

全光ネットワークのトラフィック収容効率向上技術

Technologies for Improving Data Traffic Accommodation Efficiency of All-Optical Network

土橋 恭介 井辺 博之 大島 茂

■ DOBASHI Kyosuke ■ IBE Hiroyuki ■ OHSHIMA Shigeru

近年の IP (Internet Protocol) パケットを中心としたデータトラフィックの増加に伴い、大容量のデータトラフィックを効率的に収容できる全光ネットワークへの期待が高まっている。一方、全光ネットワーク上の中継ノードで波長を変換する方式では、波長を変換するための光送受信器が必要となり、ノード装置が高価になるという課題がある。

この課題を解決するために、中継ノードで波長を変換せずにデータトラフィックを効率よく収容する全光ネットワークのアーキテクチャ、帯域利用効率の高い光変復調方式、及び波長可変機構を持つ光送信器の高速・高安定制御方式を提案し、それらの有効性を定量的に示した。

With the tremendous increase in Internet Protocol (IP) packet traffic in recent years, there are expectations for the realization of all-optical networks that can efficiently accommodate large volumes of data traffic. On the other hand, an optical transceiver for wavelength conversion is required in the system that converts wavelengths at intermediate nodes in the optical network, resulting in high equipment costs.

Toshiba has proposed an all-optical network architecture offering high data traffic accommodation efficiency and cost effectiveness, and has developed a spectrally efficient modulation technology for optical signals as well as a precise and fast wavelength control method.

1 まえがき

FTTH (Fiber To The Home) に代表されるブロードバンドインターネットアクセス、モバイル通信などにより、IP (Internet Protocol) パケットを中心としたデータトラフィックが爆発的に増加している。ばく大なデータトラフィックのニーズに応じて波長多重技術が飛躍的に進歩し、基幹通信ネットワークでは、1本の光ファイバに毎秒テラ(T: 10^{12}) ビットのデータを伝送できるようになった。また、ダイナミックに変動するトラフィックを効率的に収容するために OXC (Optical Cross Connect) 装置を用いた光転送ネットワークが考案されている⁽¹⁾。現在、OIF (Optical Internetworking Forum), ITU-T (国際電気通信連合-電気通信標準化部門), IETF (Internet Engineering Task Force) などで標準化作業中のネットワークアーキテクチャは、中継ノードで波長を変換しながらネットワークの入口ノードから出口ノードまでの光パスを設定する、OEO (光-電気-光) 方式が主流である^{(2), (3)}。この方式の場合、光パスの波長を最適に配置できるため、ネットワークのトラフィック収容効率は向上するものの、中継ノードで波長を変換するための光送受信器が必要となり、ノード装置が高価になる。

この課題を解決するために、以下の開発を行った。

- (1) 中継ノードで波長を変換せずにデータトラフィックを効率よく収容する全光ネットワークのアーキテクチャ
- (2) 帯域利用効率の高い光変復調方式

- (3) 波長可変機構を持つ光送信器の高速・高安定制御方式
ここでは、それらの概要と特長となる性能について述べる。

2 高効率な全光ネットワークを実現する要素技術

2.1 ネットワークアーキテクチャ

今回提案する全光ネットワークの概念を図1に示す。各ノード装置はレイヤ1で光パスを接続設定する OXC 部と、これを制御する制御部とレイヤ2/レイヤ3を統合したラベルスイッチルータ部により構成する。レイヤ1では、光パスは中

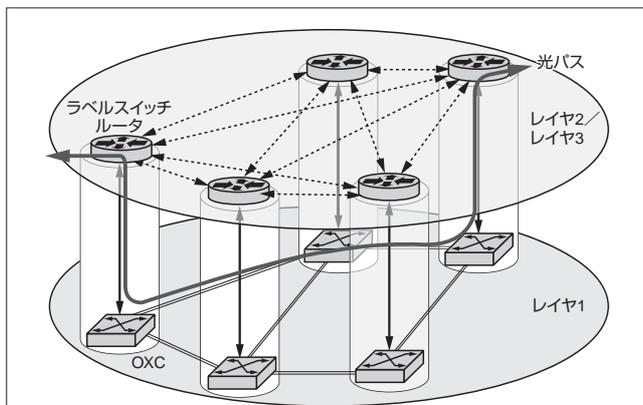


図1. 全光ネットワークの概念 — 光パスは中継ノードで OXC 部を波長変換せずに光信号のまま通過させ、光パスの端点で電気信号に変換する。
Concept of all-optical network

継ノードでOXC部の光スイッチを介して光信号のまま通過させ、波長は変換しない。光パスの端点で光トランシーバにより電気信号に変換する。光トランシーバには波長可変光送信器を使用し、ノード装置に備える光トランシーバの数を減らして低コスト化を実現する。

IETF及びITU-Tで検討が進められているGMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switch)は、ネットワークのトポロジーに応じて秒オーダーで準静的に光パスを設定する方式である。これに対して、ネットワーク上のトラフィック量を検出して、ミリ秒オーダーで動的に光パスを設定・解放するアーキテクチャを提案する。

デフォルト波長を使って、あらかじめノード間に設定されたホップバイホップのパスを用いて、レイヤ3上で制御信号を交換(シグナリング)することによりパスの設定・解除を制御する。具体的には以下の手順により光パスを設定・解除する。

- (1) ユーザーデータはレイヤ2上のラベルスイッチパスで収容する。このラベルスイッチパスを設定するために、レイヤ3上でシグナリングを行い、デフォルト波長でデータ転送用ラベルスイッチパスを設定する。このラベルスイッチパスは、ノード装置のラベルスイッチルータを介して設定されるホップバイホップのパスである。中継ノードでは電気信号に変換されるため全光パスとはなっていない。
- (2) ラベルスイッチパス上を流れるトラフィック量を測定し、あらかじめ定めたしきい値を超えた場合に、入口ノードが自律的に輻輳(ふくそう)を回避するための光パスを設定するシグナリングを、ホップバイホップのパスと同一経路で行う。
- (3) 光パス設定シグナリングにより新たに設定した光パス上に、しきい値を超えたトラフィックを流す。
- (4) 設定した光パスによる波長の占有を回避し、他の光パスの設定要求にも対応するために、あらかじめ定めた時間が経過した場合、又は光パスを流れるトラフィックがデフォルト波長上のデータ転送用ラベルスイッチパスで流せると判断できた場合に、光パスを解除する。

以上の手順により、トラフィック量に応じて伝送容量をダイナミックに変化させることができ、従来にない高効率なネットワークを構築することができる。

今回開発したデータ転送の仕組みを実現するノード装置の概略構成を図2に示す。

2.2 高効率光変復調方式

伝送路内に複数のOXC部が存在する場合、波長多重光信号がOXC部を通過する際には光信号帯域が狭窄(きょうさく)化され、受信特性が劣化するおそれがある。このため、複数のOXC段を用いた光ネットワークに対しては、多段フィルタ

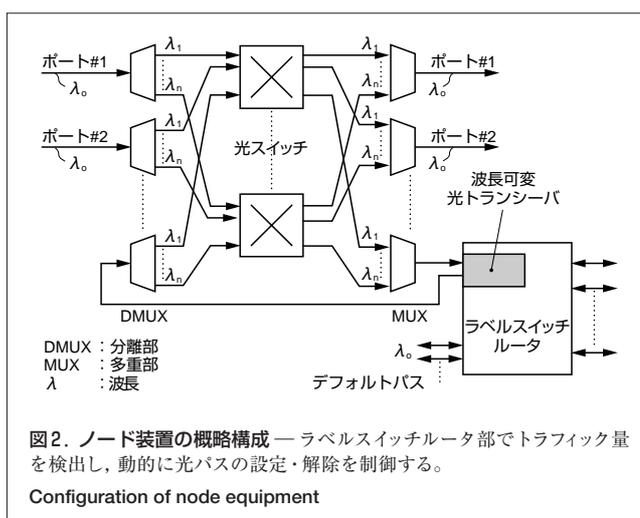


図2. ノード装置の概略構成 — ラベルスイッチルータ部でトラフィック量を検出し、動的に光パスの設定・解除を制御する。

Configuration of node equipment

リングによる帯域狭窄に強い変調方式を採用することが重要である。今回、反転パルス前後で光位相が反転するため、透過帯域幅が狭い光フィルタを通過しても、受信波形から0/1を識別するためのアイ開口度劣化が少ないという特長がある反転RZ (Return to Zero) 変調方式に着目し、受信信号品質を評価した。

32波-波長多重信号の光スペクトルを図3に、各波長チャンネルのQ値測定結果を図4に示す。Q値とは、光信号のアイ開口度をデシベルで表したものである。

39.813 Gビット/s (PRBS (擬似乱数ビット例): $2^{20} - 1$) 反転RZ信号に対して、ビットレートより小さい透過半値幅を持つ光インターバによって、帯域狭窄化し、37.5 GHz 間隔で200 km 波長多重伝送した。この場合でも全チャンネルでエラーフリー特性 ($Q > 17$ dB, 誤り訂正なし) が得られることを確認した。0 km (back-to-back) 伝送時と比較すると、Q値劣化量は2.0 dB以下であった。したがって、反転RZ信号は帯域狭窄に強く、1.0 ビット/s/Hzを超える高密度波長多重

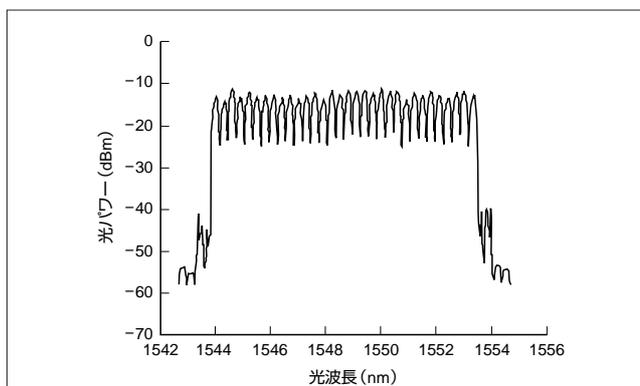


図3. 32波-波長多重信号スペクトル — 37.5 GHz 間隔で32波の波長多重伝送実験を行った。

Spectrum of wavelength division multiplexing (WDM) signal with 32 wavelengths

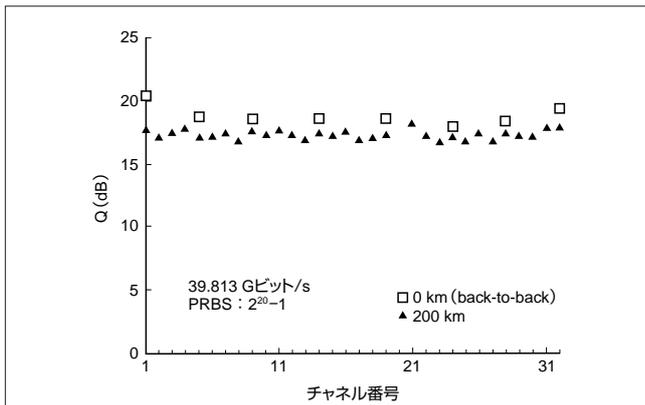


図4. Q値特性 — 37.5 GHz 間隔で 200 km 波長多重伝送した場合でも全チャンネルでエラーフリー特性 ($Q > 17$ dB, 誤り訂正なし) が得られた。

Characteristics of Q value

伝送にも適用可能であることを実証した。

2.3 高速・高安定光周波数制御方式

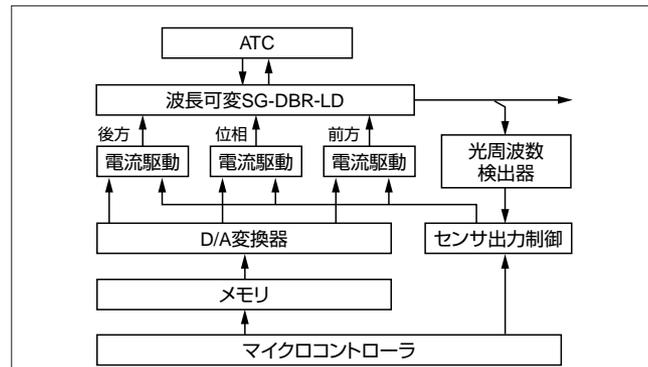
波長切替えに要する時間は、ネットワーク的には転送パケットの遅延変動として反映されるために、ネットワークの品質特性の低下を招く。また、波長切替え後の安定性は、波長多重における波長密度、すなわち光周波数利用効率と密接に関係しており、安定性が高いほど光周波数利用効率を向上できる。したがって、波長可変光源には、高速の波長切替え機能と、切替え後の波長安定性が要求される。更に、装置の小型・低コスト化の観点から、単一の光源で使用する帯域すべて (~30 nm) をカバーする必要がある。また、光フィルタが多段接続される場合の波長多重伝送では、光周波数の安定度として、おおむね ± 1 GHz 以下の精度が要求される。

これらの要求を満たすために、光周波数検出系には、中点保持型水晶エタロンを用いた。水晶エタロンの Z カット面には光反射率 17% のミラーを、また、X カット面には金電極を形成し、同期検波法によって光周波数を検出した。エタロン自身が水晶振動子として動作し、コルピッツ発信器の出力としてディザ信号を得た。この方式により、ディザ信号周波数が自動的にエタロンの機械的共振周波数に一致し、安定動作を実現することができた。波長可変レーザには SG-DBR-LD (Sampled Grating - Distributed Bragg Reflector - Laser Diode) を用いた。光周波数を制御する方式として、マイクロコントローラのフィードフォワードとアナログ回路による、3電極モードホップフリー制御方式を開発した。

ここでは、3電極モードホップフリー制御方式及び高速・高安定光周波数制御の実験結果を紹介する。

2.3.1 3電極モードホップフリー制御方式

30 nm の広帯域な波長領域を安定かつ高速に制御するために、マイクロコントローラのフィードフォワード制御とアナログ回路



ATC : Automatic Temperature Control
D/A : Digital to Analog

図5. 3電極モードホップフリー制御の構成 — この制御方式は、LD の温度変動や経年変化が生じた場合でも安定性を確保できる。

Configuration of three-electrode mode-hop-free control

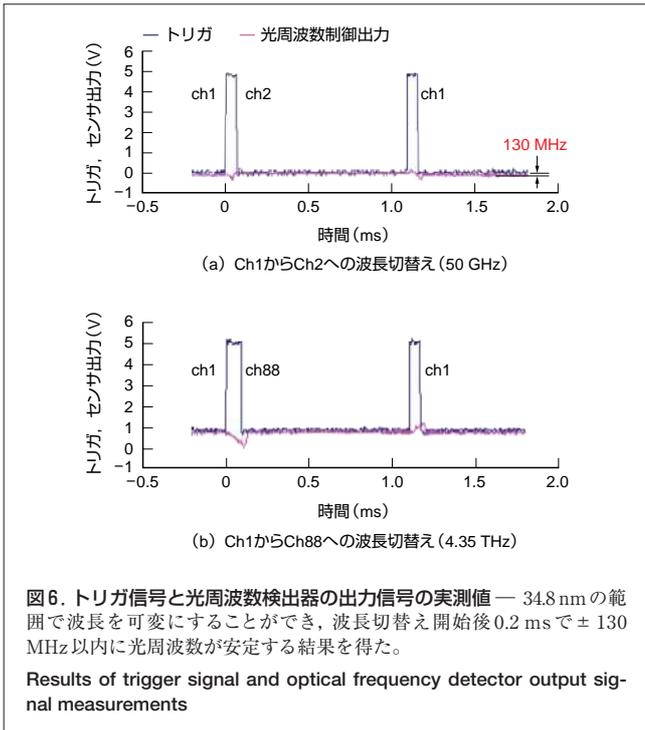
によるフィードバック制御を併用する。制御系の構成を図5に示す。3電極モードホップフリー制御方式は位相調整領域ばかりでなく、前方ミラー領域、後方ミラー領域にもフィードバックし、波長を広い範囲で連続的に変更できる。制御誤差を小さくするために、位相調整領域、前方ミラー領域、後方ミラー領域の各電流値をフィードフォワードでマイクロコントローラから与え、誤差分は光周波数検出器から得られるアナログ信号に基づいて各電流値を制御するようにした。エタロンの光透過率のボトムとピークの切替えはマイクロコントローラから制御し、センサ出力制御で符号反転させる。この制御方式は、LD の温度変動や経年変化が生じた場合でも安定性を確保できる。

2.3.2 高速・高安定光周波数制御方式の検証

前述の光周波数制御系を組み込み、高速・高安定光周波数制御方式を実験により検証した。実験に用いた SG-DBR-LD の光周波数が 196.1 THz のときを ch (チャンネル) 1 とし、これから 50 GHz 下がるごとに ch 2, ch 3 ... ch 88 とした。ch 88 の光周波数は 191.75 THz であり、全幅で 4.35 THz (波長では 34.8 nm) である。トリガ信号の立上りでチャンネルの設定を開始し、立下りでチャンネルの設定を完了する。チャンネル設定開始から光周波数検出器の出力が安定するまでを切替え時間とした。

トリガ信号と光周波数検出器の出力信号の実測値を図6に示す。トリガのパルス幅は広いものでも 0.11 ms 程度であり、その後、光周波数検出器の出力が落ち着くまでの時間は 0.05 ms 程度であった。両者を合わせた切替え時間は 0.2 ms 以下であった。制御誤差はもっとも大きいところで、光周波数検出器の出力が 0.15 V であり、光周波数に換算すると 130 MHz であった。

以上から、34.8 nm の範囲で波長を可変にすることができ、波長切替え開始後 0.2 ms で ± 130 MHz 以内に光周波数が安



定する結果を得た。

この結果、温度特性、比例制御誤差、ドリフトを考慮しても ± 530 MHzとなり、要求される波長精度の安定度 ± 1 GHz以下を十分に満たしていることを確認した。

3 あとがき

トラフィックの収容効率が高い全光ネットワークを低コストで構築するための要素技術を開発した。これらの技術が、将来の全光ネットワーク実現に向けて、多大な貢献を果たすことを期待している。

謝 辞

この開発は、独立行政法人 情報通信研究機構の委託により実施した「統合的管理機能を有する高効率全光ネットワークの研究開発」に関するものである。ご支援いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) K. Sato, et al. GMPLS-Based Photonic Multilayer Router (Hikari Router) Architecture : An Overview of Traffic Engineering and Signaling Technology. IEEE Communications Magazine, **40**, 3, 2002, p.96 - 101.
- (2) 結城義徳, ほか. "WDM網における波長パス設定方法の検討". 2000年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 愛知, 名古屋工業大学, 2000-10. B-10-123.
- (3) 橋 拓至, ほか. "波長ルーティング網におけるQoS保証型波長割り当て方式". 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2002-184). 2002, p.9 - 12.



土橋 恭介 DOBASHI Kyosuke

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 制御・ネットワークシステム開発部グループ長。通信システムの研究・開発に従事。

Power & Industrial Systems Research & Development Center



井辺 博之 IBE Hiroyuki

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー研究主幹。通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会, IEEE会員。Mobile Communication Lab.



大島 茂 OHSHIMA Shigeru, D. Eng.

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー研究主幹, 工博。光通信システムの研究・開発に従事。電子情報通信学会, IEEE会員。

Mobile Communication Lab.