域を有効利用できない。

波長の帯域(伝送容量)を有効利用するには2つの代表的な手法がある。ひとつは波長の帯域を下げ、波長数を増やすことである。1000波多重も現実的なものとなりつつあり^[18]、それを用いたネットワーク構成手法の検討も行なわれている^[19]。しかし、テラビットからペタビット級のトラフィックを扱う場合、中継ノードを構成する光処理装置数が多くなり、規模やコストの面で課題が残る。もう一つは^{[20][21][4][22]}等をルーティング(ネットワークのトポロジ情報などを用いて、中継ノードに入ったトラフィックの出力方路を示すルーティング表を作成する処理)に適用することである。その結果、トラフィックの少ない宛先が複数あれば、ルータでそのトラフィックを一つの波長に収容するようにルーティングし、波長の帯域を有効利用できる。ただし、先述のように電子処理技術によるパケット交換処理能力には限界があり、次節に示す光レイヤにおけるパケット交換を実現することが望ましい。

2.3 光パケット交換ネットワーク

光パケット交換機を用いたネットワークは、中継ノードでパケット交換処理を行なうフォトニックネットワークである。パケットのデータ部分が途中で電気信号に変換されることはない。OXCと異なり、あるポートから入力された同一波長のパケットを、複数のポートにスイッチングしたり、複数ポートから入力されたパケットを同一ポートに出力したりできるので、リンクへのトラヒック収容効率が良い。光パケット交換ネットワークはフォワーディング手法の違いにより以下の2つに分類できる。

2.3.1 電子アドレス処理

パケットのヘッダを光電変換し、フォワーディング(アドレス処理)を行なう手法である。本方法を用いた光パケット交換機の研究開発は多くの機関でなされており、ノードシステムとして一波あたり10Gbps程度の伝送リンクをもつ交換機プロトタイプが開発されている[9][10][11][12][13][14]。この交換機はリンクへ効率的にトラヒックを収容できる。しかし、伝送リンクを高速にすると電子アドレス処理が難しくなるため、伝送路の高速化、装置の簡素化がじゅうぶんにできない可能性がある。パケット交換装置はOXCと比べて複雑であるため、伝送路の高速化ができなければ、WDM光バスネットワークよりも飛躍的なメリットがあるとはいいがたい。

ヘッダの伝送速度を低速にして電子処理を容易にし、データ部分を高速にしてネットワークを大容量にする手法も提案されている[13]。しかし、この手法はヘッダ対パケット時間比が大きく、ネットワークスループットがじゅうぶんに得られない要因になる。なお、固定長パケットをスイッチングするパケット交換機は光ATM交

換機とも呼ばれている。

2.3.2 光アドレス処理

パケットのヘッダとルーチング表を光学的に照合(光アドレス処理)し、高速フォワーディング処理を可能にする。電氣的な制約がなくなるので、一波の帯域を40Gbps、160Gbpsと高速にしてもフォワーディングが可能で、また、中継ノードの高スループット化が期待できる。表1にOXC、光パケット交換機を用いるネットワークの特徴をまとめた。光アドレス処理を行なう方法と他の方法の比較を示している。

光アドレス処理を行なうために、光符号(OC; optical code)をヘッダに与え、その符号の違いを光学的に読取る方法が提案されている[23][24]。しかし、現状ではWDM技術の適用がより実用的である。そこで我々は、複数の波長を用いてパケットを構成するフォーマット及び波長の組合せを読取ってアドレスを識別する光パケット交換機を提案した[5][6]。次章ではそれを適用するネットワークアーキテクチャについて述べる。

3 光パケット交換ネットワーク

2.3.2で示した光パケット交換機を用いたネットワーク(多波長ラベルネットワーク)の概略を述べる。

3.1 多波長ラベルを用いたパケットフォーマット

図2に光パケット構成を示す。複数の波長(λ_{IA} 、 λ_{IE})からなる波長帯(λ -band)で1パケットを構成する。波長帯はアドレスを含むヘッダ用(λ_{IA-ID} ; 波長数W)とペイロード用(λ_{IE})に区別する。アドレス(多波長ラベル)はKチップからなり、波長

表1 ネットワークの比較と課題

ネットワーク	IP over WDM網		光パケット交換網	
	OXCのみ	ルータ併用	電子アドレス処理	光アドレス処理
中継ノード構成	小	大	大	大
データ量対伝送速度比	小	大	大	大
主なボトルネック	波長数	ルータの処理速度	アドレス処理、ヘッダオーバーヘッド	衝突回避処理(3章)
リンク速度	10Gbps超	10Gbps程度	ヘッダ10Gbps程度	40Gbps
パケットの光電変換	不要	ルータ入出力	ヘッダ処理	不要
アドレス数	数千	2ビット長	2ビット長	10,000超[6]

の組と時間方向への順列で識別する[5][6]。例えば、波長が"BADC"と並んだ光パケットは、図2のパケットとは異なるアドレス情報を持つ。 $W=16$ 、 $K=10$ とすれば 2^{32} を超えるアドレス数の提供も可能になる[6]。パケット長はバッファリング処理の高速化を図るために固定長とする。

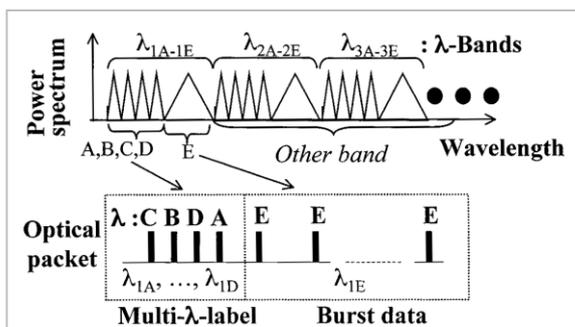


図2 多波長ラベルを用いた光パケットフォーマット

3.2 多波長ラベルネットワーク

図3に多波長ラベルネットワークを示す。光パケット交換ノードの機能を果たす多波長ラベルスイッチングノード(MλLSN; multi-wavelength label switching node)は多波長ラベルを読み取ってスイッチングを行なう。MλLSNを用いれば、より細部にわたるルーチングを行なえるが、コストを抑えるためには波長帯が同じパケットをすべて同一方向に出力するOXCの導入も必要と考える。

以下、多波長ラベルネットワークと光パスネットワークの違いを述べる。2で述べたように、WDM光パスネットワークでは、波長は受信ノードの識別子として使われない。一方、多波長ラベルネットワークは、多波長ラベルがじゅうぶんな数の識別子を提供するので、受信ノードの識別子として用いることが可能である。例えば、ラベル用の帯域が十分に取れず16波程度になっ

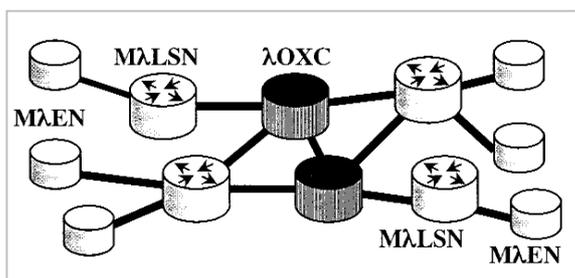


図3 多波長ラベルネットワーク

ても、 2^{32} を超える識別子がある。これはインターネットと同規模のネットワークにおける受信ノードのそれぞれに多波長からなる識別子を付与できることを示す。この識別子は光パケットのアドレスとなり、MλLSNでのフォワーディング処理に用いられる。

3.3 光パケット交換ノード (MλLSN)

MλLSNにパケットが到着すると以下の処理を順に行なう[7]。

- ① ヘッダ・ペイロード分岐処理：パケットをヘッダとペイロードに分岐し、ルーチング表と同数のコピーを生成する
- ② 光アドレス照合：マルチセクションFBG (fiber Bragg grating) 相関器において、ヘッダ内アドレスの相関処理が行なわれる。入力アドレスがFBGの波長の組合せと一致した場合のみ、FBGは高ピークのパルスを発生する。
- ③ 光スイッチによるスイッチング：②の高ピークのパルスによってスイッチが駆動され、適切な方路にペイロードをスイッチングする。
- ④ ヘッダ付与：ルーチング表に従って、適切なアドレスをもつヘッダをパケットに与える。
- ⑤ バッファリング：複数のパケットが同時に出力ポートに到着し衝突するのを防ぐための処理を行なう。

手順①から③については動作確認実験を行なった[5][6]。図4はその実験系の例である($W=3$ 、 $K=3$)。アドレス" $\lambda_{1A} \lambda_{1C} \lambda_{1B}$ "を持つパケットは3セクションFBG"FBG1*"にマッチし、ペイロードがGate1から出力される。アドレス" $\lambda_{1C} \lambda_{1B} \lambda_{1A}$ "のパケットはGate2から出力される。

表2に各スイッチングシステムにおける光処理の適応範囲を示す。MλLSNではアドレス処理を光学的に行ない、ルータ、電子アドレス処理スイッチにおけるスループット低下の最大要因を解消する。その結果、スループットを決める最大要因は演算を伴う衝突回避処理速度になると考えられるが、衝突回避処理を電気回路で構成しても、アドレス処理ほどネックにはならない。一方、ネットワークの提供サービスを絞りパッ

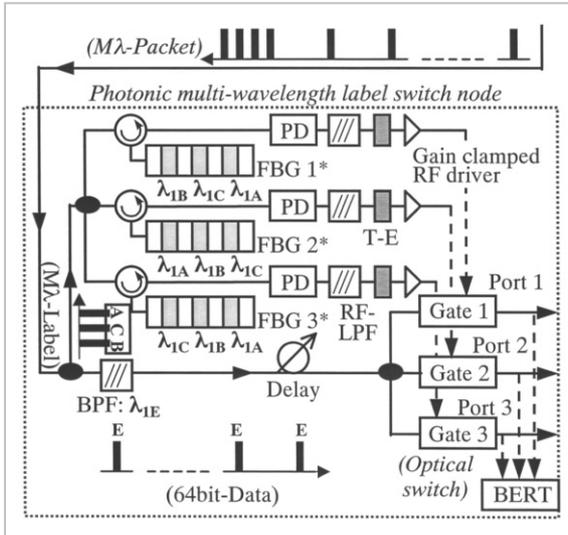


図4 スイッチングノード内の光スイッチ (1×3) 構成

ファリング機能を最小限にし、衝突回避処理を簡素にする。ルーチングに要する時間やルーチング表書替時間はスループットにさほど影響がなく、光レベルでは行なわない。

3.4 MλLSNの利点と課題

3.4.1 利点

- ① AWG (arrayed waveguide grating)、FBG等、現在実用、商用になりつつある WDM 関連装置の技術を一部に応用できる。
- ② ヘッダとペイロードで異なる波長を用いるので、スイッチのスループットの点でヘッダがオーバーヘッドにならない。スループットはスイッチング時間のみで決まる。
- ③ 光アドレス処理により 40Gbps 程度の光信号でも中継処理が可能。また、アドレス処

理時間は光の伝播時間で固定になる。

- ④ ノードあたり 10^4 を超えるアドレスエントリを持つルーチング表作成が可能[23]。
- ⑤ MλLSN の出力側にバッファをおくと入力からスイッチングまでの時間が固定になる。スイッチングに必要な同期の実装が容易になる。

3.4.2 課題

- ① 波長帯域の高効率利用
- ② 同期処理
- ③ 光バッファ
- ④ 多重・遅延処理

の検討が今後の課題になる。理由を下記に述べる。

- ① 多波長ラベルではラベル用波長の帯域を広げると波長帯域の使用効率(ペイロード対全体比)が劣化する。
- ② 同期ずれがあると、衝突回避処理がより複雑になる。
- ③ 実用レベルの光RAMはなく、光遅延線を複数使い衝突回避に適した構成を検討する必要がある。
- ④ パケット衝突回避のためには、パケットがアドレス処理され出力バッファに到着するまでにバッファ内滞在時間を決定せねばならない。

これらの課題を解決すれば、高スループットの中継ノードシステムができる。さらに、ネットワークスループットの向上や信頼性の提供のために、ルーチングや故障回復などネットワーク内で協調して行なう課題もあるが、これについては4で述べる。

表2 パケット交換機への光技術の適用領域

	ルータ	OXC	光パケットスイッチ	
			電子アドレス処理	光アドレス処理
アドレス処理	電気	光	電気	光 (マルチFBG)
スイッチング	電気	(MEMS等)	光 (ゲートSW等)	光 (ゲートSW等)
バッファ構成	電気	不要	電気[10]、光[11]	光
衝突回避処理	電気		電気	電気
経路表作成	電気	電気	電気	電気
例	(多数)	(多数)	FRONTIER[11]、WASPNET[12]、TAOS[10]等	MλLSN [5]、OCDM-SW [23]

3.5 多波長ラベルネットワークにおける提供サービス

ネットワークはパケット交換型であり、基本的にベストエフォート型転送サービスを提供する。しかし、実時間通信を行なうアプリケーションが流れる送受信ノードには、帯域保証型サービス^[7]が望まれることを考慮せねばならない。また、実時間通信でなくとも高品質のサービスを要求するユーザもいる。現在、最も一般的なパケット交換型ネットワークであるインターネットにおいても、2点間の通信品質を保証するために、Diff-Serv (differentiated services)、RSVP (resource reservation protocol) 等が検討されている。ATMにはCBR (constant bit rate) クラスがあり、運用がすでに行なわれている。この傾向から、光パケット交換ネットワークを構成する場合にも、帯域保証型サービスとベストエフォート型サービスを併用しての提供が望ましい。

一方、高スループットネットワーク提供のためには、提供品質に制限を加える必要がある。例えば、優先クラスを多数設けたり、フローごとに平均帯域を保証する等の高機能化を光ノードで行なうと、その処理時間がネックになりパケット中継速度が低下する可能性がある。光スイッチングネットワークでは、ATMのCBRクラスのような最高帯域を保証するサービスを提供すれば十分である。より複雑な品質はネットワークの出入口の機能により提供する。

4 今後の研究計画

1で述べたように、我々は大容量かつ高スループット、高機能なネットワーク実現を目指して、フォトニックネットワークを対象とした研究を行なっている。3で述べた多波長ラベルネットワークはそのアーキテクチャの候補であり、今後ネットワークの拡張を行なう。本章では、今後の研究計画としてそのアプローチを簡単に述べる。

4.1 ネットワークアーキテクチャに関する研究

光技術が大容量の光信号を伝送・中継するとはいえ、光信号にデータがマッピングされるとは限らない。例えば、2.2に述べたWDM

パスネットワークは、データを送信する前に受信ノード(または中継IPルータ)までの専用回線(波長の集合)を確保する。従って、専用回線を構成する波長にデータが流れていなくとも、その波長を他のデータ転送に使用することはできない。

そこで本研究では、伝送容量を無駄なく使用する、すなわち、トラヒック収容効率を高く維持するためのネットワークアーキテクチャを検討する。高効率にするには、空き帯域にはルーティング表に従うトラヒックを転送し、わずかなトラヒック変動には耐えうる機能をもつことが望ましい。その候補が、光パケット交換型の多波長ラベルネットワークである。本ネットワークでは、中継ノードにおいて複数の入力ポートに到着した同じ波長帯のトラヒックを同一ポートに多重できるため、WDMパスネットワークよりもトラヒック収容効率を改善できる。

ただし、すべてのトラヒックをベストエフォートで転送するとパケット損失が品質低下を招くサービスの提供に問題が生じる。3.5で述べた帯域保証サービス提供のために、光パス^[7]を設定し、ネットワークまたはノードでその帯域を管理する機構も必要である。

4.2 パケット衝突回避に関する研究

多波長ラベルネットワークにおけるベストエフォート型トラヒックのパケットには、専用回線が提供されない。その場合、中継ノードにおいて複数のパケットが同時に同一出力ポートに転送されることがある。ノードを高スループットにするためには、ノードがパケットの衝突回避機能を持つことが望ましい。そこで、光パケット交換ノードの衝突回避に関する研究を行なう。これをバッファ構成と衝突回避アルゴリズムの検討の2つに区分する。

4.2.1 バッファ構成

現在、実用的な光RAM (Random Access Memory)はない。光信号のままパケット衝突を回避するために、時間、波長、空間のいずれかをずらして行なう手法が一般的に検討されている。時間での衝突回避には、ファイバ遅延線で構成する光バッファを用いる^[25]。さらに、波長多重と波長変換技術を用いてファイバ遅延線数

を減らす方法[11][12][13]や空間的な衝突回避(Deflection)を行なう方法[26]があり、組合せて用いると、光バッファを構成する遅延線数を減らせるという報告もある[27]。バッファ構成手法については、文献[25]がさまざまな方法を扱っている。

ただし、多波長ラベルネットワークには、光バッファ以外の方法は不向きである。波長変換による方法は一波10Gbps程度の光信号を対象とするもので、高速回線の全光波長変換はまだ現実的ではない。また、波長選択を入力時に決定する高速性が要求され、スイッチングまでの遅延を長くする必要があるなど、多波長ラベルネットワークには向かない。Deflectionを適用すると、同一宛先のパケットの遅延が異なる可能性が高くなる。その結果、パケット順列を並べ替える操作がネットワークのエッジで必要になり、実用的な手段ではないと考えられる。そこで本研究では光遅延線のみを用いて光バッファを構成する手法を検討する。

4.2.2 衝突回避処理

4.1.1に述べたバッファ構成手法は、交換ノードに配置される位置によって、入力バッファ方式、交換機内バッファ方式、出力バッファ方式と3つに区分される。このうち、多波長ラベルスイッチの構成を最も簡素にできるのは、出力バッファ方式である。さらに出力バッファ方式は、他の2方式と比べ優れたパケット損失特性を示すという本質的な優位性も持つ。そこで、ここでは出力バッファを対象とする。

遅延線バッファ、特に、シングルステージ[25]バッファを構成する場合、パケットが遅延線に入った時点でその出力時刻は一意に求まる。したがって他のパケットとの衝突によるスループット低下を避けるためには、パケットがバッファに到着するまでに遅延時間(選択する遅延線)を求める必要がある。バッファに到着するパケットはすべて固定時間を経て到着するので、パケットの遅延時間はパケット時間よりも短時間に行なわねばならない。例えば、光パケット長をIPパケットのデフォルト長にほぼ等しい500バイトとし、一波の伝送速度を160Gbpsとすると1パケット時間は25nsecになる。出力バッファ方式では入力線数が多くなるほど高速処理ま

たは多段処理を要するため、本研究ではパケット時間よりもはるかに短い時間で遅延時間を決定する方法を検討する。

また、衝突回避処理を高機能にすると、遅延時間の決定に時間がかかる。3.5に示したようにネットワーク内でのサービスクラスは最小限にとどめ、スループットを高く維持することを優先する。

衝突回避処理を高速に行なうため、現段階での多波長ラベルネットワークは固定長パケットを対象としている。したがって、インターネットなど可変長パケットを扱うネットワークに適用する場合には、可変長パケットを固定長に変換・分割する処理が必要になる。その負担を回避するためにも、可変長パケットを扱える衝突回避処理方式、パケット交換方法を検討することも重要である。

4.3 高効率化に関する研究

光ファイバが大量のデータを伝送し、光ノードが大容量高スループットを提供する性能を持って、そこにデータが流れなければそのメリットを活かせない。例えば、ほとんどのノードにトラヒックが流れていないにもかかわらず、一部のノードに処理能力を超えるトラヒックが流入し、すべてのトラヒックを転送できなくなることがある。この場合、ノードの処理能力を越えるトラヒックを迂回させるようにルーチングを行えば、より多くのトラヒックを流せる。すなわち、トラヒック収容効率が改善され、ネットワークスループットも向上する。

本研究では、ネットワークの高効率化に関する研究を行なう。例えば、インターネットの運用では、資源を有効利用するために、BGP(Border Gateway Protocol)やOSPF(Open Shortest Path First)などのルーチングプロトコルが使われている。WDM光パスネットワークには、例えば[20]のようなルーチング方式がある。そこで、光パケット交換ネットワークにおいてもネットワーク資源を高効率に利用するルーチング手法を開発する。さらに、4.4に後述するトラヒックモニタを用いた計測によってトラヒックの分布を知り、おおよそのトラヒックの到着過程を推測すること、再ルーチングのタイミ

ングのとり方、手順の検討を行なうことも重要である。

4.4 高信頼化に関する研究

大容量高スループットのネットワークを提供しても、装置が故障なく稼動しつづけることはない。既存のネットワーク(インターネット、SONET/SDH)には故障時に自動的に経路を回復する機能を持つ。WDMパスネットワークでも、波長、ビットレベルの誤りを監視、同定する手法が検討され[28]、この情報をもとにネットワークが自動的に経路を回復するための検討が行われている。新しいネットワークが既存のネットワークより信頼度を下げることが避けねばならない。光パケット交換ネットワークが高信頼性を提供するためには、WDMパスネットワーク等の機能と同等の機能が不可欠である。

本研究でも、故障箇所を検知し、その情報を素早く集めるためのトラヒックモニタ機能の開発を行なう。また、故障情報を基に、ネットワークが故障からすばやく回復することも重要で、予備経路を予め確保しておくプロテクションや故障時に経路を変更するリストレーションに対応したルーチングの検討を行なう。

トラヒックモニタに関していえば、ビットレベル、波長レベルだけでなく、パケットレベルで光信号を監視すれば、ネットワークの資源使用状況を把握できる。これをルーチングに活用すれば、ネットワークのトラヒック収容効率を改善することも可能になる。

4.5 WDMパスネットワークからの移行に関する研究

ネットワークにトラヒックを流すためには、ユーザを獲得せねばならない。WDMパスネットワークでは、SONET/SDHとの接続のため、OC-48、OC-192のインタフェイスを提供している。また、IP over WDMやMPLSによってインターネットのトラヒックが流れる基盤を構成しつつある。しかしながら、我々が対象とする光パケット交換ネットワークの伝送速度は10Gbpsを越える高速になるため、電気技術を用いた装置とのインタフェイスを提供する可能性は低い。当面は10Gbpsのルーティングに光パケッ

ト交換ネットワークを直結する方法はない。そこで、本研究では、電気装置とのインタフェイスを提供し、光パケット交換ネットワークにトラヒックを流すための方式を検討する。

また、今後5年程度で、WDMパスネットワークがデータトラヒックを転送するための主流になるとと思われる。WDMネットワークから光パケット交換ネットワークへスムーズな移行を行なうには、電気装置とのインタフェイスを検討するのみならず、パケット交換ネットワークでWDM光パスを提供する方法を検討することも重要である。

4.6 高機能化に関する研究

ネットワークが大容量のデータを高スループットで転送する性能を備えれば備えるほど、ユーザは大きな帯域をふんだんに利用した多彩なサービスを利用したいと期待するであろう。そのようなときに、多彩なサービスについてエンド・エンドで各々が要求する品質(QoS)を提供することは中継ノードにおける単純なバッファ機構だけでは達成が難しい。また、QoSの提供と言っても通信帯域幅の保証だけでなく、遅延特性や信頼度、セキュリティレベル、課金機構の提供など多様な要求が考えられる。これらの要求に対応するためには、ネットワークの状態に適應してユーザ毎、ストリーム毎、あるいはパケット毎の処理を行なうこと、あるいは分散ノード間の連携機能を使った制御等が必要になるため、これらの高機能処理は電子的に処理せざるを得ない。これらの処理はスループットの低下をもたらすことから光バックボーンの中ではなく、エッジやゲートウェイにおいて実現する構成が最適であると考えられる。

本研究では、エッジノードシステムの高機能化を含むネットワーク制御技術の研究を行なう。エンド・エンドのQoS提供に関しては、マルチキャストサービス形態でどのように実現するかを中心に様々な研究があり、本研究でも多角的に追究する考えである。一つの有望な手法は、ノードの機能高度化を積極的に進めるアクティブネットワーク技術である。当所ではストリームコード方式を提唱し[29][30]、これまで基本的なネットワーク機能の実現法を明らかにしてきた。

多様かつ安定な高機能化をスケーラブルに達成する方式の研究開発が重要である。

5 まとめ

近い将来、WDMパスネットワークとよばれる、光技術による大容量ネットワークが構成できるといわれている。ネットワーク内の通信量は今後も伸びることは間違いなく、WDMパスネットワークではトラヒックを収容できず、ネットワーク構成法が見直される時代がくるかもしれない。それにふさわしいネットワークが光パケッ

ト交換ネットワークである。

本稿では、我々が提案している多波長ラベルネットワークについて述べた。本ネットワークは光パケット交換の具体例である。さまざまな通信トラヒックが集中するバックボーンネットワークに本ネットワークを適用するためには、大容量、高スループット、高機能に拡張することが不可欠である。そのために必要となるネットワークアーキテクチャ、パケット衝突の回避、高効率化、高信頼化、高機能化、ネットワークの移行などの課題を列挙し、それぞれの研究計画を述べた。

参考文献

- 1 B. Mukherjee, "WDM-based local lightwave networks Part I: Single-hop systems", IEEE Network, Vol. 6, No. 3, pp.12-27, May, 1992.
- 2 N. Ghani S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM integration", IEEE Communications Magazine, Vol.38, No.3, pp.72-94, Mar., 2000.
- 3 I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath Communications: An approach to high bandwidth optical WAN's", IEEE Transactions on Communications, Vol. 40, pp. 1171-1182, Jul., 1992.
- 4 B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy, and A. Mekherjee, "Some principles for designing a wide-area WDM optical network", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 4, No. 5, pp. 684-696, Oct., 1996.
- 5 N. Wada, H. Harai, W. Chujo, and F. Kubota, "Photonic packet routing based on multi-wavelength label switch using fiber Bragg gratings", ECOC2000, Vol.4, No.10.4.6, pp.71-72, Sep., 2000.
- 6 和田, 原井, 中條, 久保田, "多波長光ラベルスイッチを用いたフォトリックネットワーク", 電子情報通信学会PNI研究会(PNI2000-24), pp.45-51, Oct., 2000.
- 7 原井, 和田, 久保田, 中條, "多波長ラベルネットワークにおける帯域の異なる光パス設定のためのノード構成", 電子情報通信学会技術研究報告(PS2000-37), Dec., 2000.
- 8 原井, 和田, 久保田, 中條, "光アドレス処理技術を用いた光スイッチングネットワーク実現への課題", 電子情報通信学会総合大会光スイッチングシンポジウム(SB-10-2), Mar., 2001.
- 9 S. Araki, S. Takahashi, Y. Maeno, Y. Suemura, A. Tajima, H. Takahashi, K. Matsuda, T. Tamanuki, S. Dohmae and N. Henmi, "A 2.56 Tb/s throughput packet/cell-based optical switch-fabric demonstrator", ECOC '98, pp.127-128, 1998.
- 10 末村他, "Tb/s 級光パケットスイッチ試作機", 電子情報通信学会技術研究報告 (PS99-55), Dec., 1999.
- 11 K. Habara, H. Sanjo, H. Nishizawa, Y. Yamada, S. Hino, I. Ogawa, and Y. Suzaki, "Large-capacity photonic packet switch prototype using wavelength routing techniques", IEICE Transactions on Communications, Vol. E83-B, No.10, pp.2304-2311, Oct., 2000.
- 12 D.K. Hunter et.al, "WASPNET: A wavelength switched packet network", IEEE Communications Magazine, Vol. 37, No. 3, pp.120-129, Mar., 1999.
- 13 D.K. Hunter and I. Andonovic, "Approaches to Optical Internet packet switching", IEEE Communications Magazine, Vol.38, No.9, pp.116-122, Sep., 2000.
- 14 S. Yao, B. Mukherjee, and S. Dixit, "Advances in photonic packet switching: An overview", IEEE Communications Magazine, Vol.38, No.2, pp.84-94, Feb., 2000.
- 15 E. Modiano, "WDM-based packet networks", IEEE Communications Magazine, Vol.37, No.3, pp.130-135,

- Mar., 1999.
- 16 野島, “高速ルータの実現技術と課題”, 電子情報通信学会 PNI 研究会(PNI99-5), pp. 29-34, Jun., 1999.
 - 17 D. Awduche, Y. Rekhter, J. Drake, and R. Coltun, "*Multi-protocol lambda switching: Combining MPLS traffic engineering control with optical crossconnects (draft-awduche-mpls-te-optical-02.txt)*", IETF Internet Draft (Work in Progress), Jul., 2000.
 - 18 H. Takara, T. Ohara, K. Mori, K. Sato, E. Yamada, K. Jinguji, Y. Inoue, T. Shibata, T. Morioka, and K-I. Sato, "*Over 1000 channel optical frequency chain generation from a single supercontinuum source with 12.5GHz channel spacing for DWDM and frequency standards*", ECOC 2000 Post Deadline Paper, Sep., 2000.
 - 19 村田他, "*IP over a-thousand-wavelength division multiplexing: Is it useful and possible for resolving the network bottlenecks?*", 電子情報通信学会技術研究報告(SSE99-170), pp. 55-60, Mar., 2000.
 - 20 H. Harai, F. Kubota, and H. Nakazato, "*Design of reconfigurable lightpaths in IP over WDM networks*", IEICE Transactions on Communications, Vol. E83-B, No. 10, pp. 2234-2244, Oct., 2000.
 - 21 H. Harai and F. Kubota, "*Bandwidth maximization in IP over WDM path networks*", Proceedings of SPIE OptiComm 2000, pp. 9-20, Oct., 2000.
 - 22 荒川, 村田, 宮原, “IP over WDMにおけるネットワーク設計と機能分担”. 電子情報通信学会技術研究報告 (SSE99-111), Dec., 1999.
 - 23 K. Kitayama and N. Wada, "*Photonic IP Routing*", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, p.1689, 1999.
 - 24 N. Wada and K. Kitayama, "*Photonic IP routing using optical codes: 10Gbit/s optical packet transfer experiment*", OFC2000, WM51, p.362, 2000.
 - 25 D.K. Hunter et. al., "*Buffering in optical packet switches*", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, pp. 2081-2094, Dec., 1998.
 - 26 X. Wang, H. Morikawa, and T. Aoyama, "*Burst optical deflection routing protocol for wavelength routing WDM networks*", Proceedings of SPIE Opticomm 2000, pp.257-266, Oct., 2000.
 - 27 S. Yao, B. Mukherjee, S.J.B. Yoo, and S. Dixit, "*All-optical packet-switched networks: A study of contention-resolution schemes in an irregular mesh network with variable-sized packets*", Proceedings of SPIE OptiComm 2000, pp. 235-246, Oct., 2000.
 - 28 渡辺, 岡本, “WDM オプティカルパス網における故障/劣化区間同定機能の実現”, 電子情報通信学会技術研究報告 (SSE99-152), pp.37-42, Feb., 2000.
 - 29 F.Kubota et al., "*Implementation and evaluation of active internetwork system using Stream Code based active network*", Proceedings IEEE 15th International Conference on Information Networking (ICOIN-15), pp.232-239, Jan., 2001.
 - 30 F.Kubota et al., "*Congestion management based on routing functions over active internetwork system*", Technical Proceedings 2000 Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS2000), pp.91-102, Oct., 2000.



はらい ひろまさ
原井洋明

研究員(情報通信部門ネットワークアーキテクチャグループ) 工学博士
光ネットワークアーキテクチャ



くぼた ふみお
久保田文人

研究主管(情報通信部門) 工学博士
アクティブネットワーク、
フォトリックネットワーク