

## 波長ルーティング・フォトニックネットワークのための 周波数シフタを用いたホップ数計数法

新井 菜穂子<sup>†</sup> 中川 清 司<sup>††</sup>  
高野 勝 美<sup>††</sup> 平 中 幸 雄<sup>††</sup>

複数の経路を持つ大規模なルーティング網において VPN (Virtual Private Network) など専用線の通信コスト削減, さらに管理者の負荷の軽減などのトラフィック・エンジニアリングを目的として MPLS (Multiprotocol Label Switching) が多く利用されている. MPLS を実装する LSR (Label Switched Router) では自ノードで終端せずに単に中継するだけのノードにおいて処理遅延の解消を実現するために IP レイヤにおけるルーティング処理をバイパス (カット・スルー) する. LSR では IP ヘッダ中の TTL (Time To Live) の値は減算されないため, 実際に通過してきたルーティング (ホップ数) と IP の TTL が一致しなくなる. 本論文では MPLS におけるこの TTL の問題を解決するために, 光レイヤでホップ数を設定するいくつかの方法について比較検討を行い, 波長多重信号 (WDM) に対して信号劣化の影響が少なく, 変調方式に無依存という特徴を有する有望なホップ数計数法を提案する. 提案する方法を用いて光ネットワークにおいても TTL と類似の機能を実現し, ホップ数の情報を簡単に保持できるようになるので, GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) の光パズルーティングの品質や状態管理に有効である. 光周波数シフタを用いた本方式では信号劣化をとまなうため SNR 理論式に基づき, 品質を考慮した GMPLS ノードのスケラビリティについて検討を行う.  $10^{-9}$  の誤り率 (SNR 21.6 dB) を確保することを設計目標としたシミュレーションの結果, 本方式によるホップ数計数法は 2.7 Gbit/s WDM 型中規模メトロポリタン・エリア・ネットワーク (MAN) において約 50 ノードが実現可能なことが分かった.

### Frequency Shifter Type Hop Count Indication Method in WDM Photonic Networks

NAHOKO ARAI,<sup>†</sup> KIYOSHI NAKAGAWA,<sup>††</sup> KATSUMI TAKANO<sup>††</sup>  
and YUKIO HIRANAKA<sup>††</sup>

Major two functions of a router are routing control and packet transmission. Routing control is performed in IP layer, and packet transmission is performed by layer 2 or layer 1. MPLS and GMPLS aim at realizing an efficient network by adding a switching function of labeled path in layer 2 or layer 1. The label for switching called shim header indicating VCI/VPI (ATM), wavelength, etc. is inserted in MPLS or GMPLS. We propose a hop count indication method in optical transport network by adding a function similar to TTL (Time To Live) in IP routing. Simple hop count indication becomes possible by using the optical frequency shifter. Optical SNR calculation proved that MAN (Metropolitan Area Network) with 50 nodes will be feasible at 2.7 Gbit/s WDM photonic networks.

#### 1. はじめに

現在の IP over SDH (Synchronous Digital Hierarchy) のネットワークにおけるルーティングは次のような方法で行われている. 図 1 (a) のように, 各ノード

で光信号をいったん電気信号に変換して IP ヘッダを識別して解析を行い, 次の送出ポートを決定して, 再び光信号に変換した後に次ノードへ送出するという手順で, 光-電気-光 (OEO: Optic-Electronic-Optic) の変換作業を各ノードごとに繰り返している. しかし一般に中継ルーティングでは自ノードで終端されるべきパケットの割合はノードに流れ込むトラフィック全体の 2 割から 3 割程度といわれている. このような状況の下で, OEO 変換にとまなう処理遅延, 電気処理能力の限界, 経済性, 使用効率などの問題を解決する

<sup>†</sup> 山形大学大学院理工学研究所ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー

Venture Business Laboratory, Yamagata University

<sup>††</sup> 山形大学工学部

Faculty of Engineering, Yamagata University

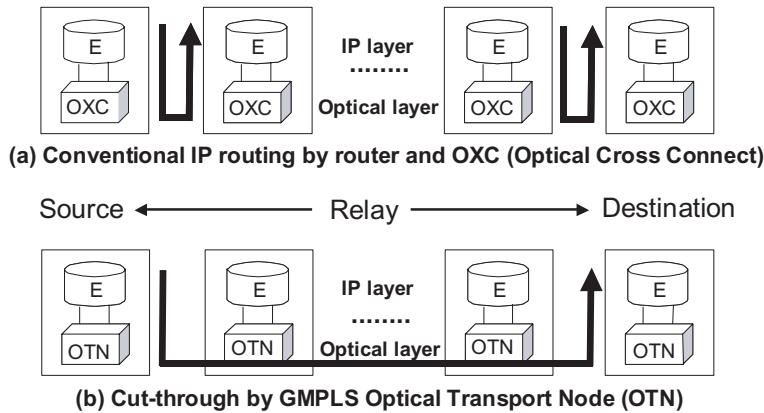


図 1 パケット転送モデル

Fig. 1 Packet transfer models: Conventional IP routing by router and OXC (Optical Cross Connect) and Cut-through by GMPLS Optical Transport node (OTN).

ために、光信号を光のままスイッチングする光クロスコネクタ (OXC: Optical Cross Connect) を使ったフォトニックネットワーク (all-optical network) の研究が進められている<sup>1)</sup>。

また一方では、従来の IP ルータにおいては共通のプロセッサで処理を行っていた「経路制御」と「パケット転送」というルータの処理を分離することによって効率的なネットワークの実現を目的とするマルチプロトコル・ラベル・スイッチング (MPLS: Multiprotocol Label Switching<sup>2)</sup>) の技術開発も進んでいる。MPLS ではラベル情報に従ったパスによる制御を行い、転送における IP レイヤの処理をバイパス (カット・スルー) することで、ノードにおける処理遅延の低減化を実現する。IP ルーティングでは通過するルータで IP ヘッダを解析し、ルータは記憶している経路表を検索し IP パケットヘッダに書かれている宛先情報に従って経路の選択および決定を実行していたのに対して、MPLS のルータは IP ヘッダの検索を行わず、IP ヘッダの外側 (前) に付加したラベル情報だけを見て次の送出先ポートを選択する。

MPLS を光ネットワークに応用したのが図 1 (b) のような GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching<sup>3)</sup>) あるいは MPλS (Multiprotocol Lambda Switching<sup>4)</sup>) である。GMPLS は波長をラベルとして光信号を光のままスイッチングし、光領域でパスの概念を実現するという方法で、“all-optical” と “label switching” の特徴をあわせ持つ技術となっている。この方法によって従来の IP ルータにおいて問題であった OEO 変換作業を省略してルーティング処理のオーバーヘッドを削減し、経路表の検索およびノ

ドでの電気による処理遅延の低減化が実現される。

IP ルーティングによる経路制御においては、経路の到達性が失われた際に経路探索の無限ループに陥ることを防ぐために TTL (Time To Live) が設定されている。まず、データグラムの発信元によって TTL の初期値が設定される。ルータを通過するごとに TTL の値は減少され、TTL の値が 0 になった時点で経路探索は収束し、ルータはデータグラムの送信元に到達不能のメッセージを返す。この手順によってホップ数計数の情報 (hop count indication) を得ることができるので、IP ルーティングではルーティング時の無限ループからの回避を実現している。

しかし、MPLS を実装する LSR (Label Switched Router) では自ノードで終端せずに単に中継するだけのノードにおいては、IP レイヤにおけるルーティング処理をバイパス (カット・スルー) する。このような LSR では IP ヘッダ中の TTL の値は減算されない。そこでラベルマッピングプロトコル中に何らかのルーティング時の無限ループ検出機能を付加することが IETF (Internet Engineering Task Force) で検討されている<sup>5)</sup>。

また、実際のネットワークにおいては、MPLS が導入されていないバックアップリンクに経路が変更された瞬間に LSP (Label Switched Path) はなくなる。しかし、IP レベルの接続性は依然として保持され続け、トラフィックは落ち続けるという状況が起こりうる。この問題を防ぐためには各レイヤ間でネットワーク情報の同期をとる必要があるが、MPLS の TTL 計数法は現状ではベンダによって異なっている。このような背景の下、MPLS ドメイン内では IP の TTL の

値を 1 ホップとして計数する方法など, MPLS ネットワークにおける TTL 処理問題に対する解決法が報告されている<sup>6)~8)</sup>.

MPLS では ATM ( Asynchronous Transfer Mode ) の論理チャネル VCI/VPI ( Virtual channel Identifier/Virtual Path Identifier ) やフレーム・リレーの論理チャネル DLCI ( Data Link Connection Identifier ), VLAN ( Virtual Local Area Network ) の ID, 宛先の IP アドレスなどがラベル情報として用いられるのに対して, GMPLS では TDM のタイムスロット, 光ファイバや波長 ( wavelength ) および波長群 ( waveband ) などがラベル情報として用いられる. このことはラベル情報がパケットのヘッダに含まれる MPLS との大きな違いである. ヘッダを解析して, ヘッダ中に埋め込まれた TTL 情報に基づく制御が可能な MPLS に対して, ヘッダの解析を行わない GMPLS フォトニックネットワークではホップ数情報の扱い方が難しい.

本論文では MPLS において存在していたこの TTL の問題を解決するために, 光レイヤでホップ数を設定するいくつかの方法について比較検討を行い, 光チャネルの情報ビットに影響を与えない ( トランスパレンシー: 透明性 ) 有望なホップ数計数法を提案する. 提案する方法を用いて光ネットワークにおいても TTL と類似の機能を実現し, ホップ数情報を保持することが簡単に行えるようになれば, GMPLS の光バス・ルーティングの品質や状態管理に有効である.

以降, 2 章では複数の光周波数シフトによるホップ数計数法について比較検討を行い, ホップ数計数法の構成と光周波数シフトを用いたホップ数計数法を示し, 3 章ではホップ数計数のための光周波数シフトの損失を考慮した場合の信号対雑音比 ( SNR : Signal to Noise Ratio ) 劣化について計算を行い, ネットワークのスケラビリティを評価し, 最後にまとめる.

## 2. 光周波数シフトによるホップ数計数法

### 2.1 ホップ数計数法の比較

ホップ数計数法としては, 図 2 のように

- (a) オーバヘッド通知方式
  - (b) 光チャネル振幅変調方式
  - (c) 光周波数シフト方式
- が考えられる.

図 2 (a) のオーバヘッド通知方式は MPLS の場合とほぼ同様に, 光ルータで SDH や光パケットのオーバヘッドを検出して, 該当するホップ数通知ビットに対してルータを経由するごとに TTL のようにその値を

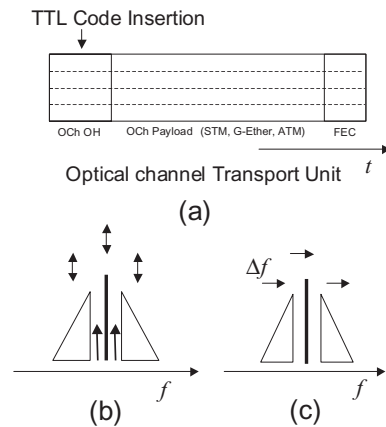


図 2 ホップ数計数法の比較: (a) オーバヘッド通知方式, (b) 光チャネル振幅変調方式, (c) 光周波数シフト方式

Fig. 2 Methods of hop count indication: (a) GMPLS overhead utilization method, (b) Amplitude modulation method of optical channel, (c) Frequency shift method of optical channel.

変化させてルータに送出する方法である.

光パケットヘッダについた光のラベルを解析してルーティングを行う方法には光 CDM ( Optical Code Division Multiplexing<sup>9)</sup> などの方法がある. 超高速の OE 変換後の電気的な処理によって符号の操作を行う方法や光直接信号処理の可能性があるが, これを光領域で行うためには超高速の光デバイスが必要不可欠であり, コスト的に非常に高価になる. 現状では安定した動作を実現するためには電気に頼らざるをえない.

図 2 (b) の光チャネル振幅変調方式は, 光信号に微小な変調をかけてオペレーションのための符号を伝送する方法である. 複合変調方式 ( Composite Modulation ) あるいは重畳変調方式 ( Superimpose Modulation ) と呼ばれている. この方法は変調による信号劣化が生じる. また, 光チャネルごとに振幅変調を行わなければならないので, 装置が大がかりになる.

図 2 (c) の光周波数シフト方式では光信号を音響光学素子や電気光学素子によって構成された光周波数シフトを通すことによって光信号スペクトル全体を周波数シフトする方法である. この方法は, 光信号そのものに与える影響が少ない. トランスパレンシーな光の性質を確保できるため, ホップ数情報などの新しい保守信号を組み込むことが容易である. また, 1 本のファイバの中を通る波長多重信号のすべての信号に対してホップ数情報を同時に与えることも可能となる. 以下, この光周波数シフト方式について検討を行う.

### 2.2 光周波数シフト型ホップ数計数法

波長分割多重 ( WDM : Wavelength Division Mul-

tiplexing) フォトニックネットワークにおける光周波数シフト型ホップ数計数法を適用したノード構成を図3に示す. ノード構成としては図3(a)の光チャネルごとの光周波数シフト法と, 図3(b)の一括グループチャンネル光周波数シフト法が考えられる.

図3(a)の光チャネルごとの光周波数シフト法は光周波数シフトを分光波器(DEMUX, MUX)の間に設置する方法である. 図3(b)の一括グループチャンネル光周波数シフト法は分光波器の後に設置する方法である. 前者ではチャンネル数分の光周波数シフトエレ

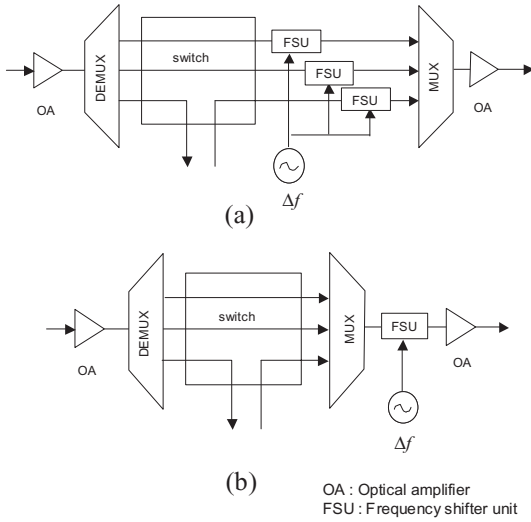


図3 光周波数シフト型ホップ数計数法: (a) 光チャネルごとの光周波数シフト法, (b) 一括グループチャンネル光周波数シフト法  
 Fig. 3 Optical frequency shifter type hop count indication method: (a) Optical frequency shift in each optical channel, (b) Optical frequency shift in WDM channels.

メントが必要であるのに対して後者ではエレメントは1つでよい. 両者とも2段目(2つルータを通る)は $2\Delta f$ , 3段目は $3\Delta f$ , n段目は $n\Delta f$ となる. 前者はチャンネルごとに個別に管理しているため光周波数シフト故障時の影響は限定されるが, 後者は一括管理するため光周波数シフトには高信頼性が要求される. しかし, ホップ数計数実現に要求される機能は単純であるので, 構成の簡単な後者を選んだ.

用いる光周波数シフトとしては, 現在では図4のような音響光学素子(AO: acousto-optic)型光周波数シフト(FS: Frequency shifter)の適用が考えられる. これは超音波によって周期的な屈折率変化を用いて結晶内にグレーティングを形成し, 光の干渉によって分光特性を実現する. 光周波数シフト量としては $+\Delta f$ と $-\Delta f$ が可能である. 受信側ではコヒーレントな光源と信号光とのヘテロダイン検波によるビート

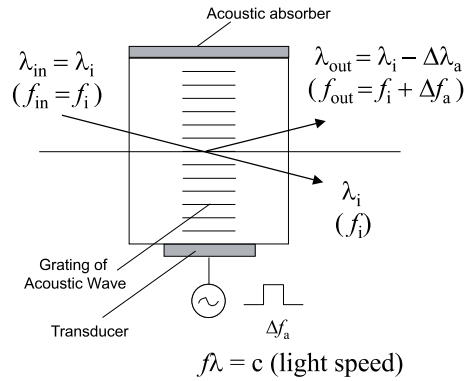


図4 AO型光周波数シフト  
 Fig. 4 Optical frequency shifter by AO device.

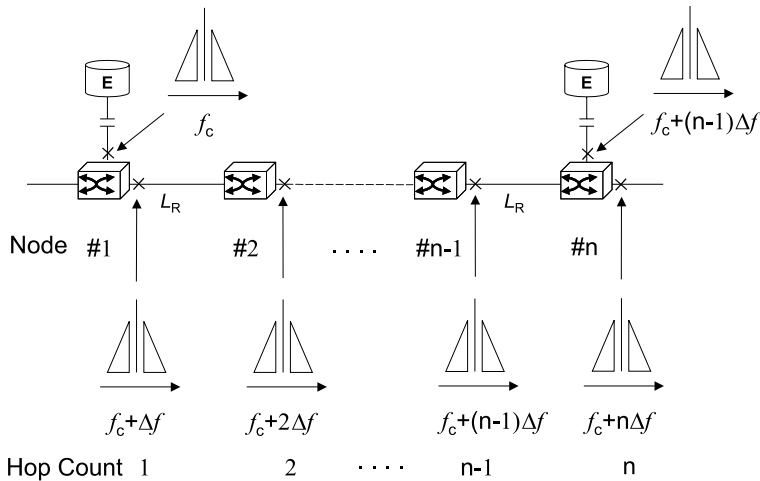


図5 光周波数シフトによるホップ数計数  
 Fig. 5 Hop count by optical frequency shifts.

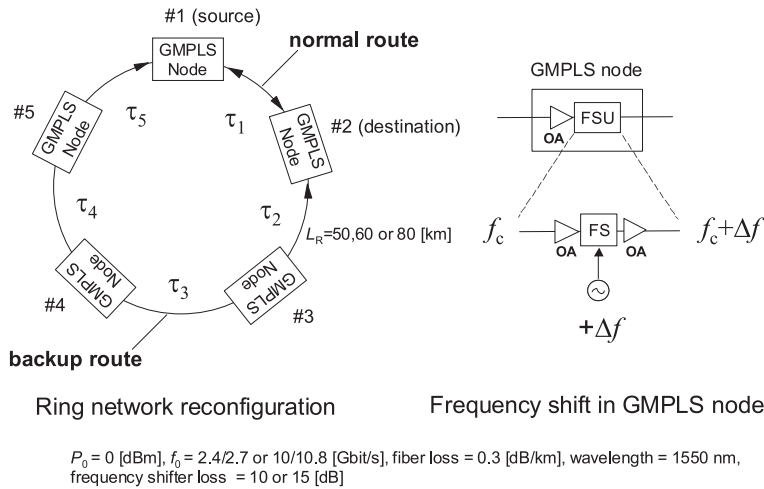


図 6 GMPLS によるリング型ネットワーク構成  
 Fig. 6 Basic configuration of a burst GMPLS node.

検出によって  $\Delta f$  の検出が可能である。

2.3 光周波数シフト量計測によるホップ数計数法  
 通過ノード数とホップ数の関係を図 5 に示す。ノードを通過するごとに  $\Delta f$  を与えて加算していく。ホップ数と光周波数シフトする  $\Delta f$  の値が 1 対 1 の対応をしているので、ノード # $n$  を通過すると  $n\Delta f$  シフトされる。この場合ノード出力端で光周波数シフトが行われているので、ノード # $n$  でドロップされる信号は  $(n - 1)\Delta f$  シフトされたキャリア周波数の値となる。それぞれのノードでは光周波数シフトの合計値から通過ノード数を知ることができる。光周波数シフト量  $(n - 1)\Delta f$  の計測法としては安定な光周波数波長光源を基準として受信光とのヘテロダイン検波などの適用が考えられる。3 章に示すように光 SNR によって制限される最大ホップ数を超える光周波数シフト値を検出した場合には、オペレーションシステムにその状態を通知することによって経路探索の収束やネットワークのセルフヒーリング状況把握などに利用できる。

ホップごとに別々の  $\Delta f$  を与える方法も考えられるが、通過するノードの個数分だけの  $\Delta f$  の値を用意しなければならない。また、ネットワークポロジが複雑になると到達したノード側で合計される  $\Delta f$  の値からどのルータを通ってきたのかということが分かるようにするために、あるいはまた、存在する複数経路の  $\Delta f$  の合計値が同じ値にならないようにするためにそれぞれのリンクに与える  $\Delta f$  の値を設計しなければならないので処理が大変複雑になる。この方法は実現するための処理が複雑であるわりにその結果得られる効果は低い。それに対して  $\Delta f$  の値を各リンクで同じ値にする方法ではこのような問題がなく、コ

ストパフォーマンスがよい。

### 3. 光周波数シフト挿入にともなう光 SNR 劣化

#### 3.1 ネットワークモデル

比較的大都市のメトロポリタン・エリア・ネットワーク (MAN: Metropolitan Area Network) を想定し、図 6 のようなリング型ネットワーク構成をモデルとして考える。ノード間距離が 50 から 80 km でノード間には光中継器は挿入されない。GMPLS ノードでは光周波数シフトによるホップ数計数情報を挿入する光周波数シフタが設置されている。光周波数シフトの損失としては現在の AO 型光周波数シフタでも実現が容易な 10 ~ 15 dB の値としている。

#### 3.2 光周波数シフトによる光 SNR 劣化理論式

光周波数シフトを用いたホップ数計数法では伝送路である光ファイバ中の信号損失のほかに光周波数シフトの損失とそれを補償するための光増幅器による信号劣化があり、信号品質に影響を及ぼすため、信号対雑音比 (光 SNR) について調べる。ここでは  $10^{-9}$  の誤り率 (BER: Bit Error Rate) である光 SNR 21.6 dB を確保することを設計目標とする。モデルとするネットワークにおける単体の光増幅器出力の光 SNR は以下の式で近似できる。

$$(S/N)_a = \frac{P_{sig}}{4S_{ASE}B} \tag{1}$$

$P_{sig}$  は光増幅器の信号光パワー、自然放出光雑音 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) のパワースペクトル密度  $S_{ASE} = hf n_{sp} (G - 1)$ ,  $h$  はプランク定数,  $f$  は光周波数, 自然放出光  $n_{sp} = 0.5 \times 10^{(F/10)}$ ,

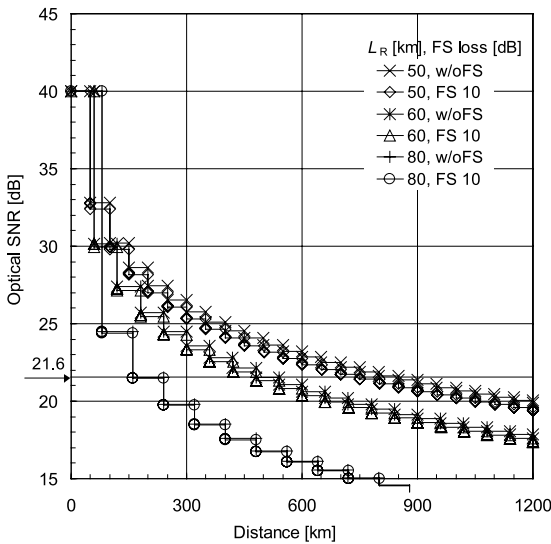


図 7 10.8 Gbit/s 光バスの光 SNR 特性：光周波数シフタ適用の影響

Fig. 7 Optical SNR at 10.8 Gbit/s with or without optical frequency shifter.

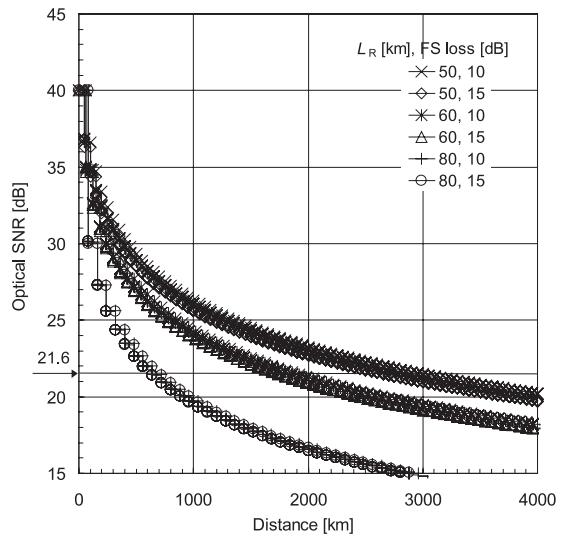


図 8 光周波数シフタの損失レベルの違いによる 2.7 Gbit/s 光バスの光 SNR 特性

Fig. 8 Optical SNR at 2.7 Gbit/s in different optical frequency shifter loss.

光増幅器の雑音指数  $F = 7$  [dB],  $G$  は光増幅器の利得, 光受信器帯域幅  $B$  はビットレートと同じ帯域幅で, 10.8 および 2.7 [GHz] とする. 光増幅器を用いた光ファイバ伝送系における光 SNR は次の式で表現できる. ただし,  $(S/N)_0$  は光送信器出力の光 SNR で本論文では 40 dB の値を用いた.  $(S/N)_n$  は  $n$  段光増幅器出力時の光 SNR であり, 式 (2) を初期値とし, 式 (3) で表される漸化式の値を順次求めることによって計算できる.

$$(S/N)_0 = \frac{1}{(N/S)_0} \quad (2)$$

$$(S/N)_n = \frac{1}{(N/S)_{n-1} + (N/S)_a} \quad (3)$$

図 6 の MAN では, 各ノードには光ファイバ損失補償用の光増幅器 1 段と, 光周波数シフタ両端の 2 個の光増幅器をあわせて 3 個の光増幅器が含まれているので,  $n$  ノード通過後の光 SNR は  $n = 3N$  として求められる.

### 3.3 光 SNR 計算結果

この光 SNR 計算式に従って波長 1550 nm 帯の光バス長 (多中継接続距離) と光 SNR の関係を図 7 および図 8 に示す. ノード間距離は 50, 60 および 80 km の場合について計算した. 光チャネルのビットレートは図 7 では 10.8 Gbit/s, 図 8 では 2.7 Gbit/s とした. 損失 10 dB または 15 dB の光周波数シフタ (図 6) にはそれぞれ利得 4 dB または 6 dB のプリアンプと 6 dB または 9 dB のポストアンプを用いている.

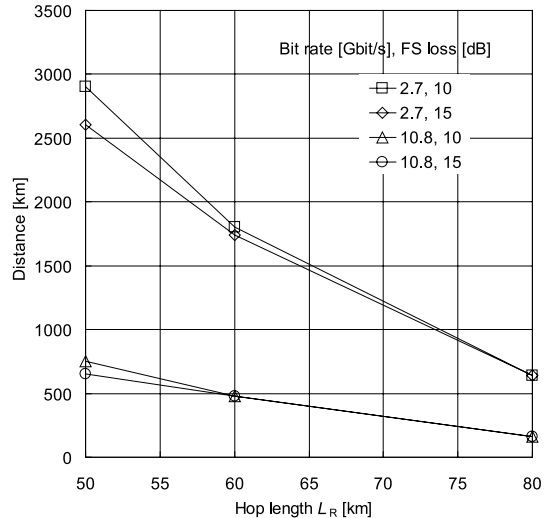


図 9 ホップ長に対する最大接続可能距離

Fig. 9 Dependence of maximum transfer distance on hop length.

図 7 では 10.8 Gbit/s において光周波数シフタによるホップ数情報を挿入した場合としない場合の差を示している. このグラフからホップ数情報を挿入しても多大な信号の劣化がないということが分かる. 図 8 では光周波数シフタの信号損失レベルを 10 dB または 15 dB として計算している. 図 7, 図 8 において, ノード間距離が長くなるにつれて光周波数シフタ損失よりも相対的に光ファイバ損失の影響が大きくなり, 光周波数シフタ挿入の影響は小さくなるので計算結果は重

なってくる。

図 9 は  $10^{-9}$  の誤り率である光 SNR 21.6 dB を確保可能な接続距離をプロットしたグラフである。これらのグラフから 2.7 Gbit/s ではリンク距離を 50 km とした場合、光周波数シフトの損失レベルが 10 dB では 2900 km (58 ノード)、15 dB を使ったとしても、2600 km (52 ノード) まで接続可能、10.8 Gbit/s の場合は、光周波数シフトの信号損失を 10 dB とした場合は 750 km (15 ノード)、15 dB では 650 km (13 ノード) まで接続可能なことが分かった。

### 3.4 リングネットワークにおける経路再構築と遅延時間

以上述べてきたように光周波数シフト量  $n\Delta f$  がホップ数  $n$  と 1 対 1 対応している。その原理を使えば異なったノード数を経由してきた現用パスと迂回パスでは光周波数シフト量が異なる。 $L_{path}$  をパス長、 $v_0$  を光ファイバ中の光速とするならば、遅延時間  $\tau$  は

$$\tau = \frac{L_{path}}{v_0} \quad (4)$$

である。一般に  $n$  を中継ノード数、 $L_R$  を中継間隔とするならば、

$$L_{path} \approx L_R \times (n - 1) \quad (5)$$

である。

正常状態では最短経路が使われていて、たとえば図 7 のように #1 と #2 のノード間に光パスが設定されているとする。このときの遅延時間は

$$\tau_{normal} = \tau_1 \approx \frac{L_R}{v_0} \quad (6)$$

である。この光パスに障害が発生したときには別の迂回経路である #1-#5-#4-#3-#2 のリンクでノード #1 と #2 の間の光パスが設定されることになる。ノード #1、#5、#4、#3 を通過していくごとに遅延時間も  $\tau_5, \tau_4, \tau_3, \tau_2$  が加算され、光周波数シフト量は  $1\Delta f, 2\Delta f, 3\Delta f, 4\Delta f$  と増加する。ノード # $n$  に到達する光信号は  $(n - 1)$  個の光ノードを経て、ノード # $n$  でドロップされるので光信号の周波数シフト値は  $(n - 1)\Delta f$  となる。このときの遅延時間は

$$\tau_{backup} = \sum_{i=2}^5 \tau_i \approx \frac{L_R \times (n - 1)}{v_0} \quad (7)$$

である。

正常状態の光周波数シフト量は  $\Delta f$  であるのに対して、迂回時には  $4\Delta f$  の光周波数シフト量が得られるのでこの数値を検出することによって通信経路の変更がルータで容易に把握できることになる。

## 4. む す び

IP ルーティングにおける TTL と類似の機能を付加するために、光周波数シフトを用いて光キャリアの光周波数を微小に変えるという方法で光ネットワークのホップ数情報を挿入する方法を提案した。シミュレーションにより、光パス(光チャネル)のビットレートが 2.7 Gbit/s の MAN では、およそ 2500 km (50 ノード) まで接続可能であることが分かった。また、接続可能な距離およびノード数は光増幅器の多中継特性である光本来の光 SNR によって制限されるもので、光周波数を使ったことによる信号劣化は少なく、中規模 MAN では十分実用可能な能力があることが分かった。

光周波数シフト法を用いることによって、トランスペアレントでビットレート無依存という特徴を有する簡便なホップ数情報を付加することが可能になる。また、ネットワークのリンク状態が end-to-end で分かり、オペレーション情報の交換をしなくてもネットワークの状態変化を知ることができ、光パス網監視/制御を行うことが可能と考えられる。また、1本の光ファイバ中を通る光チャネルの波長群全体に対してホップ数情報を同時に与えることが可能となる。その結果、ループ検出だけではなく、パス検出にも応用が可能であろう。光チャネルに影響せずに監視情報を埋め込み、ネットワークを監視できるのでネットワークの評価にも有効となる。特に大きな遅延があったときに、その原因がルータの負荷が大きくバッファメモリでの待ちに時間がかかったことによるものなのか、リンクのパスの構成が変わって迂回路を通ったためなのか分かればトラフィック設計にも使える。リアルタイムを必要とするマルチメディア通信では遅延が大きな問題となっているが、ネットワーク状態が分かればリンクの数を制限したオペレーションも可能である。

なお、本方式は現在の SDH ネットワークでも、また、開発が進められている OTN (Optical Transport Network) においても有効である。光周波数シフトのネットワークとして利用は未開発の分野であり、今後の超高速デバイスの開発とともに次世代フォトニックネットワークにおける有効利用として大きな期待が持てる。引き続き、光周波数シフトで周波数をシフトさせた波長および波長群を検出する方法についての検討、検出のためにかかる時間(遅延)についての検討、光源の波長変動や帯域特性を考慮して、光フィルタの光周波数シフト幅  $\Delta f$  の検討などを行う予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Murata, M.: Challenges for the Next-Generation Internet and the Role of IP over Photonic Networks, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E83-B, No.10, pp.2153–2165 (Oct. 2000).
- 2) Rosen, E., Viswanathan, A. and Callon, R.: Multiprotocol Label Switching Architecture, IETF RFC 3031 (Jan. 2001). <http://ietf.org/rfc/rfc3031.txt>
- 3) Mannie, E., et al.: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture, IETF Internet Draft, draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-02.txt (work in progress) (Mar. 2002).
- 4) Murata, M. and Kitayama, K.: A Perspective on Photonic Multiprotocol Label Switching, *IEEE Network*, Vol.15, No.4, pp.56–63 (July 2001).
- 5) Ohba, Y., Katsube, Y., Rosen, E. and Doolan, P.: MPLS Loop Prevention Mechanism, IETF RFC 3063 (Feb. 2001). <http://ietf.org/rfc/rfc3063.txt>
- 6) Agrwal, P. and Akyol, B.A.: TTL Processing in MPLS Networks, IETF Internet Draft, draft-ietf-mpls-ttl-00.txt (work in progress) (Feb. 2002).
- 7) Agrwal, P. and Akyol, B.A.: TTL Processing in MPLS Networks, IETF Internet Draft, draft-agrwal-mpls-ttl-01.txt (work in progress) (Oct. 2001).
- 8) Matsushima, S., Nagami, K., Ishii, H. and Ikejiri, Y.: TTL Processing expansion for 1-hop LSP, IETF Internet Draft, draft-satoru-mpls-1hop-lsp-01.txt (work in progress) (July 2001).
- 9) Sotobayashi, H. and Kitayama, K.: Optical Code Based Label Swapping for Photonic Routing, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E83-B, No.10, pp.2341–2347 (Oct. 2000).

(平成 14 年 4 月 30 日受付)

(平成 14 年 9 月 5 日採録)



新井 菜穂子 (正会員)

1984 年宮城学院女子大学学芸学部卒業。2002 年山形大学大学院理工学研究科博士課程修了。2003 年 1 月より山形大学大学院ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー研究員。現在、光および IP ネットワークに関する研究に従事。博士(工学)。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



中川 清司

1978 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1970 年同大学大学院修士課程修了。電信電話公社(現, NTT)電気通信研究所を経て, 1996 年 9 月より山形大学工学部教授。現在, 光通信および情報通信システムの研究・教育に従事。工学博士(大阪大学)。1976 年, 1990 年英国 IEE 論文賞, 1984 年および 1991 年度電子情報通信学会業績賞受賞。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



高野 勝美

1991 年東北大学工学部通信工学科卒業。1993 年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。1998 年山形大学工学部助手, 現在に至る。光ファイバ通信システム, 光ファイバ増幅器, フォトニック結晶技術の研究に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。



平中 幸雄(正会員)

1976 年東京大学工学部卒業。東京大学工学部計数工学科助手, 山形大学工学部講師, 助教授を経て, 現在山形大学工学部情報科学科教授。工学博士。センシングシステムの研究, コンピュータネットワークの研究に従事。IEEE, 計測自動制御学会各会員。