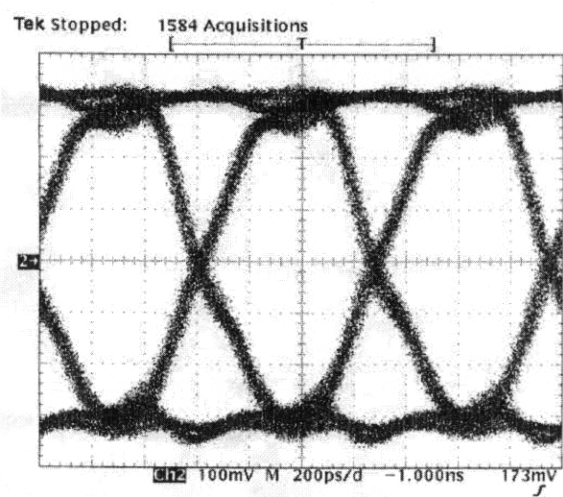


(a) Tx カード光出力



(b) Rx カード出力

図 4. 1 7 出力波形 (HDTV)

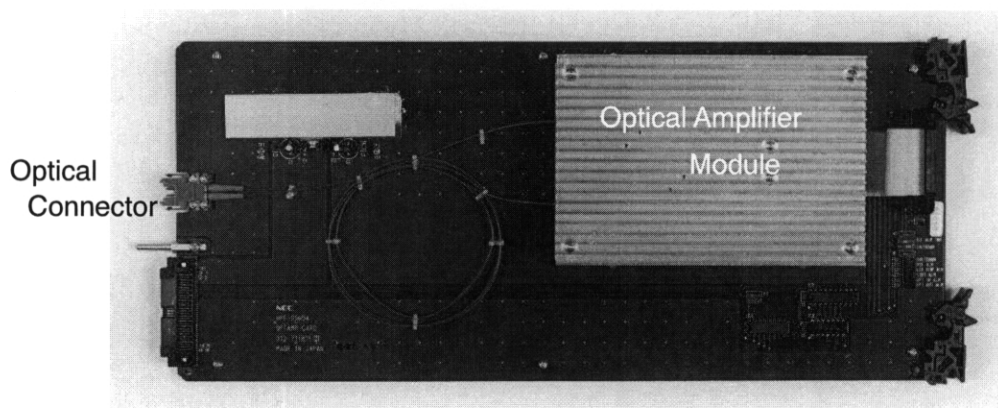
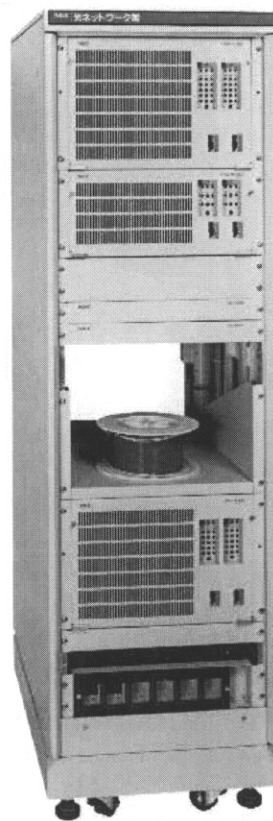


図 4. 1 8 光アンプカード



TX Unit
8 TX Cards/Unit

Optical Amplifier Unit
8 EDFA Cards/Unit

16x64 Star Coupler 1
16x64 Star Coupler 2

RX Unit
8 RX Cards/Unit

図 4. 19 送信, 光アンプ, 受信ユニット

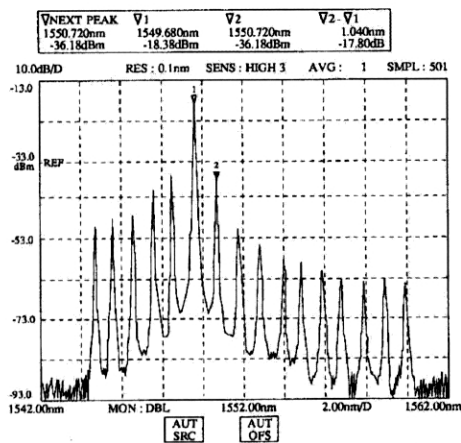


図 4. 20 可変波長フィルタ出力の
光スペクトル

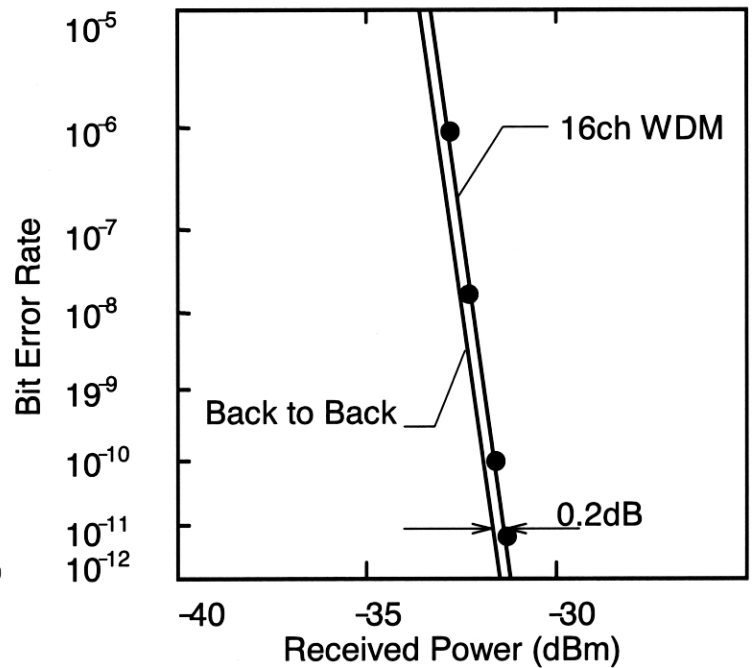


図 4. 21 エラーレートカーブ

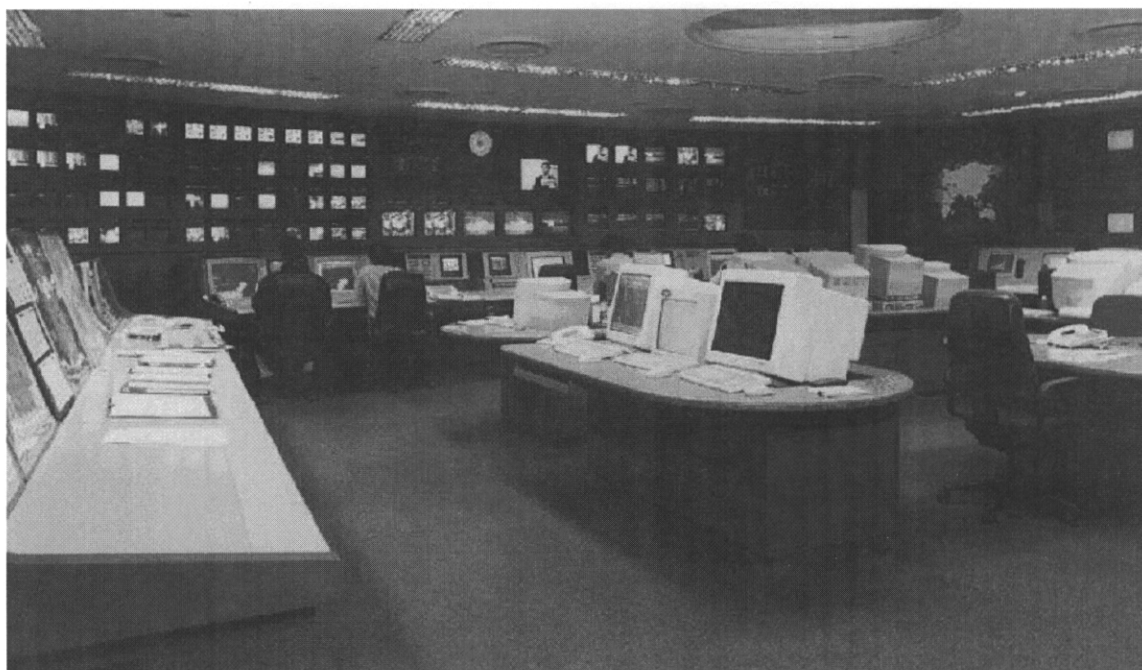


図4. 22 回線センタのオペレーション室



図4. 23 回線センタのラック室

フジテレビジョン新社屋の映像信号分配光ネットワークは、SDTV システムの導入が 1996 年夏から始まり、運用試験を経て 1997 年 3 月より本格運用された。また、HDTV システムは、1999 年 4 月より本格運用が開始され、現在両システムともに順調に稼働している。

4. 5 結

本章では、波長多重を用いた放送局向映像信号分配光ネットワークについて、本格的波長多重光ネットワークを世界で初めて導入したフジテレビジョン新社屋の例を中心に述べた。最初に、キー局向放送局内映像信号分配ネットワークの必要条件を説明し、これを満たす光ネットワークを提案し、このネットワークの構成と基本コンセプトについて述べた。この光ネットワークは、現在光交換で考えられる主要な多重化技術（空間分割多重、波長分割多重、時分割多重）を適用している。本光ネットワークは、スター型のトポロジを持つ一般的な光 LAN にも適用できる。

次に、この基本コンセプトに基づいた光ネットワークの設計として、時分割多重システム、波長分割多重システム、WD チャンネルのクロストークと波長フィルタでの波形歪のシミュレーション、パワーバジェットについて述べた。

時分割多重度は、商用システムの伝送速度限界とシリアルデジタル映像信号の伝送速度により決まる。また、多重方式は、経済性からビット多重を用い、TD チャンネルの 1 つをフレーム同期用チャンネルとする方式とした。本ネットワークでは、SDTV (NTSC) コンポジット信号の場合、15 チャンネルを、SDTV (NTSC) コンポーネント信号の場合、7 チャンネルを 1 波長 (WD) チャンネルに時分割多重する (HDTV 信号の場合、時分割多重を行わない)。波長多重度は、光アンプの帯域と可変波長フィルタの特性（隣接 WD チャンネルの抑圧比）により決まる。現状、C バンドで 32 波長 (WD) チャンネル程度まで波長分割多重を行うことができる。フジテレビジョンの場合、開発当時の波長分割多重用半導体レーザの入手状況から、波長多重度として 16 波長 (WD) チャンネルを採用した。また、冗長性を確保するためと分配するチャンネル数を増やすために、スターカプラ 2 系統を Rx カード上の光スイッチで選択する 2 チャンネル空間分割多重方式を採用している。これにより、フジテレビジョン新社屋の映像分配光ネットワークは、約 150 チャンネルの NTSC コンポジットシリアルデジタル映像信号と約 15 チャンネルの HDTV シリアルデジタル映像信号を伝送できる。

WD チャンネルのクロストークと波長フィルタでの波形歪のシミュレーションから、隣接 WD チャンネルのクロストークの合計が -10dB 以下になる様に波長フィルタを選定すれば、パワーペナルティは、1dB 以下になることを示した。

パワーバジェットの検討からフジテレビジョンの場合、システムマージンは、最悪値で 7dB と十分な値が得られることを示した。

次に、開発した装置の構成、特性について述べた。

SDTV 用送信 (Tx) カードでは、15 チャンネルの NTSC コンポジットシリアルデジタル信号 (143Mb/s) を、専用の IC でクロック抽出し、ゲートアレイでビット同期、フレームチャンネル付加、(パラレル) スクランブルを行った後、ビット MUX により時分割多重する。この時分割多重信号は、E/O 変換器によ

り光信号に変換される。また、出力光は、誘電体多層膜フィルタを基準に波長安定化される。波長安定度は、 $\pm 0.05\text{nm}$ 以下であり、 1nm 間隔の波長分割多重に対して、十分な安定度である。

SDTV 用受信 (Rx) カードでは、入力された光信号が、光スイッチにより系選択され、可変波長フィルタで所要の波長選択が行なわれた後、O/E 変換、ビット DEMUX、(パラレル) デスクランブル、フレーム同期、時分割 (TD) チャンネル選択が行なわれ、所要のシリアルデジタル映像信号が出力される。HDTV 用 Tx, Rx カードでは、時分割多重、分離を行なわない。

また、Tx カード、Rx カード、光アンプカードは、各種監視機能を持ち、異常が発生するとアラームを出力する。

本装置により、 2.29Gb/s の疑似ランダムパターンを用いた 16 波長 (WD) チャンネルの伝送実験を行った結果、パワーペナルティは、 0.2dB と充分小さな値であった。

フジテレビジョン新社屋の映像信号分配光ネットワークは、SDTV システムの導入が 1996 年夏から始まり、運用試験を経て 1997 年 3 月より本格運用された。また、HDTV システムは、1999 年 4 月より本格運用が開始され、現在両システムともに順調に稼働している。

1990 年代後半には、約 1.5Gb/s の伝送速度を持つ HDTV シリアルデジタル信号を扱う大規模な電気スイッチが実現できなかった。このために、本光ネットワークは、東京、大阪の主要放送局に採用され、導入された。しかし、2000 年代になると、HDTV シリアルデジタル信号を扱う大規模な電気スイッチが実現され、主に経済性の理由から、各放送局に導入されている。

これに対する本光ネットワークとしての課題は、安価な可変範囲の広い可変波長フィルタを実現することである。技術的には、近年、MEMS (Micro Electro Mechanical System)を用いたファブリペロー可変波長フィルタ[13]が研究されるなど、安価な可変波長フィルタの実現の可能性が高まっている。しかし、WDM 技術導入の牽引車となっている基幹伝送の市場では、現状、可変波長フィルタに対するニーズが無く、このことが、安価な可変波長フィルタ実現への減速要因となっている。

一方、他の新しい光技術の導入により、放送局内映像信号分配ネットワークを構築する道も考えられる。一つには、大規模な光スイッチの実現による光スイッチの導入が考えられる。近年、大規模な MEMS 光スイッチ[14]が研究されている。大規模な光スイッチの実用化により、現在放送局で使用されている電気スイッチを光スイッチに置き換えることが考えられる。ただし、放送局の場合、基幹伝送系では、要求されない、分配接続 (ブロードキャスト) の機能が要求される。光スイッチに分配接続の機能をどの様にして実現するかが、この場合の課題である。もう一つは、IP (Internet Protocol)系の光通信装置の導入である。現在、IP 系の装置は、大容量、高速、低価格化が進んでいるため、これらの装置を映像信号分配に用いることが考えられる。この場合、映像信号の IP セル化 (フォーマット変換)が必要になるとともに、映像信号の実時間伝送の保証、ネットワークの信頼性の保証などが課題となる。

第4章の参考文献

- [1] A. Oliphant, R. Marsden, and J. Zubrzycki, "An Optical Routing System for Tomorrow's Television Studio Centers," SMPTE J., Vol. 96, pp. 660-666, July 1987.
- [2] K. J. Hood, P. W. walland, C. L. Nuttall, L. J. St. Ville, T. P. Young, A. Oliphant, R. P. Marsden, J. T. Zubrzycki, G. Cannell, C. Bunney, J. P. Laude, and M. J. Anson, "Optical Distribution Systems for Television Studio Applications," J. Lightwave Techol., Vol. 11, No. 5/6, pp. 680-687, May/June 1993.
- [3] N. Shimosaka, M. Fujiwara, H. Nishimoto, C. Burke, T. Kajitani, and M. Yamaguchi, "A Photonic Wavelength-Division and Time-Division Hybrid Multiplexed Network Using Tunable Wavelength Filters for a Broadcasting Studio Application," Proc. of ECOC/IOOC'91 Paris, France, Part 2, WeB9-3, pp. 545-548, Sept. 1991.
- [4] M. Misono, N. Shimosaka, T. Shiozawa, M. Murakami, and M. Fujiwara, "Practical Demonstration of WD/TD Optical Network for Broadcasting Station," Proc. of ECOC'95, vol. 1, Tu.B.1.6, pp. 247-250, Sept. 1995.
- [5] M. Fujiwara, T. Shiozawa, and N. Shimosaka, "WD/TD LAN for Large Capacity Video Signal Networking," Technical Digest of IOOC-95, vol. 1, TuA1-1, pp. 10-11, June 1995.
- [6] C. Kamise, S. Ando, T. Shiozawa, N. Shimosaka, and M. Fujiwara, "Practical Implementation of an Optical Network in Broadcast Station," SMPTE J., Vol. 106, pp. 117-122, Feb. 1997.
- [7] K. Takagi, M. Nishio, and S. Suzuki, "Wavelength-Division and Space-Division Hybrid Photonic Network," Proc. of JC-CNSS'94, pp. 367-372, July 1994.
- [8] T. Eguchi, "Pathological Check Codes for Serial Digital Interface Systems," SMPTE J., Vol.101, pp. 553-558, Aug. 1992.
- [9] D. Choi, "Parallel Scrambling Techniques for Digital Multiplexers," AT&T Tech. J., Vol. 65, Issue 5, Sep./Oct. 1986.
- [10] ITU-R Document 11-2/10-E Annex 1, March 1996.
- [11] ITU-T Recommendation G.692, "Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers," Oct. 1998.
- [12] K. Komatsu, S. Kitamura, T. Kato, M. Yamaguchi, S. Takano, H. Shimizu, N. Watanabe, K. Kosuge, and M. Kitamura, "Semiconductor External Modulators for 2.5 Gb/s Optical Transmission Using Selective Growth by MOVPE," Optoelectronics-Device and Technologies, Vol.9, No. 2, pp. 241-250, June 1994.
- [13] K. Suzuki, T. Oguma, T. Ueda, and T. Shibuya, "Design, Process, and Evaluation of a Tunable Optical Fabry-Perrot Filter Using a Silicon Capacitive Pressure Sensor," IEICE Trans. Electron., Vol. E83-C, No. 9, pp. 1435-1440, Sep. 2000.
- [14] 藤田博之, "光 MEMS の通信デバイス応用", 信学誌, Vol. 85, No. 7, pp. 496-503, July 2002.

第5章 上り周波数分割マルチアクセス／下り時分割多重光アクセスネットワーク

5. 1 序

周波数分割多重（FDM: Frequency Division Multiplexing）を用いた光マルチアクセスは、異なる電気のキャリア周波数を持つ複数の光源からの送信光を光カップラで多重することで容易に実現できる [1, 2]。この光マルチアクセスを図 5. 1 に示す様な光加入者ネットワークの上りの通信に応用することが考えられる。

従来、光加入者ネットワークの上りの通信には、時分割マルチアクセス（TDMA: Time Division Multiple Access） [3]や波長分割マルチアクセス（WDMA: Wavelength Division Multiple Access） [4-6]を用いる方式が提案されている。しかし、後者は、光フィルタや送信光源の波長制御などが必要であり、前者は、伝送速度が増すことや同期を必要とするなどの問題がある。前述の光マルチアクセスは、既存の電気通信装置を利用でき、これらの方式と比較して経済的に有利と考えられるが、従来、複数の送信用レーザの何れか2つのレーザの波長が近付くと、受信器で光ビート雑音が生じる問題があった。

本章では、上りの通信に FDM を用いた光マルチアクセスを、下りの通信に従来から経済的と考えられている放送モードによる時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing） [3]を用いた U-FDMA/D-TDM

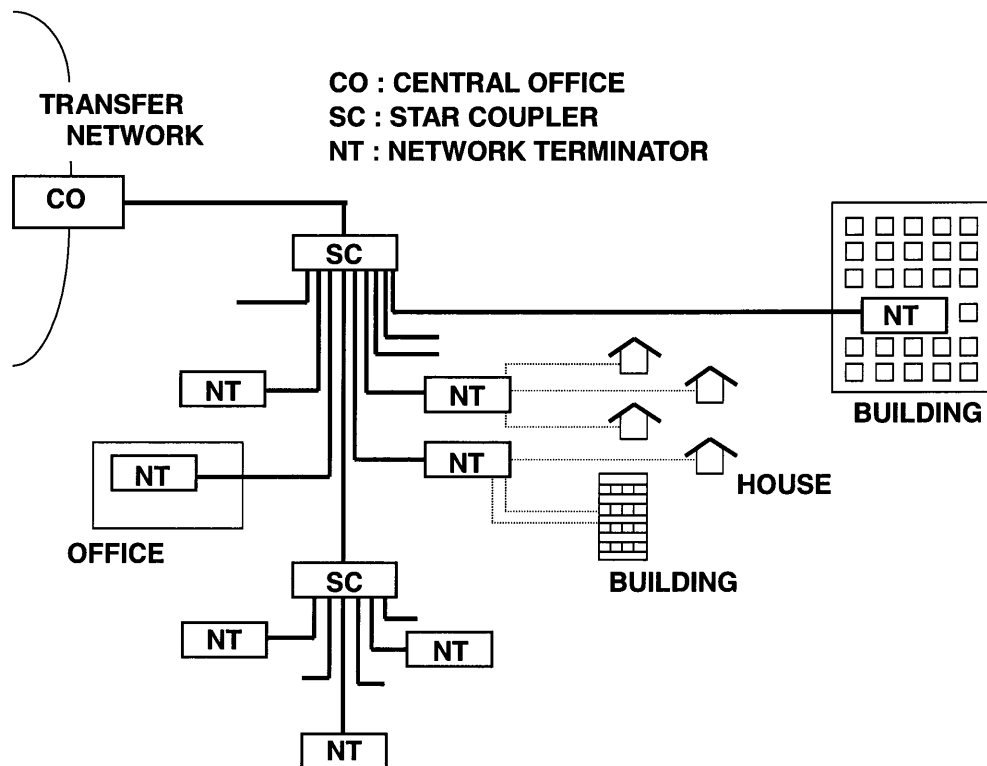


図 5. 1 光加入者ネットワーク概念図

光マルチアクセスネットワーク（Upstream-Frequency-Division-Multiple Access/Downstream-Time-Division-Multiplexing Optical Fiber Multiaccess Network）を提案する。また、光ビート雑音の回避方法の一つとして、上りの通信の送信光源に光スペクトル幅の広いスーパーluminescentダイオード（SLD: Superluminescent Diode）を用いることを検討する。更に、本ネットワークの CNR (Carrier to Noise Ratio)と光ファイバの波長分散によるパワーペナルティを計算し、チャネル容量を求め、本ネットワークの有効性を示す。

本光ネットワークは、マスター・スレーブ型の光 LAN (Local Area Network)と見なすこともできる。

5. 2 システム構成

図5. 1に示す光加入者ネットワークの概念図において、セントラルオフィス（CO: Central Office）は、事務所、ビルなどに置かれたネットワークターミネータ（NT: Network Terminator）と光ファイバで結ばれ、ネットワークターミネータは、ビル内、家屋などの加入者に電気ケーブルにより接続される。

提案する U-FDMA/D-TDM 光マルチアクセスネットワークは、上りの通信に、FDM を用いた光マルチアクセスを、下りの通信に、上りと異なるキャリア周波数による TDM を用いている。一般に、高速の受信器は、高速の送信器と比較し低価格であるので、上りの通信は、光マルチアクセスにより各チャネルの伝送速度を押えて伝送容量を増し、下りの通信は、TDM によりある程度伝送容量を増すことが経済的に有利である。また、4 節の検討で示すように、下りの通信では、BISDN (Broadband Integrated Services Digital Network)などのブロードバンドサービスを放送モードで提供できる伝送容量が得られる。

U-FDMA/D-TDM 光マルチアクセスネットワークの基本構成を図5. 2に示す。図5. 2では、ネットワークのトポロジとして、ダブルスター構造を用いている。ネットワークのトポロジは、ネットワークターミネータの分布、伝送損失の設計、ネットワークの拡張性などに関係するが、ここでは、簡単のため、代表的トポロジであるダブルスター構造で検討を進める。

図5. 2（a）において、光マルチアクセスを用いた上りの通信のために、各ネットワークターミネータには、単一のキャリア周波数が割当てられている。図5. 2（b）に使用周波数帯域割当の例を示す。ネットワークターミネータでは、加入者からの電話信号やデータをデジタル的に多重し、RF (Radio Frequency)信号に変換する。次に、この RF 信号は、電気／光（E/O: Electro-Optic）変換される。各ネットワークターミネータからの送信光は、スターカプラにより多重化され、セントラルオフィスの受信器で、光／電気（O/E: Opt-Electric）変換された後、電気の帯域通過フィルタにより、分離される。更に、RF 復調され、デジタル的にデマルチプレクスされる。この様に、FDM を用いた光マルチアクセスは、光カプラを用いた多重化と電気の帯域通過フィルタを用いたデマルチプレクスにより容易に実現される。ネットワークターミネータの送信光源については、次節で検討するが、ここではスーパーluminescentダイオード（SLD）を用いるものとする。

下りの通信では、セントラルオフィス内の半導体レーザ（LD: Laser Diode）が、E/O 変換器として使用される。この LD は、TDM 信号を搬送する RF 信号により駆動される。セントラルオフィスからの送

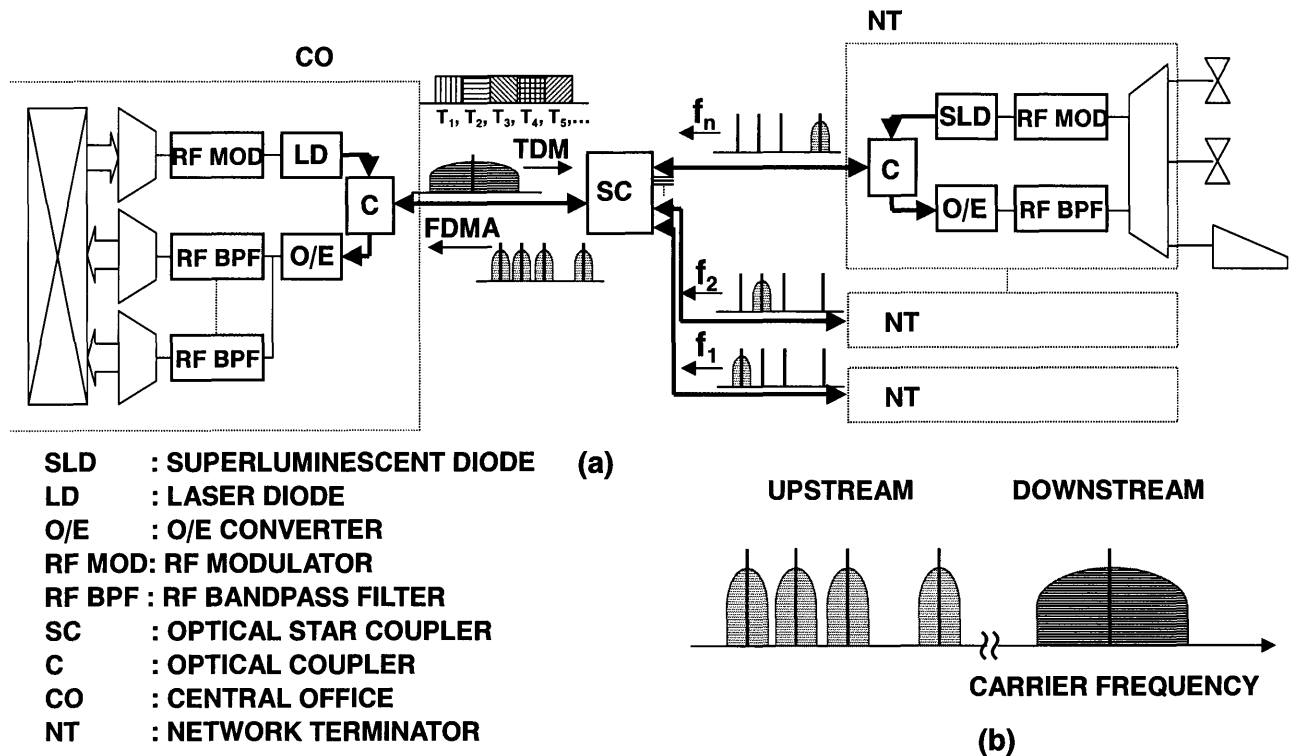


図 5. 2 U-FDMA/D-TDM 光マルチアクセスネットワークの基本構成

信光は、スターカプラにより、全てのネットワークターミネータに分配される。ネットワークターミネータでは、受信光を O/E 変換し、RF 復調した後、TDM 信号の予めネットワークターミネータに割り当てられたタイムスロットを選択して受信する。受信信号はデジタル的に多重されているので、更にこれをデマルチプレクスし、加入者に分配する。

U-FDMA/D-TDM 光マルチアクセスネットワークの特長を以下にまとめる。

- (1) 下りの TDM 通信により、ブロードバンドサービスを放送モードで提供する。
- (2) 上りの通信の FDMA チャンネル数を増やすことにより、上りの伝送容量あるいはネットワークターミネータの数を容易に増やすことができる。
- (3) 上りと下りの通信に異なるキャリア周波数を割り当てることで、光学素子などの反射による上りと下りの通信間のクロストークを低減できる。これによりピンポン伝送を用いること無しに双方向通信が容易に実現できる。
- (4) 上りの通信において、各ネットワークターミネータに単一のキャリア周波数を割り当てることで、通常のサブキャリア多重 (SCM: Subcarrier Multiplexing) 方式を用いたときに生じる相互変調歪が無い。従って、高調波が使用周波数帯域内に発生しない様に使用周波数帯域を割り当てれば、ネットワークターミネータの送信器に線形性の高いデバイスを必要としない。
- (5) 次節で説明する様に、ネットワークターミネータの送信光源に広い光スペクトル幅を持つ SLD を用いるので、セントラルオフィスの受信器で光ビート雑音が生じない。

5. 3 光ビート雑音の検討

複数の導体レーザ(LD)をネットワークターミネータの送信光源として用い、同時に送信を行う場合、セントラルオフィスの受信器における光ビート雑音が問題となる。この問題は、幾つかの文献で議論されている[6, 7]。光ビート雑音を避けるための一つの方法として、ネットワークターミネータの送信光源に用いる半導体レーザ(LD)の波長を制御する方法がある。しかし、波長を規定した半導体レーザは、比較的高価であることや温度制御が必要であることなどの問題点もある。ここでは、ビート雑音を回避する一つの方法として、LED (Light Emitting Diode)の一種であるスーパールミネッセントダイオード(SLD)をネットワークターミネータの送信光源として用いる方法を検討する。SLDの光スペクトル幅は広いために、セントラルオフィスの受信器における光ビートのスペクトル幅は信号の帯域と比較して非常に広くなるので、光ビートによる雑音のレベルは低く、信号のCNR (Carrier to Noise Ratio)に殆ど影響を与えない。

図5. 3に光ビート雑音の例を示す。図5. 3 (a)は、実験系のブロック図である。二つの送信光源は、それぞれ、145MHz, 155MHz で変調され、出力光は、光ファイバカプラで結合された後、O/E変換され、受信信号がスペクトルアナライザで観測される。スペクトルアナライザの分解能帯域幅は、30kHz に設定した。図5. 3 (b), (c), (d)は、光源にLDを用いたときの受信信号のスペクトルである。二つのLDの波長間隔 $\Delta\lambda_{LD}$ は、LDの温度と注入電流を制御して調整した。波長間隔 $\Delta\lambda_{LD}$ が小さくなるにつれて、明かなCNRの劣化が起こることが観測される。図5. 3 (e)は、光源にSLDを用いたときの受信信号のスペクトルである。使用したSLDの光スペクトル幅 $\Delta\lambda$ は、55nmであった。二つのSLDの中心波長は、ほぼ等しいにも関わらず、光ビート雑音の影響は全く見られない。

通常のLEDは、光ファイバとの結合効率が低く、光ファイバ出力が小さい(例えば、-15dBm)のに対して、温度制御されたSLDを用いれば、-3dBm以上の光ファイバ出力が得られる。このため、上りの送信光源にSLDを用いた。次節の検討で示すように、SLDを用いることは、LDと比較して、伝送容量を制限するが、加入者ネットワークでは、上りの通信より、下りの通信に大きな伝送容量が要求されるので、多くの応用において有効な方法と考えられる。

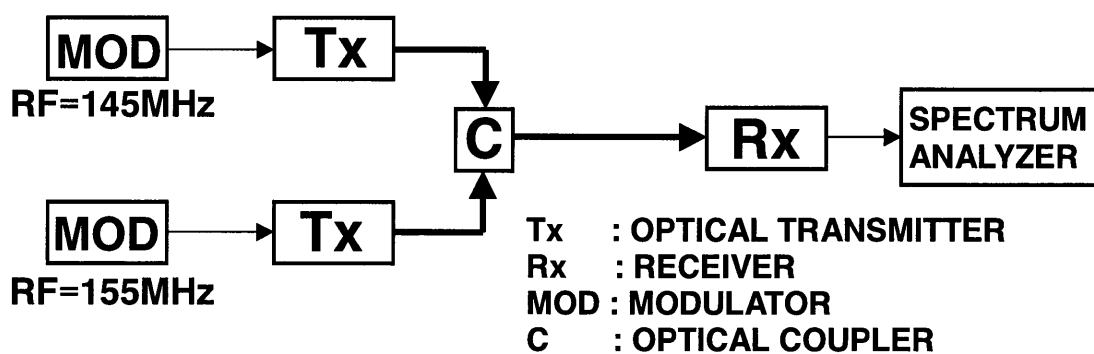
5. 4 システム設計

本節では、最大チャネル容量を求めるために、伝送損失、LDとSLDを送信光源として用いた通信システムのCNR、光ファイバの波長分散の影響によるパワーペナルティを求める。送信光源に光スペクトル幅の広いSLDを用いた場合、光ファイバの波長分散によるパワーペナルティが無視できない。

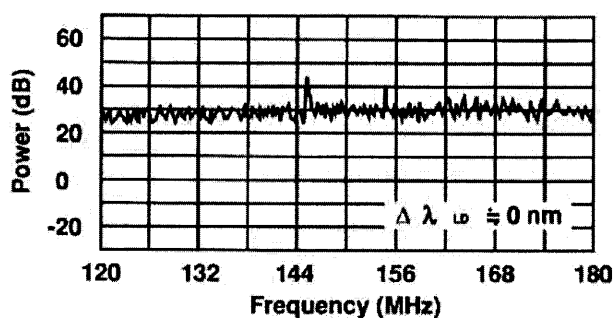
5. 4. 1 レベル設計

図5. 4に、パッシブダブルスター構造のネットワークの伝送路を示す。方向性結合器を用いた1:Nのスターカプラを仮定すると、信号光は、スターカプラ(SC)で $\log_2 N$ 段の3dBカプラを通過する。伝送損失 L_T (dB)は、

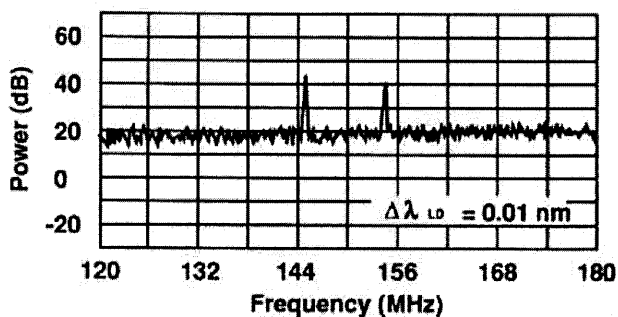
$$L_T = (\log_2 N + 2) (L_d + 3) + L_f + 4L_c \quad (5-1)$$



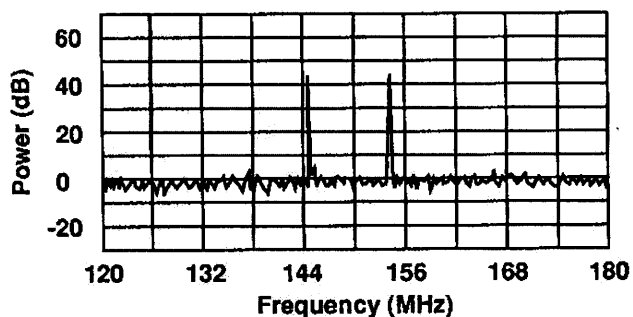
(a) 実験系のブロック図



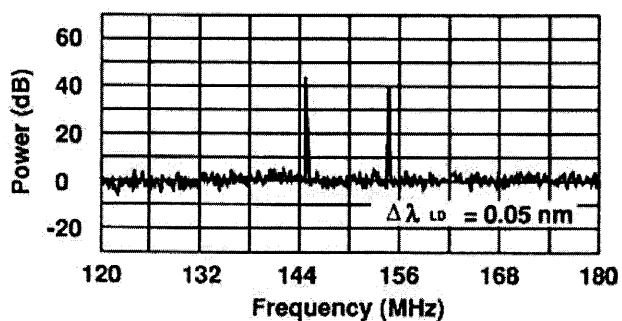
(b) 半導体レーザを送信光源とした場合
(波長間隔 $\Delta \lambda_{LD} \approx 0 \text{ nm}$)



(c) 半導体レーザを送信光源とした場合
(波長間隔 $\Delta \lambda_{LD} = 0.01 \text{ nm}$)



(e) スーパーluminescentダイオードを
送信光源とした場合



(d) 半導体レーザを送信光源とした場合
(波長間隔 $\Delta \lambda_{LD} = 0.05 \text{ nm}$)

図 5. 3 光ビート雑音の例

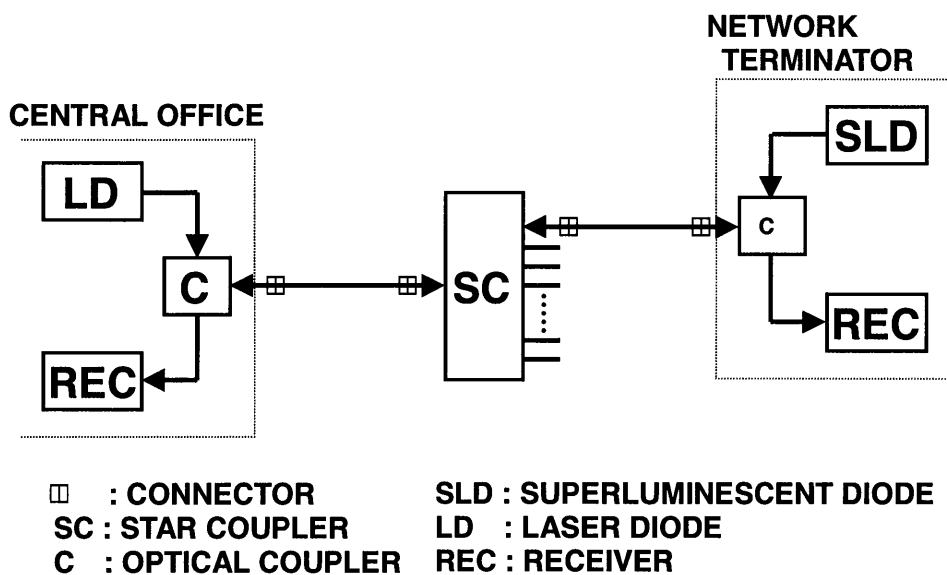


図 5. 4 パッシブダブルスターの伝送路

表 5. 1 送信レベルと伝送損失

Parts	Power or Loss
Transmitter Power	
Upstream (SLD)	-3 dBm
Downstream (LD)	3 dBm
Coupler Loss	3.75 dB
Fiber Loss L_f at 1.5 μ m (10km)	2 dB
Fiber Loss L_f at 1.3 μ m (10km)	5 dB
Connector Loss L_c	0.5 dB
Star Coupler	
Excess Loss L_d / Coupler	0.75 dB
Splitting Loss / Coupler	3 dB

で表される。ここで、 L_d 、 L_f 、 L_c は、それぞれ、3dB カプラの過剰損失，光ファイバの損失，コネクタの挿入損失である。第 1 項の (L_d+3) は、3dB カプラ 1 段の損失を表し、 $(\log_2 N + 2)$ は、スターカプラの 3dB カプラの段数に送受信器内の 3dB カプラ各 1 段を加えた全 3dB カプラ総段数を表す。第 3 項は、コネクタ総数 4 としたコネクタによる全損失を表す。これら損失の値と送信光源のパワーを表 5. 1 に示す。

例えば、分岐数（ネットワークターミネータの数） N を 32, 使用波長を 1.5 μ m, 光ファイバ長を 10km とすると、伝送損失 L_T は、30.25dB となる。従って、上りと下りの受信光パワーは、それぞれ-18.25dBm, -27.25dBm となる。ただし、上りについては、送信光源の数を N とし、総和を受信光パワーとしている。

5. 4. 2 下りの CNR

半導体レーザ (LD) を送信光源に用いた通信システムの CNR (CNR_{LD}) は、次式で与えられる[8-10]。

$$CNR_{LD} = \frac{OMI^2 (P_r \eta)^2 / 2}{\{ RIN (P_r \eta)^2 + 2 e P_r \eta + I_n^2 \} B} \quad (5-2)$$

ここで、OMI は、光変調指数 (OMI: Optical Modulation Index), P_r は、受信光パワー, η は、光検出器の光電変換効率, RIN は、LD の相対強度雑音, e は、電気素量, I_n は、受信器の等価入力雑音電流密度, B は、受信器の帯域である。この式において、分子は、キャリア強度を、分母の第 1 項は、LD の強度雑音を、第 2 項は、量子雑音を、第 3 項は、受信器の雑音を表す。

図 5. 5 に、 $RIN = 6.31 \times 10^{-16} \text{ Hz}^{-1}$ (-152 dB/Hz), $I_n = 10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $\eta = 0.8 \text{ mA/mW}$, $OMI = 90 \%$, $B = 10 \text{ MHz}$, \dots , 3 GHz としたときの CNR の計算値を示す。受信光パワーの小さい領域では、受信器の雑音が支配的であり、CNR は、受信光パワーに比例する。一方、受信光パワーの大きな領域では、強度雑音が支配的であり、CNR は、一定値に収束する。

例えば、変調方式として QPSK (Quadri-Phase Shift Keying) を用い、CNR として、16dB 以上が必要であるとする。このとき、分岐数 (ネットワークターミネータの数) N を 32, 使用波長を $1.5 \mu\text{m}$, 受信光パワーを -27.25dBm とすると、図 5. 5 より、受信器の帯域 B は、約 400MHz 以下となる。この帯域は、チャンネル容量 800Mb/s に相当する。

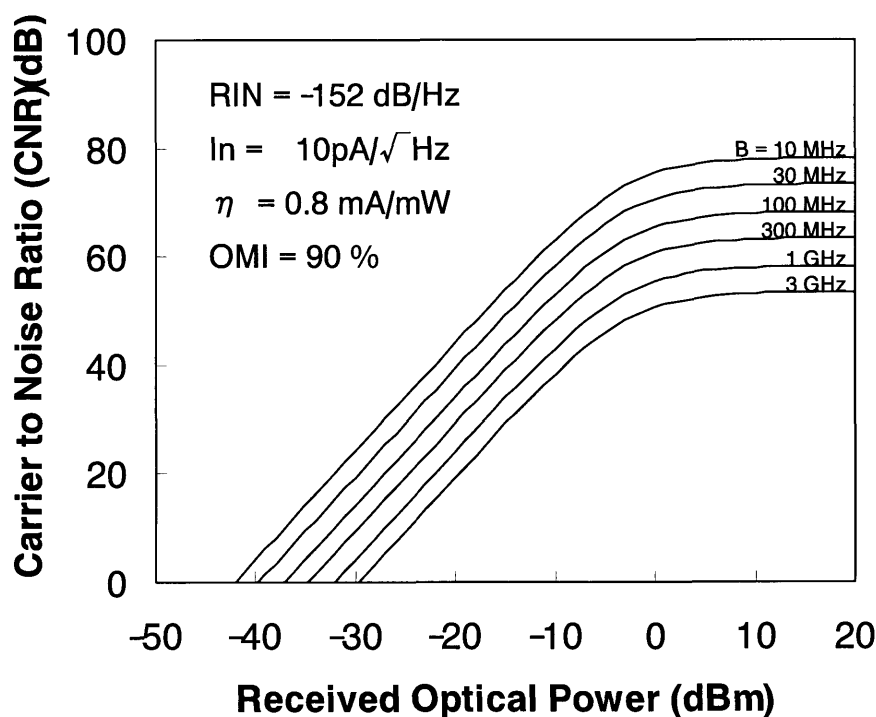


図 5. 5 下りの通信(LD)の CNR

5. 4. 3 上りの CNR

スーパールミネッセントダイオード (SLD) の強度雑音は、レーザアンプの自然放出光－自然放出光ビート雑音に相当する[11]。受信光パワー P_r に対して、強度雑音は、 $(P_r \eta)^2 B / \Delta \nu$ で与えられる。ここで、 $\Delta \nu = (c/\lambda^2) \Delta \lambda$ 、 $\Delta \lambda$ は、SLD の光スペクトル幅、 c は、光速、 λ は、SLD の波長、 η は、光検出器の光電変換効率、 B は、受信器の帯域である。

従って、SLD を送信光源に用いた通信システムの CNR (CNR_{SLD})は、次式で与えられる。

$$CNR_{SLD} = \frac{OMI^2 (P_r \eta)^2 / 2}{\{(P_r \eta)^2 / \Delta \nu + 2 e P_r \eta + I_n^2\} B} \quad (5-3)$$

この式において、分子は、キャリア強度を、分母の第 1 項は、SLD の強度雑音を、第 2 項は、量子雑音を、第 3 項は、受信器の雑音を表す。

図 5. 6 に、 $\Delta \lambda = 50 \text{ nm}$ 、 $I_n = 10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\eta = 0.8 \text{ mA/mW}$ 、 $OMI = 2 \%$ 、 $B = 10 \text{ k}$ 、 \dots 、 30 MHz としたときの CNR の計算値を示す。LD の場合と同様に、受信光パワーの小さい領域では、受信器の雑音が、受信光パワーの大きな領域では、強度雑音が支配的である。

例えば、分岐数 (ネットワークターミネータの数) N を 32、使用波長を $1.5 \mu\text{m}$ 、受信光パワーを -18.25 dBm とすると、図 5. 6 より、CNR を 16dB 以上とする受信器の帯域 B は、約 11.4MHz 以下となる。しかし、後述する様に、波長分散によるパワーペナルティが生ずるので、実際には、約 750kHz

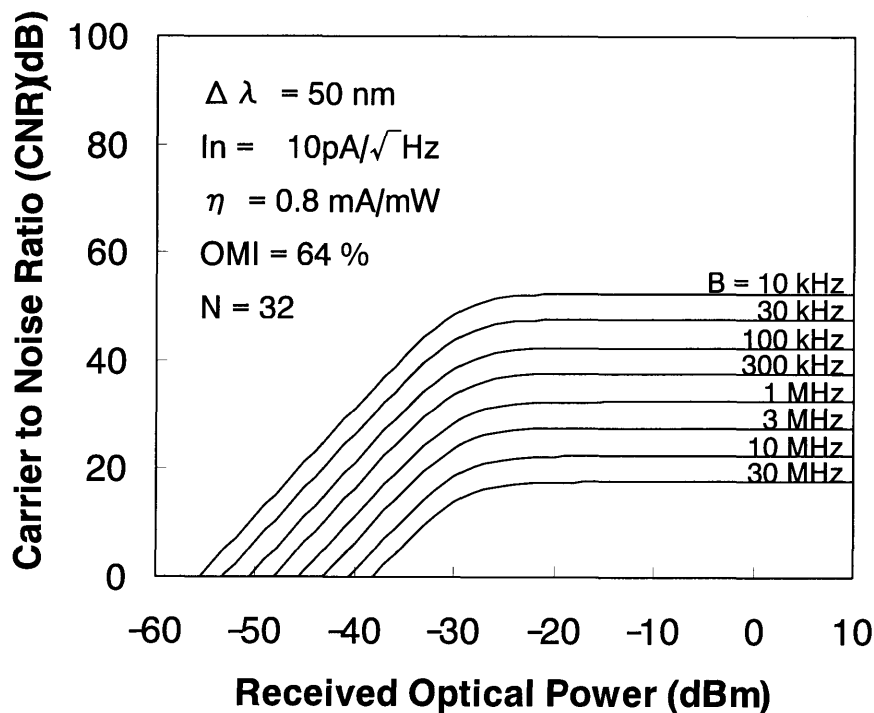


図 5. 6 受信帯域 B をパラメータとした上りの通信 (SLD) の CNR

以下でなければならない。

図5. 7に、 $\Delta\lambda = 50\text{ nm}$, $I_n = 10\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, $\eta = 0.8\text{ mA/mW}$, $B = 300\text{ kHz}$, $N = 1, \dots, 64$ としたときの CNR の計算値を示す。上りの通信の場合、各ネットワークターミネータに単一のキャリア周波数を割当てているので、チャンネル数（分岐数 N ）の増加に従って、OMI は、相対的に減少する。図5. 7において、OMI と共にチャンネル数を示した。ここで、SLD の非直線性があまり問題とならない様に、1チャンネル当りの OMI を 64% とした。図5. 7において、チャンネル毎の受信光パワーが一定の CNR を破線で示した。受信器雑音が支配的な領域では、図5. 7の破線で示される CNR は、ほぼ一定である。

5. 4. 4 分散によるパワーペナルティ

スーパーluminescentダイオード（SLD）の様に光スペクトル幅の広い光源を送信光源に用いた場合、光ファイバの分散によるパワーペナルティが生ずる。送信される信号波形を $\cos(2\pi f t)$ とし、簡単のために、SLD の光スペクトルを矩形とすると、光ファイバ伝送後の信号波形は、

$$\int_{-\Delta\lambda/2}^{\Delta\lambda/2} (1/\Delta\lambda) \cos\{2\pi f(t + \lambda L_{cd})\} d\lambda = \frac{\sin(\pi f \Delta\lambda L_{cd})}{(\pi f \Delta\lambda L_{cd})} \cos(2\pi f t)$$

となる。ここで、 f は、キャリア周波数、 L は、ファイバ長、 $c_d = \lambda/c |d^2n/d\lambda^2|$ は、光ファイバの1次の波長分散を表す。ここでは、高次の波長分散を無視した。上式より、光ファイバの波長分散によるパ

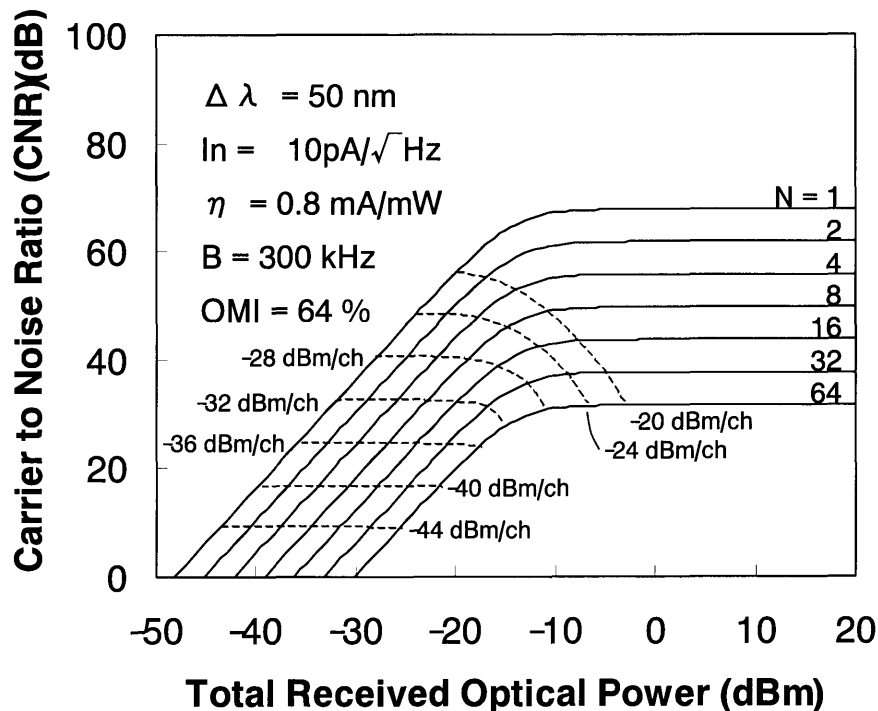


図5. 7 分岐数 N をパラメータとした上りの通信(SLD)の CNR

ワーペナルティ L_p (dB)は、次式で与えられる。

$$L_p = 10 \log \left\{ \frac{\sin(\pi f \Delta \lambda L c_d)}{(\pi f \Delta \lambda L c_d)} \right\}^2 \quad (5-4)$$

図5.8に、光ファイバの波長分散によるパワーペナルティの計算結果を示す。ここで、18, 5ps/nm/kmは、それぞれ、光ファイバの波長 1.5, 1.3 μ m での1次の波長分散である。LDを光源とした場合、1.3 μ mは、零分散波長であるが、ここでは、光源の光スペクトル幅が広いことを考慮し、大きめに見積った値を用いた。同図の下側の横軸は、光ファイバ長 L を 10km としたときのキャリア周波数 f と光源の光スペクトル幅 $\Delta \lambda$ の積である。光ファイバの波長分散によるパワーペナルティ L_p は、キャリア周波数 f と光源の光スペクトル幅 $\Delta \lambda$ の積の関数であり、この値が大きくなる程、パワーペナルティも大きくなる。従って、光源として使用する SLD の光スペクトル幅 $\Delta \lambda$ は、光ビート雑音と光強度雑音が問題としない範囲で、適当に狭い方が、光ファイバの波長分散によるパワーペナルティ L_p が小さくなる。

5. 4. 5 伝送容量

(5-2)式, (5-3)式より、伝送帯域 B を求め、変調方式として QPSK を仮定しチャネル容量を伝送帯域の2倍とすると、上りと下りのチャネル容量 C_U, C_D (b/s)は、それぞれ次式で与えられる。

$$C_U = \frac{2 O M I^2 (P_r \eta)^2 / 2}{\{(P_r \eta)^2 / \Delta \nu + 2 e P_r \eta + I_n^2\} \text{CNR}} \quad (5-5a)$$

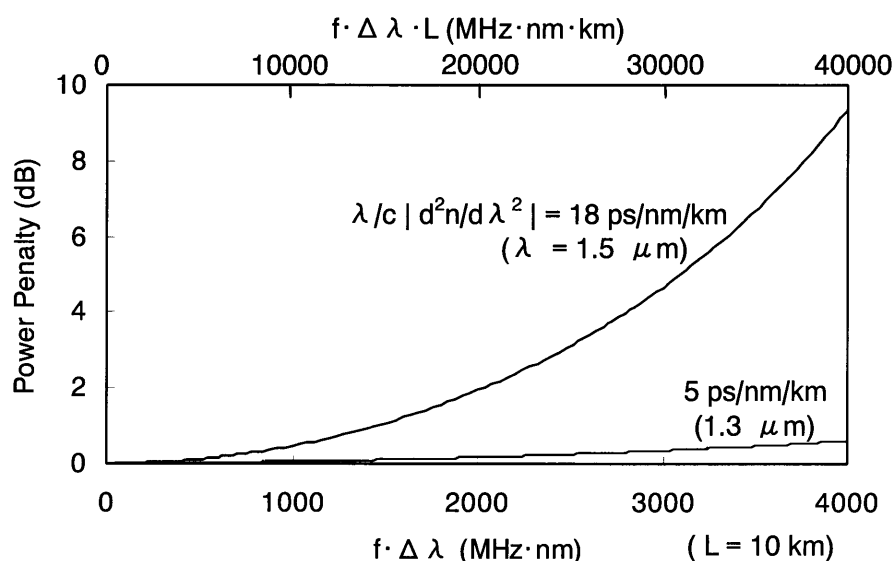


図5.8 光ファイバの分散によるパワーペナルティ

$$C_D = \frac{2 OMI^2 (P_r' \eta)^2 / 2}{\{RIN (P_r \eta)^2 + 2 e P_r \eta + I_n^2\} \text{CNR}} \quad (5-5b)$$

$$10 \log(P_r) = L_t - L_T$$

$$10 \log(P_r') = L_t - L_T - L_P$$

ここで、CNR は、許容 CNR, P_r' は、波長分散によるパワーペナルティを考慮した上りの受信光パワー、 L_t は、送信光パワー、 L_T は、(5-1)式の伝送損失、 L_P は、(5-4)式の波長分散によるパワーペナルティである。ここで、パワーペナルティ L_P は、キャリア周波数の関数であるので、上りの通信に関し、SLD の非線形性により生ずる高調波が使用帯域内に発生しないように、最小のキャリア周波数を $2B_U \cdot N$ 、最大のキャリア周波数を $3B_U \cdot N$ と仮定する。 B_U は、最大信号帯域で、 $C_U/2$ により求められる。このような配置にすることにより、最小のキャリア周波数の高調波は、 $4B_U \cdot N$ 以上の周波数になる。従って、上りの最大チャネル容量は、(5-5)式をセルフコンシステントに解くことにより得られる。

以上の様にして求めた、分岐数（ネットワークターミネータの数） N に対する最大チャネル容量を図 5. 9 に示す。ここで、許容 CNR を 16dB, SLD の光スペクトル幅 $\Delta \lambda$ を 50nm とした。図 5. 9 において、実線、破線は、それぞれ波長 1.5, 1.3 μm を用いた場合の最大チャネル容量を示す。例えば、波長 1.5 μm , 分岐数 32 に対して、上り約 1.5Mb/s, 下り約 1.8Gb/s の最大チャネル容量が得られる。

一方、近年では、C-WDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)用半導体レーザが入手できるようになってきた。アナログ用半導体レーザと比較して、線形性に劣るが、本ネットワークでは、上りの通信（ネットワークターミネータの送信器）に線形性の高いデバイスを必要としないため、光ビート雑音を回避するために、この C-WDM 用半導体レーザが使用できる。この場合、上り、下りともに光源は、半導体レーザとなるので、(5-5)式は、次式のようになる。

$$C_U = \frac{2 OMI^2 (P_r' \eta)^2 / 2}{\{RIN (P_r \eta)^2 + 2 e P_r \eta + I_n^2\} \text{CNR}} \quad (5-6a)$$

$$C_D = \frac{2 OMI^2 (P_r' \eta)^2 / 2}{\{RIN (P_r \eta)^2 + 2 e P_r \eta + I_n^2\} \text{CNR}} \quad (5-6b)$$

$$10 \log(P_r) = L_t - L_T$$

$$10 \log(P_r') = L_t - L_T - L_P$$

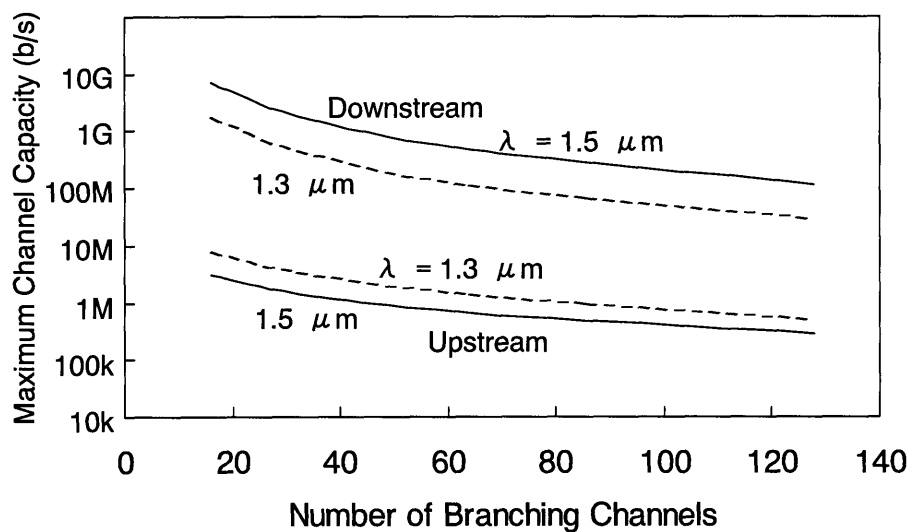


図5. 9 最大チャネル容量

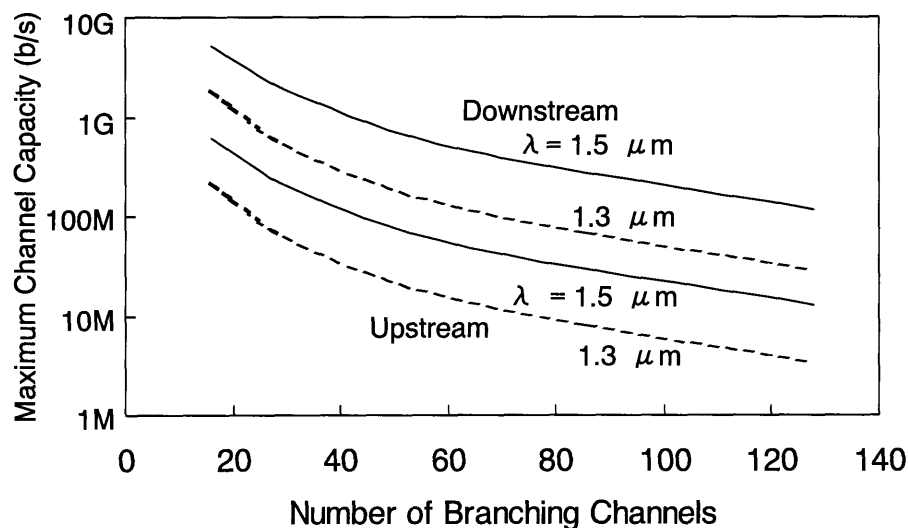


図5. 10 最大チャネル容量（上り半導体レーザの場合）

SLD の場合と同様にして、上式より求めた分岐数（ネットワークターミネータの数） N に対する最大チャネル容量を図5. 10に示す。例えば、波長 $1.5 \mu\text{m}$ 、分岐数 32 に対して、上り約 180Mb/s, 下り約 1.6Gb/s の最大チャネル容量が得られる。

5. 5 結

本章では、加入者ネットワークへの適用が期待できる U-FDMA/D-TDM (Upstream-Frequency-Division-Multiple Access/Downstream-Time-Division-Multiplexing) 光マルチアクセスネットワークを提案した。本ネットワークでは、上りの信号光をスターカプラで多重化し、この信号をセントラルオフィスの受信器の帯域通過フィルタにより電氣的に分離する。また、各ネットワークターミネータに単一のキャ

リア周波数を割当てるので、通常の SCM 方式と比較して、ネットワークターミネータの送信器に線形性の高いデバイスを必要としない。下りの通信には、TDM を用い、ブロードバンドサービスを放送モードで提供する。また、上りと下りの通信に異なるキャリア周波数を割当てることで、双方向通信を容易に実現している。更に、セントラルオフィスの受信器での光ビート雑音を避ける一つの方法としてネットワークターミネータの送信光源に広い光スペクトル幅を持つ SLD を用いることを提案した。

本ネットワークの CNR と光ファイバの波長分散によるパワーペナルティを計算し、チャンネル容量を求めた。例として、光ファイバ長 10km, 分岐数 32 に対して、上り約 1.5Mb/s, 下り約 800Mb/s の最大チャンネル容量が得られる。また、ビート雑音の影響を回避するために、近年入手可能になった C-WDM 用半導体レーザを上りの通信に用いた場合のチャンネル容量を求めた。この場合、例えば、波長 $1.5\mu\text{m}$, 分岐数 32 に対して、上り約 180Mb/s, 下り約 1.6Gb/s の最大チャンネル容量が得られる。

加入者ネットワークの場合、経済性が重視される。SCM 技術を用いた本光ネットワークは、現時点での経済性を考慮した一つの提案である。一方、低価格な WDM デバイスの研究も進められている[12]。上りのマルチアクセスに WDM 技術を導入した場合、ベースバンドでの信号処理が可能のため、伝送容量の拡大が容易になる。今後の加入者ネットワークの伝送容量の拡大と WDM デバイスの低価格化が、SCM 技術を用いた加入者ネットワークの伝送速度当りのコストと WDM 技術をもちいた加入者ネットワークの伝送速度当りのコストとを逆転させる可能性が充分ある。将来における加入者ネットワークへの WDM 技術の導入を大いに期待したい。

第5章の参考文献

- [1] T. E. Darcie, "Subcarrier Multiplexing for Multiple-Access Lightwave Networks", J. Lightwave Tech., Vol. 5, No. 8, pp. 1103-1110, Aug. 1987.
- [2] R. J. S. Bates and A. Varma, "Broadband Computer Network Based on Optical Subcarrier Multiplexing", Photonic Switching, Technical Digest, FD4-1, pp. 250-253, Mar. 1991.
- [3] J. R. Stern, J. W. Ballance, D. W. Faulkner, S. Homung, D. B. Payne, and K. Oakley, "Passive Optical Local Networks for Telephony Applications and Beyond", Electron. Lett., Vol. 23, No. 24, pp. 1255-1257, Nov. 1987.
- [4] Y. M. Lin and D. R. Spears, "Passive Optical Subscriber Loops with Multiaccess", J. Lightwave Technol., Vol. LT-7, No. 11, pp. 1769-1777, Nov. 1989.
- [5] N. Kashima, "Upgrade of Passive Optical Subscriber Network", J. Lightwave Technol., Vol. LT-9, No. 1, pp. 113-120, Jan. 1991.
- [6] N. K. Shankaranarayanan, S. D. Elby, and K. Y. Lau: "WDMA/Subcarrier-FDMA Lightwave Networks: Limitations Due to Optical Beat Interference", J. Lightwave Technol., Vol. LT-9, No. 7, pp. 931-943, July 1991.
- [7] C. Desem, "Optical Interference in Lightwave Subcarrier Multiplexing Systems Employing Multiple Optical Carriers", Electron. Lett., Vol. 24, No. 1, pp. 50-52, Jan. 1988.
- [8] R. Olshansky, V. A. Lanzisera, and P. M. Hill, "Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems for Broad-Band Distribution", J. Lightwave Tech., Vol. 7, No. 9, pp. 1329-1342, Sep. 1989.
- [9] W. I. Way, "Subcarrier Multiplexed Lightwave System Design Considerations for Subscriber Loop Applications", J. Lightwave Tech., Vol. 7, No. 11, pp. 1806-1818, Nov. 1989.
- [10] 渋谷真, 金井敏仁, 土門渉, 江村克己, "マイクロセル移動通信システムにおける光ファイバフィードの特性の検討", 信学技報, RCS91-31, pp. 15-21, Sep. 1991.
- [11] Y. Yamamoto, "Noise and Error Rate Performance of Semiconductor Laser Amplifiers in PCM-IM Optical Transmission Systems," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-16, No. 10, pp. 1073-1081, Oct. 1980.
- [12] 吉田淳一, 宮哲雄, 吉國裕三, 姫野明, "次世代光ネットワークの実現に向けた光デバイスの研究開発動向," N T T 技術ジャーナル, pp. 58-62, 1998.

第6章 波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワーク

6.1 序

近年のコンピュータ，ワークステーション端末の高速化，大規模化にともない、データ転送用 LAN (Local Area Network)の高スループット化の必要性が高まっている。また、将来の B-ISDN (Broad Band Integrated Digital Network)の実現に向けて高速 ATM (Asynchronous Transfer Mode)網の検討，加入者転送網の ATM 化の検討が進められている[1]。これらの実現に当っては、パケットベースの高スループットなネットワークが不可欠となる。しかし、伝送速度の高速化のみによる高スループット化には限界があるため、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) による光ネットワークの高スループット化の検討が進められている[2]。

本章では、波長アドレス（波長ラベル）を用いたパケット転送光ネットワークを提案する。本光ネットワークは、WDM 技術を用いたもので、光 ATM 交換網としての機能も持つ。従って、高速光転送網[3]，MAN (Metropolitan Area Network)，LAN 等のネットワークに用いることができる。また、本光ネットワークは、ハードウェアがノードに分散しているので、従来提案されている集中型の WDM 交換システムと比較して、実現性が高い。

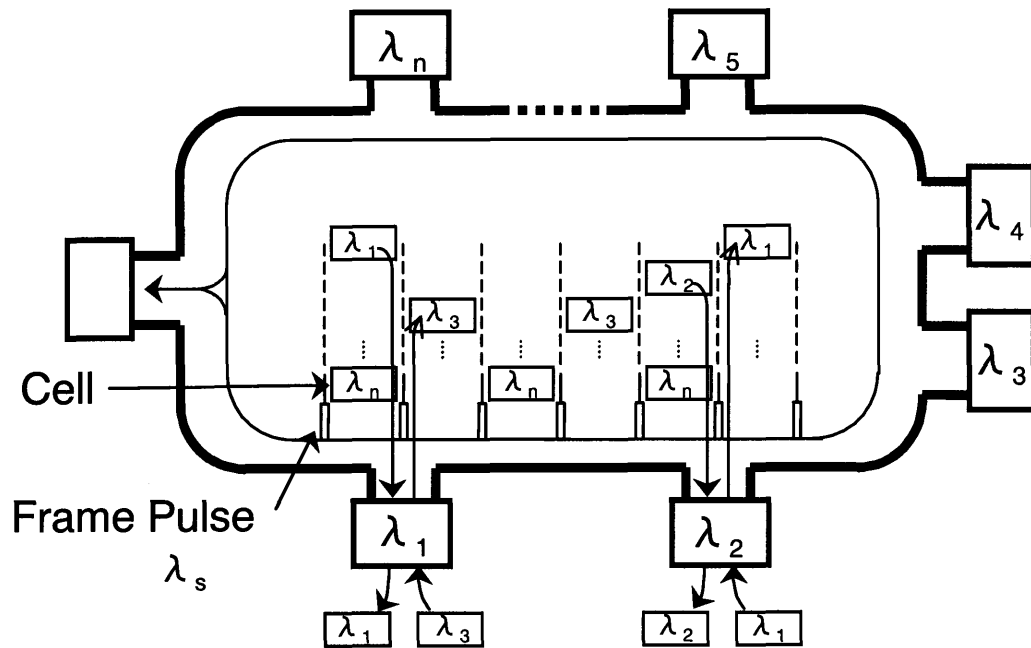
本光ネットワークに必要な要素技術の一つとして、光源の高速波長切換えがある。本章では、高速波長切換え安定化光源を提案するとともに、複数の高速波長切換え安定化光源と光スイッチを用いた高速波長切換え方式を提案する。

更に、本光ネットワークの基本動作である高速パケット信号伝送，選択受信の実験について述べる。

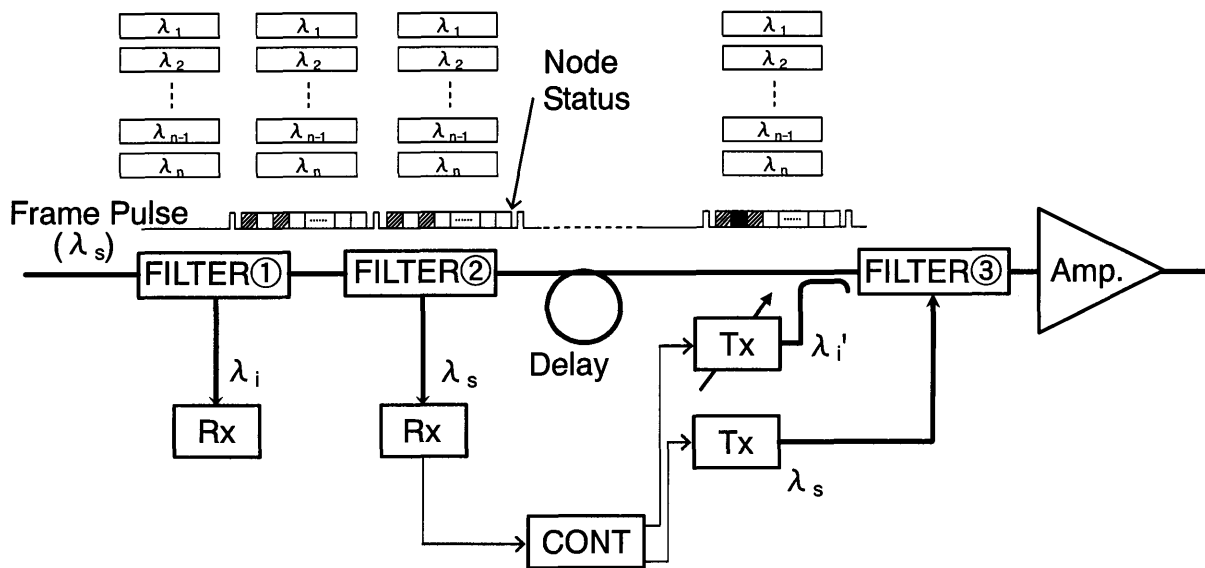
6.2 システム構成

図 6.1 (a) に提案する波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークの構成を示す。本光ネットワークは、アクセス方式として、スロットドループ（あるいは、バス）を採用する。ネットワーク内の各ノードは、互いに異なる波長によってアドレスされる。各ノードには、自ノードに割当てられたアドレス波長 λ_i の信号とスロットを規定するためのフレームパルスを送送する波長 λ_s の信号を抽出するため、2 台の固定波長フィルタが設置されている。同図 (a) において、データパケットは、このフレームパルスに同期したタイムスロット上を送送される。データパケットの送信は、送信先ノードのアドレス波長の信号が着信スロットに無いこと（アイドル状態）を確認した後、可変波長光源により送信先ノードのアドレス波長の信号を送出することにより行う。このアイドル状態の確認は、例えば、フレームパルスを送送する波長 λ_s に制御信号を乗せることにより行う。また、自ノード宛のデータパケットは、前述の固定波長フィルタにより選択受信する。

本光ネットワークには、次の特長がある。



(a) ネットワークの構成



(b) ノード構成例

図6. 1 波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークの構成

- (1) 波長分割多重により等価的にマルチリンク構成としているため高スループットが得られる。
- (2) (各ノードでアイドル状態を検出し、データパケットを送信するので、) アクセス制御が簡便かつ高速で行える。これによりパケット転送遅延を抑えることができる。
- (3) 本ネットワークは、可変波長半導体レーザ、固定波長フィルタなどの現状入手可能なハードウェアで構成でき、実現性が高い。
- (4) 非受信 WD チャンネルは、O/E (Opto-Electric)変換されずに光のまま透過するため、少ないハードウェア量で構成が可能である。

図6. 1 (b) にノード構成例を示す。この例では、アクセス制御は、以下の様に行われる。フレームパルスを送送する波長 λ_s の信号にタイムスロット毎に WD チャンネル使用状況を示すステータスビットを挿入する。波長 λ_s の信号を固定波長フィルタ②により抜き出し、O/E (Opto-Electric)変換することにより、フレームの同期および各WDチャンネルの使用状況を各ノードで検出する。送信要求の生じたノードでは、ノード内の可変波長光源の波長を宛先アドレス波長に同調し、同 WD チャンネルのアイドル状態を検出すると、データパケットを送出する。現状では、実用的な可変波長 ADD (Add Drop)フィルタが入手できないため、同 WD チャンネルの送出は、3dB カプツラを介して行う。また、宛先アドレス波長に対応するステータスビットを使用中（ビジー状態）に書換え、フレームパルスとともに波長 λ_s で固定波長 ADD フィルタ③を介して伝送路に送出する。各ノードを透過する WD チャンネルに対して、上記のステータスビットの処理およびデータパケット送出時間分の遅延時間を与えるため、各ノードに光ファイバを用いた遅延（Delay）を設ける。各ノードの出力に光ファイバアンプ（ブースタアンプ兼ラインアンプ）を設けて、次ノードまでの伝送路損失と次ノード内のフィルタ等の挿入損失を補償する。受信ノードでは、固定波長フィルタ①を用いて自ノード宛の WD チャンネルを選択受信する。

なお、将来的に上述のアクセス制御を光信号処理とすることにより、アクセス制御の高速化が実現できる。これにより、各ノードでの遅延をより小さくすることが可能になる。

6. 3 システム検討

本章で提案する光ネットワークの適用分野として加入者転送網，MAN あるいは、LAN がある。表6. 1 にそれぞれのシステム仕様を示す。加入者転送網の仕様は、SONET (Synchronous Optical Network)を参考にして想定した。SONET は、最大ノード数 16 のループ構成をとるが、典型的な規模としては、ノード数 7，総伝送路長 150 マイル（約 240km）程度である[4]。このループ長は、国内のほとんどの都道府県で域内ループ[5]を構成できる規模である。また、LAN としては、現在実用化されているフロントエンド LAN システム（例えば NEC 製 LOOP6560: 伝送速度 400Mb/s，ノード数 64）を高速化した様な適用分野を設定した。以下では、光デバイス，制御技術の点から本ネットワークの実現性を検討する。また、パワーバジェットの設計例を示す。

6. 3. 1 波長切換え光源の高速波長安定化

提案した光ネットワークでは、高速に波長を切換えながら、各スロットに信号を乗せる。更に、この波長は、ネットワーク内で同調した波長に安定化されている必要がある。許容される波長誤差はWDチャンネル間隔の数%以下である[6]。この波長切換え光源は、本光ネットワークの重要な要素技術の一つであ

表6. 1 加入者転送網，LAN，MAN の仕様

	チャンネル数	伝送速度	伝送路長
加入者転送網	～16	～2.4Gb/s	～数100km
LAN/MAN	～100	～2.4Gb/s	<～数100km

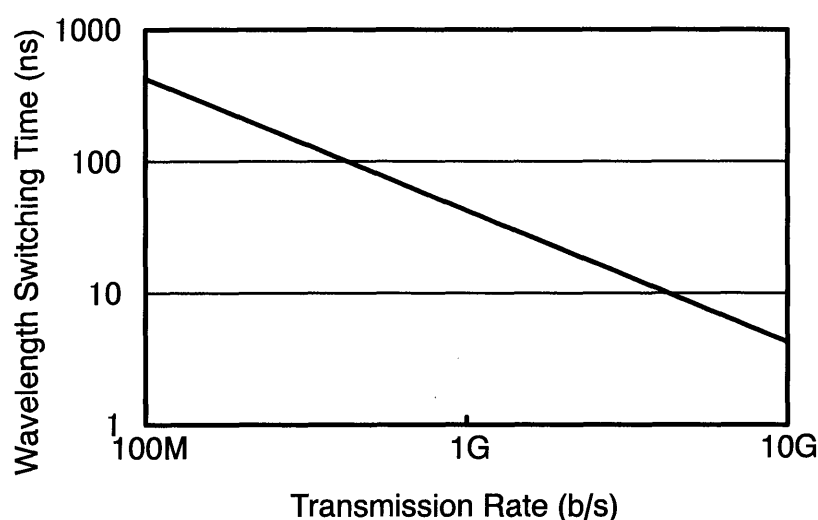


図 6. 2 伝送速度と送信器の波長切換え時間の関係

る。ここでは、波長切換え時間について検討する。

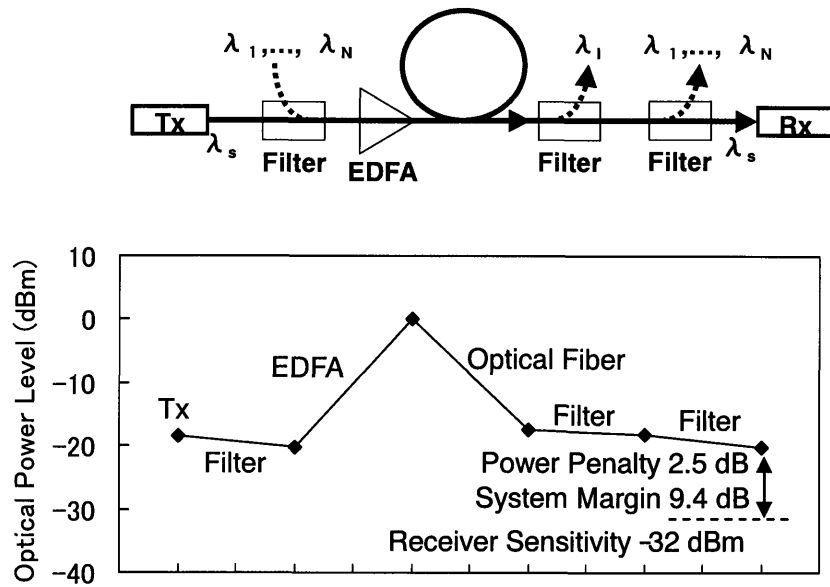
スロットに寄せられる信号は、一種のパケットとみなせる。パケット長は、システムの伝送効率に影響を与える重要なパラメータであるが、ここでは、音声も含めた既存のネットワークで扱われるデータを収容することを考え、ATM のセル長に合わせて、スロット長を 53byte とする。また、ガードタイムとして、スロット長の 10% を仮定する。ガードタイムの間に波長切換えを行う必要があるとすると、伝送速度と送信器の波長切換え時間の関係は、図 6. 2 で示される。例えば、伝送速度 100Mb/s, 1Gb/s, 2.4Gb/s, 10Gb/s に対して、波長切換え時間は、400ns, 40ns, 17ns, 4ns 以下でなければならない。

6. 3. 2 スロット使用状態の検出

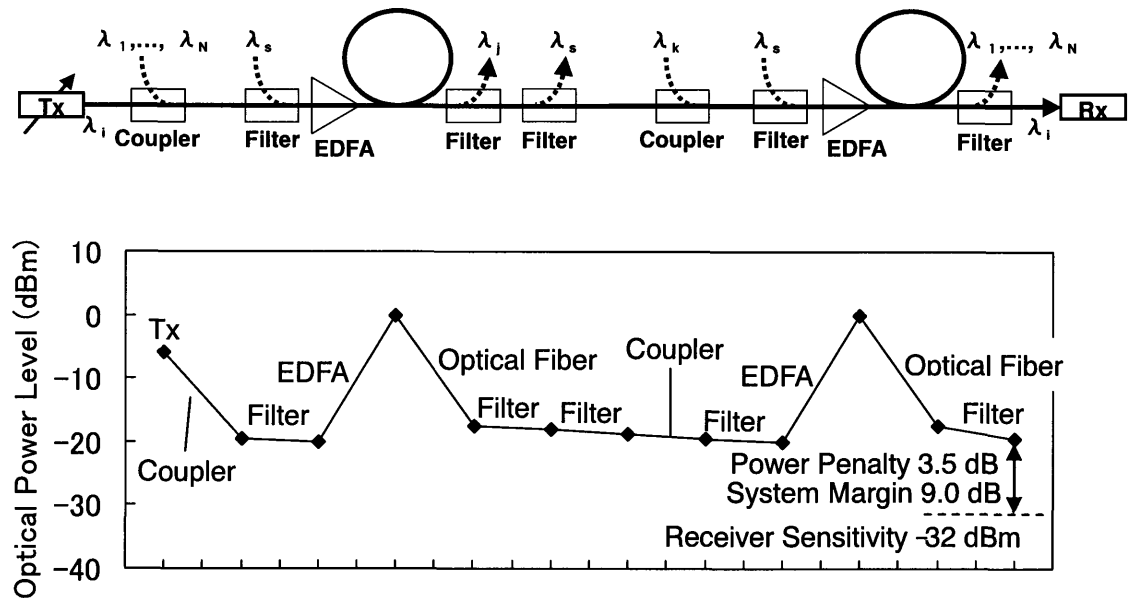
本光ネットワークのノードでは、送信先ノードのアドレス波長の信号が着信スロットに無いこと（アイドル状態）を確認した後、可変波長光源により送信先ノードのアドレス波長の信号を送出する。スロットの使用状態の判定には、将来的に光信号処理の適用も考えられるが、現状で実現性の高い方法として、以下の二つの方法が考えられる。

- (1) 送信要求の都度に送信先ノードのアドレス波長の状態を可変波長フィルタにより検出する。
- (2) フレームパルスを伝送する制御チャンネルに各 WD チャンネルの状態を示すビット（チャンネルステータスフラグ（Channel Status Flag））を設け、各ノードでデータパケットの送信と同ビットの書換えを行う。

第一の方式では、スロット使用状態を検出するための可変波長フィルタが必要となるのに対して、第二の方法では、チャンネルステータスフラグの検出（デコード）が必要になる。チャンネルステータスフラグの検出（デコード）による遅延が生じるが、可変波長フィルタと受信器が不要な点が第二の方式の利点と考えられる。図 6. 1 (b) のノード構成例は、チャンネルステータフラグを用いる第二の方式を用いた例である。



(a) フレームパルスを送送する WD チャンネル(λ_s)のパワーバジェット



(b) データパケットを送送する WD チャンネルのパワーバジェット

図 6. 3 パワーバジェットの例

6. 3. 3 パワーバジェットの設計例

パワーバジェットの例を図 6. 3 と表 6. 2 に示す。同図 (a) は、フレームパルスを送送する WD チャンネル (λ_s) のパワーバジェットを、同図 (b) は、データパケットを送送する WD チャンネルのパワーバジェット示している。

図 6. 3 (a) に示す様に、フレームパルスを送送する WD チャンネル (λ_s) は、固定波長 ADD フィルタで多重された後、光ファイバアンプで増幅されて送信される。次ノードまでの光ファイバ伝送路を経て、次ノードのアドレス波長抽出用固定波長 Drop フィルタを透過して、フレームパルスを送送する

表 6. 2 パワーバジェット

	Frame Pulse	Selected WD Channel	Un-Selected WD Channel	
Tx Output	-18.4	-6.0	-6.0	dBm
EDFA Gain	17.6~22.6	17.6~22.6	17.6~22.6	dB/ch
Receiver Sensitivity (@10 ⁻⁹ BER)	-32.0	-32.0		dBm
Allowable Loss	31.2~36.2	43.6~48.6		dB
Optical Loss				
Coupler		13.5	0.8	dB
Filter (Add)	1.7	0.6	0.6	dB
30~40km Optical Fiber Cable (including connectors)	15~20	15~20	15~20	dB
Filter (Drop)	0.6	2.0	0.6	dB
Filter (Drop)	2.0		0.6	dB
Power Penalty				
Inter Channel Crosstalk	0.5	0.5		dB
Optical Fiber Amplifier	2.0	3.0		dB
Total (Loss + Penalty)	21.8~26.8	34.6~39.6	17.6~22.6	dB
System Margin	9.4	9.0		dB

WD チャンネル (λ_s) を抽出する固定波長 Drop フィルタで抽出され、受信される。

各 WD チャンネルのレベルを揃えるために、光ファイバアンプは、飽和出力レベル以下で使用し、各 WD チャンネルに対するゲインが一定になる様に動作させる。光ファイバアンプを飽和出力レベル以下で動作させるために、Tx 出力レベルを低く設定する。また、各ノードの光ファイバアンプ入力でのレベルが、等しくなる様に、光ファイバアンプのゲインは、次ノードの光ファイバアンプ入力までの伝送損失を補償する様に設定する。現状の光ファイバアンプを飽和出力レベル以下で動作させても、WD チャンネル数が大きく変化する場合、完全に固定ゲインのアンプとして動作しない。制御チャンネルのチャンネルステータフラグ (Channel Status Flag) を利用して、光ファイバアンプのゲインを制御する方法も考えられるが、現状の光ファイバアンプでは、高速な制御応答が期待できない。WD チャンネル数が大きく変化する場合のレベル設計 (光ファイバアンプのゲイン制御) は今後の課題である。

表 6. 2 に示す様に、フレームパルスについては、Tx 出力レベル-18.4dBm とし、波長クロストークのパワーペナルティを 0.5dB、光ファイバアンプのパワーペナルティを 2dB とすると、約 9.4dB のシステムマージンが確保できる。

図 6. 3 (b) は、間に 1 つのノードを挟んで 2 ノード間で WD チャンネルを用いたパケットデータ伝送を行う場合のパワーバジェットの例である。WD チャンネルは、3dB カプラにより多重され、フレームパルス用固定波長 ADD フィルタを透過した後、光ファイバアンプで増幅されて送信される。次ノードまでの光ファイバ伝送路を経て、次ノードのアドレス波長抽出用固定波長 Drop フィルタとフレームパルス抽出用固定波長 Drop フィルタを透過して、更に WD チャンネル多重用 3dB カプラ、フレームパルス多重用固定波長 ADD フィルタを透過した後、再び光ファイバアンプで増幅される。受信ノードまでの光ファイバ伝送路を経て、受信ノードのアドレス波長抽出用固定波長 Drop フィルタで抽出され、受信

される。

表 6. 2 に示す様に、WD チャンネルについては、Tx 出力レベル-6.0dBm とし、波長クロストークのパワーペナルティを 0.5dB、光ファイバアンプのパワーペナルティを 3dB とすると、約 9.0dB のシステムマージンが確保できる。

6. 4 高速波長切換え光源

本光ネットワークの要素技術の一つに高速波長切換えがある。前節で検討した様に、ATM のセル長 53byte に対し、ガード時間としてセル長の 10%を仮定すると、各伝送速度に対して必要な波長切換え時間は、図 6. 2 に示される。更に、各セルが送出される間、送信光源の波長が安定化されている必要があり、許容される波長誤差は、WD チャンネル間隔の数%以下である。半導体レーザの注入電流を直接スイッチングし、波長を切換える実験が報告されている [7, 8] が、この方法では波長を安定に保持することが難しい。本節では、この高速波長切換えを実現する方法として、複数の光源と光スイッチを用いた方式を提案するとともに、その実験結果を示す。

6. 4. 1 光スイッチを用いた高速波長切換え光源の構成

図 6. 4 に提案する光スイッチを用いた高速波長切換え光源の構成を示す。同図において、2つの可変波長レーザ LD1, LD2 の出力光は、光スイッチに入力され、この光スイッチで LD1 と LD2 の出力光を切換える。光スイッチに進行波型電極を持つ LiNbO₃ 導波路型スイッチを用いれば、そのスイッチング時間は、0.6ns 以下とすることができる[9]ので、10Gb/s 以上の伝送速度に充分対応できる。また、光スイッチで、LD1 を選択している間に、LD2 の波長切換えと安定化をすることができるので、各光源は、1 セルの送出時間以内に波長切換えと安定化を行えば良い。

この様に、光スイッチを用いることにより高速の波長切換えが比較的容易に実現できるので、高速波長安定化が残される重要な技術課題となる。しかし、従来の同期検波を用いて波長基準（光学共振器、吸収セルなど）の透過特性のピークに安定化する方法は、ある程度長い時定数を持つ低域通過フィルタを制御ループ内に必要とするため、高速の波長安定化に用いることができない。

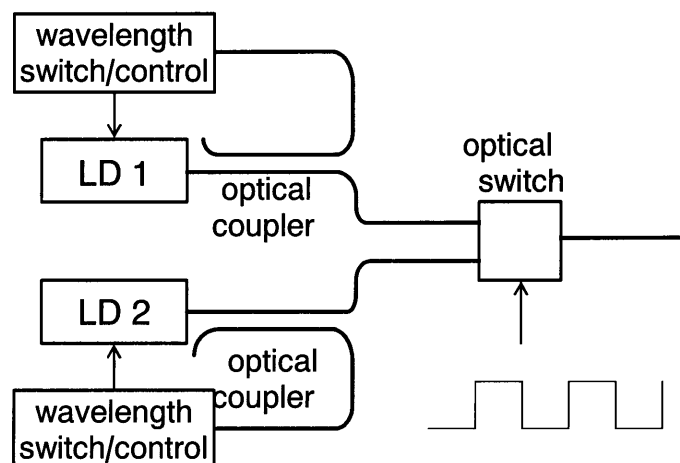


図 6. 4 光スイッチを用いた高速波長切換え光源の構成

図 6. 5 (a) は、提案する高速波長切換え安定化光源のブロック図である。波長安定化には、同図 (b) に示す周期的透過特性を示す光学共振器（ファブリペローエタロン FP: Fabry-Perot etalon）を用いる。切換え信号で、注入電流値を変えることにより、可変波長半導体レーザ (DBR LD: Distributed Bragg Reflector Laser Diode) の波長は、ファブリペローエタロンの透過ピークの肩の中央（同図 (b) 中の * 印）付近に切換えられる。これと同時に、ファブリペローエタロン、フォトダイオード (PD: Photodiode)、差動アンプ、リミッタにより構成されるフィードバックループにより、可変波長半導体レーザの波長は、ファブリペローエタロンの透過ピークの肩の中央（同図 (b) 中の * 印）に制御される。本方式によれば、フィードバック回路を広帯域化することで、高速の波長安定化が可能となる。

ファブリペローエタロンとして、例えば、フィネス $F = 9.94$ のものを用いると、FSR (Free Spectral Range) の約 20% のプラインレンジと 10dB の雑音除去比が得られる。ただし、雑音除去比は、正規化されたファブリペローエタロン出力信号振幅変位 ($\Delta V/V_{\max}$) に対する、FSR で正規化された周波数変位 ($\Delta \nu/\text{FSR}$) の比 ($(\Delta \nu/\text{FSR})/(\Delta V/V_{\max})$) で定義した。

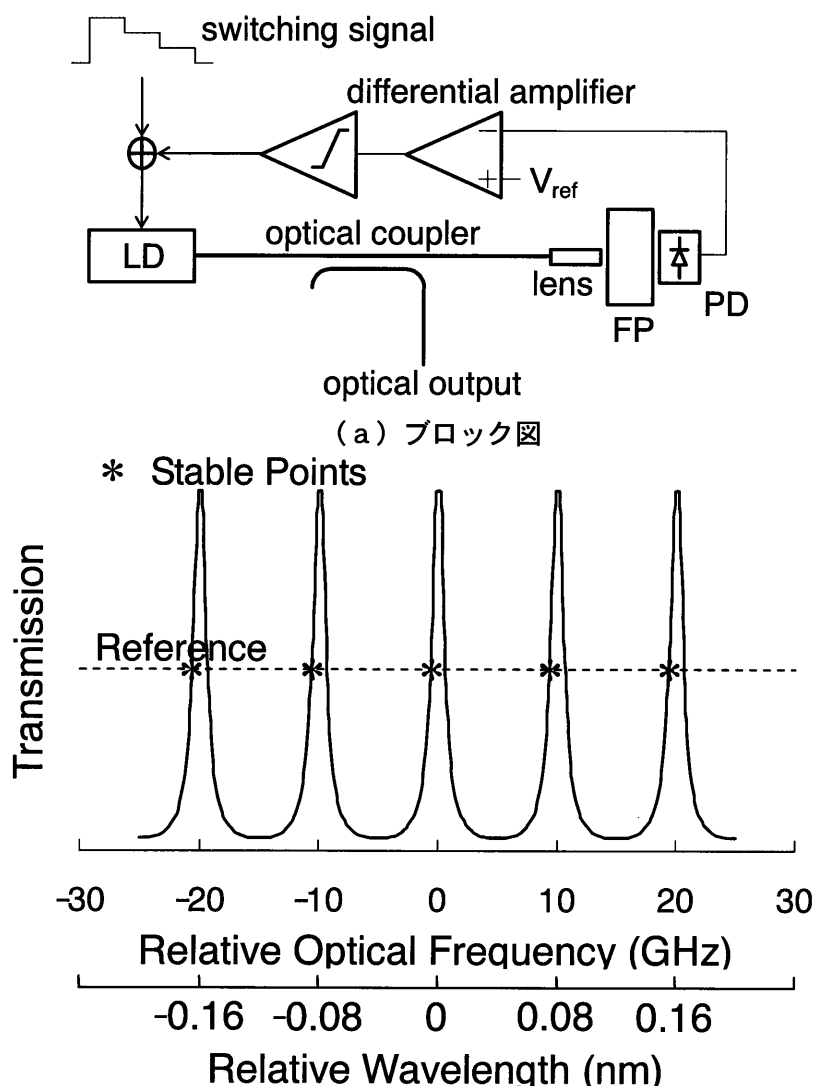


図 6. 5 高速波長切換え安定化光源

6. 4. 2 実 験

光スイッチを用いた高速波長切換え光源の実験を行った。図 6. 6 に波長の時間変化を測定するのに用いた時間分光測定系の構成を示す。分光器として、電歪素子で透過波長を走査できるファブリペローエタロン (FSR=3.2nm (400GHz), FWHM=0.016nm(2GHz)) を用いた。分光器により分光された被測定光は、光受信器 (Rx) に入力される。光受信器の出力は、サンプリングオシロスコープ (Samp. OSC) に入力される。サンプリングオシロスコープは、波長切換え光源を繰り返し動作させている基準クロックをトリガとする。分光器は、GP-IB インターフェースによりパソコンから制御され、透過波長設定が行われる。同時に、サンプリングオシロスコープで測定された各波長の時間波形が、パソコンに入力される。図 6. 7 に光スイッチを用いた高速波長切換え光源スイッチング時間の測定結果を示す。同図 (a) は、時間、波長、光パワーを 3 次元的に示した。2 つの波長について、光パワーの時間変化を示したのが、同図 (b) である。波長切換え時間は、光スイッチのスイッチング時間で決まり、約 0.6ns であることが分かる。

提案した高速波長切換え安定化光源の試作を行い、実験的に動作を確認した。使用したファブリペローエタロンの FSR は、0.08nm (10GHz) である。可変波長半導体レーザには、3 電極 DBR LD を用いた[10]。波長スイッチング回路やフィードバック回路は、ECL ロジックゲート、広帯域アンプなどにより構成した。

図 6. 8 に波長の時間変化の測定結果を示す。測定には、光スイッチを用いた高速波長切換え光源の実験と同様に図 6. 6 に示した測定系を用いた。同図 (a) は、光学共振器を用いたフィードバックを動作させない場合、同図 (b) は、フィードバックを動作させた場合である。同図 (a) では、波長のドリフトが見られるが、同図 (b) では、700ns 以内で波長が安定化されている。分光器の FWHM (Full Width Half Maximum) が 0.016nm (2GHz) なので、測定は、0.004nm (0.5GHz) ステップで行った。同図 (b) から判断できる波長安定度は、最小ステップ 0.004nm (0.5GHz) 以下である。以上の特性は、伝送速度 600Mb/s のシステムに充分適用できる。

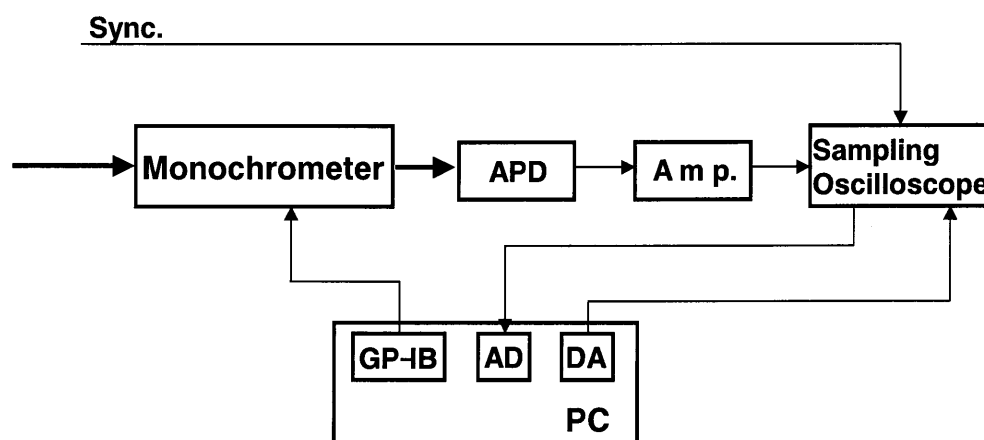
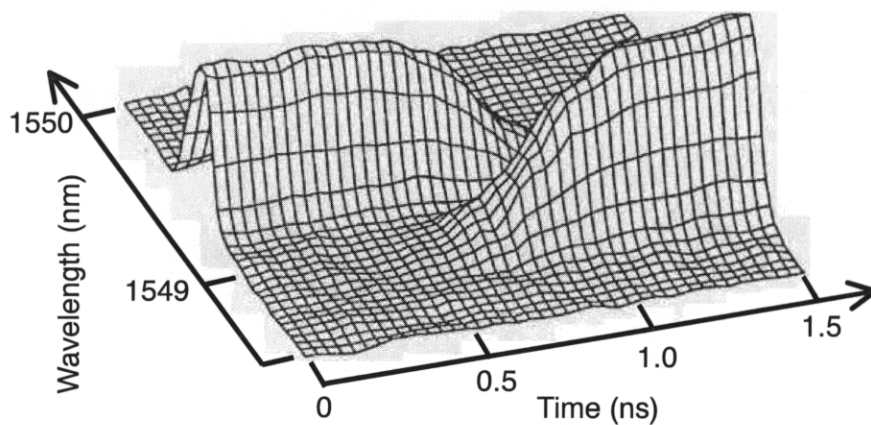
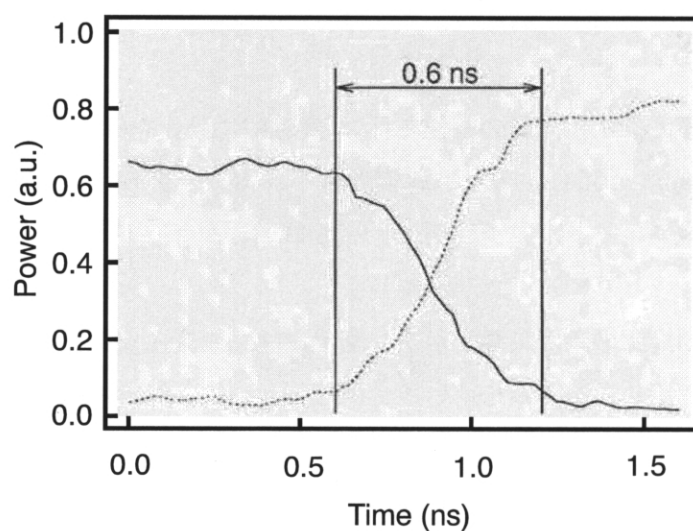


図 6. 6 時間分光測定系のブロック図

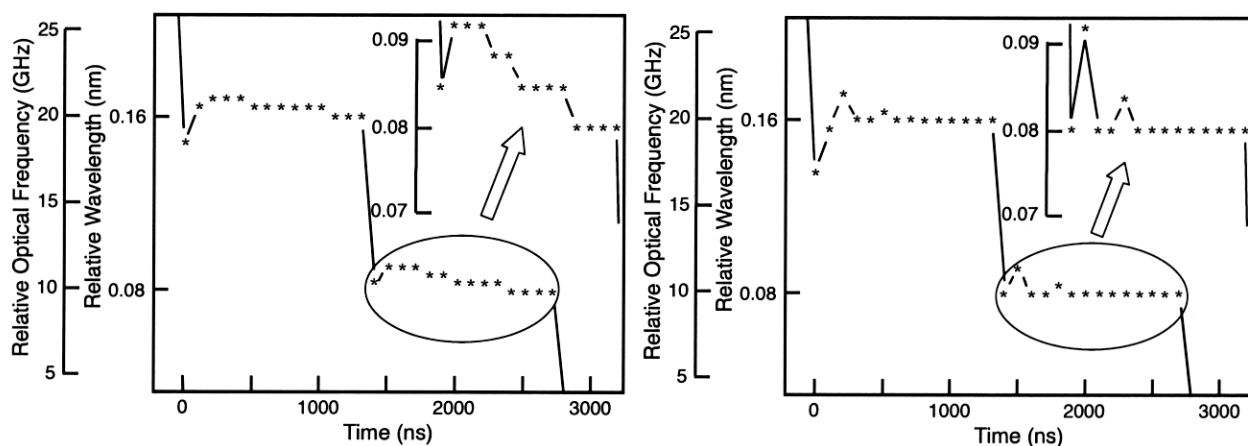


(a) 測定結果の3次元表示



(b) スイッチング時間

図6. 7 光スイッチを用いた高速波長切換光源スイッチング時間の測定



(a) フィードバックを動作させない場合

(b) フィードバックを動作させた場合

図6. 8 高速波長切換え安定化光源の波長の時間変化

6. 5 ATMセル伝送実験

提案するシステムの実現性を示すために、高速波長切換え光源を用いて ATM セルの伝送、波長フィルタによる選択受信の実験を行った。実験系を図 6. 9 に示す。波長 $1.53\mu\text{m}$ 帯、波長間隔 0.4nm の二つの半導体レーザ (LD) を送信光源に用いた。これら二つの LD が LiNbO_3 導波路型スイッチにより、交互に選択され、 LiNbO_3 導波路型マッハツェンダ強度変調器に入力される。強度変調器では、伝送速度 2.4Gb/s で、 53byte 長の擬似 ATM セルが乗せられる。擬似 ATM セルは、PN (Pseudo-Random) 9 段のパターンから任意に切り出した 424bit (53byte) を用いた。波長フィルタには、ファブリペローエタロン (FSR= 3.2nm (400GHz), FWHM= 0.016nm (2GHz)) を用いた。同波長フィルタで選択受信した受信波形を、図 6. 10 に示す。クロストークの少ない良好な受信波形が得られている。

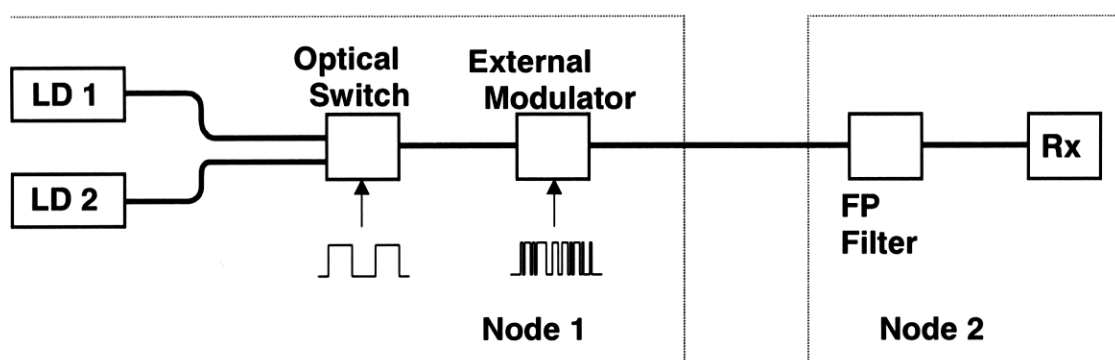


図 6. 9 ATM セルの伝送実験系統

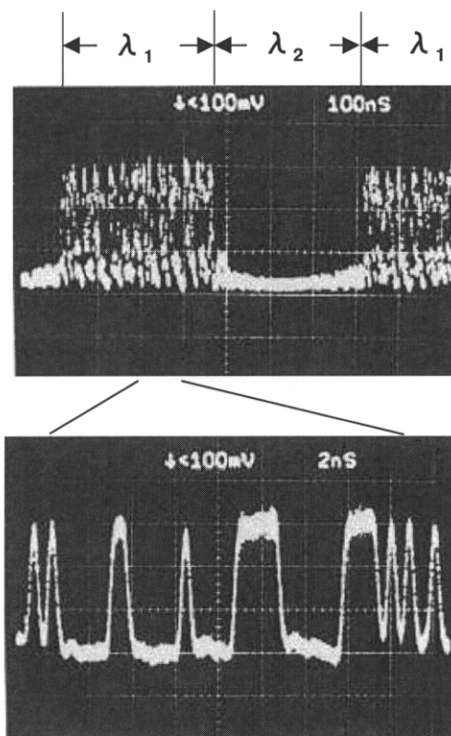


図 6. 10 ATM セルの選択受信波形

6. 6 結

本章では、波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークを提案した。本光ネットワークは、WDM 技術を用いたもので、光 ATM 交換網としての機能を持つ。従って、高速光転送網、MAN、LAN 等のネットワークに用いることができる。

本光ネットワークは、アクセス方式として、スロットドループ（あるいは、バス）を採用し、ネットワーク内の各ノードは、互いに異なる波長によってアドレスされる。各ノードでは、自ノードに割り当てられたアドレス波長の信号を選択受信する。フレーム同期とアクセス制御は、フレームパルスに割り当てられた特定の波長により行う。従って、①WDM 技術による高スループット、②アクセス制御が簡便、③ハードウェアの実現性が高い、④ハードウェアの低減が可能などの特長がある。

また、光デバイス、制御技術の点から本ネットワークの実現性を検討するとともに、パワーバジェットの設計例を示した。

本ネットワークの要素技術として高速の波長切換え光源がある。高速波長切換え光源として二つの可変波長半導体レーザと光スイッチを用いる構成を提案した。例えば、53byte の ATM セル伝送を仮定すると、伝送速度 600Mb/s に対して、波長切換え安定化に要求される時間は、700ns 以下となる。次に、この要求時間以内に高速波長安定化することが課題となる。しかし、同期検波を用いる従来方式では、制御系の時定数が大きいため、高速の波長安定化は、困難であった。高速波長切換え安定化方式として、周期的透過特性を持つ光学共振器（ファブリペローエタロン）を用いた方法を提案し、動作を実験的に確認した。試作した波長切換え光源の特性は、伝送速度 600Mb/s のシステムに充分適用できるものである。本高速波長切換え安定化光源は、WDM クロスコネクシステムなどにも応用可能である。

更に、本章では、本光ネットワークの基本動作である高速パケット信号伝送、選択受信の実験を行い、クロストークの少ない良好な受信波形が得られることを確認し、本光ネットワークの実現性を示した。

本章で提案した光ネットワークは、WDM 光パケットを用いた光ネットワークである。WDM 光パケットは、現在、検討が進んでいる波長バス、波長ルーティング[11]の次の技術と言える。本章で提案した高速の波長切換え光源などは、WDM 光パケットを扱うための要素技術と言える。WDM 光パケットを扱う技術は、まだ、未成熟であり、デバイス、システム両面において、今後、実用化のための研究開発が必要と考える。特に、数十 nm の可変幅を実現した実用的な可変波長光源は、まだ、容易に入手できる状況に無い。また、本章で提案した光ネットワークでは、WDM 光パケットに関する情報を制御用の波長 (WD) チャンネルで伝送したが、将来的には、WDM 光パケット自身から抽出する技術（究極的には、全光処理）などが求められる。

第6章の参考文献

- [1] M. Miki, S. Kano, Y. Inoue, and H. Yamaguchi, "Lightwave-Based Intelligent Transport Network," in Proc. ISSLS'86 Tokyo, Japan, pp. 47-52, Sep. 1986.
- [2] C. A. Brackett, "Dense Wavelength Division Multiplexing Networks: Principles and Applications," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 8, No. 6, pp. 948-964, Aug. 1990.
- [3] T. Miki, "Fiber-optic subscriber networks and systems development," IEICE Trans., Vol. E 74, Vol. 1, pp. 93-100, Jan. 1991.
- [4] 浅谷耕一, 金田哲也, "同期デジタルハイアラキー", 信学誌, Vol. 75, pp.1331-1342, Dec. 1992.
- [5] A. Elrefaie, "Self-Healing Ring Network Architecture Using WDM for Growth," ECOC'92 Proceedings, Vol. 1, Tu P1.16, pp. 285-288, Sep. 1992.
- [6] C. Li, F. F. Tong, K. Liu, and D. G. Messerschmitt, "Channel Capacity Optimization of Chirp-Limited Dense WDM/WDMA Systems Using OOK/FSK Modulation and Optical Filters," J. Lightwave Technol., Vol. 10, No. 8, pp. 1148-1161, Aug. 1992.
- [7] N. Shimosaka, M. Fujiwara, S. Murata, N. Henmi, K. Emura, and S. Suzuki, "Photonic Wavelength-Division and Time-Division Hybrid Switching System Utilizing Coherent Optical Detection," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 2, No. 4, pp. 301-303, Apr. 1990.
- [8] H. Kobrinski, M. P. Vecchi, M. S. Goodman, E. L. Goldstein, T. E. Chapuran, J. M. Cooper, M. Tur, C. Zah, and S. G. Menocal, "Fast Wavelength-Switching of Laser Transmitters and Amplifiers," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 8, No. 6, pp. 1190-1202, Aug. 1990.
- [9] Y. Tada, N. Shibata, O. Ishida, K. Nosu, and H. Ishii, "Duplex Transmitter Configuration for Bit-Error-Free Optical FDM Cross-Connect System," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 4, pp. 1051-1053, Sep. 1992.
- [10] S. Murata, I. Mito, and K. Kobayashi, "Tuning Ranges for 1.5 μ m Wavelength Tunable DBR Lasers," Electron. Lett., Vol. 24, No. 10, pp. 577-579, May 1988.
- [11] K. Sato, S. Okamoto, and H. Hadama, "Network Performance and Integrity Enhancement with Optical Path Layer Technologies," IEEE J. Selected Areas in Commun., Vol. 12, No. 1, pp. 159-170, Jan. 1994.

第7章 結 論

7. 1 本研究の成果

第1章で述べた様に、情報化社会を担う通信ネットワークの最終形態は、全光ネットワークであると考えられる。全光ネットワークの構成例を再度図7. 1に示す。この全光ネットワークは、①全国 (National) ネットワーク (中長距離ネットワーク)、②県内 (Regional) ネットワーク、地域 (Local) ネットワーク、③加入者 (Access) ネットワーク、④企業内ネットワーク (LAN: Local Area Network) に大きく分類される。本論文では、WDM (Wavelength Division Multiplexing)技術を用いて企業内ネットワーク (LAN) の機能を拡張する DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multi-Access)光ローカルエリアネットワーク、一種の放送局向け企業内ネットワーク (LAN) である WD・TD (Wavelength Division・Time Division)複合多重光ネットワーク、加入者 (Access) ネットワークへの適用が期待できる U-FDMA/D-TDM (Upstream-Frequency-Division Multi-Access/Downstream-Time-Division Multiplexing)光マルチアクセスネットワーク、県内 (Regional) ネットワーク、地域 (Local) ネットワークへの適用が期待できる波長アドレスを用いたパケット転送光ネットワークを提案し、実験等によりその実用性を示した。これらの光ネットワークは、波長分割多重技術を基幹技術とする光ローカルエリアネットワークでもある。

本章では、本論文で述べた全光ネットワークの一部を担う幾つかの光ネットワークの研究について総括し、本論文の結論とする。まず、各章の要旨を以下にまとめる。

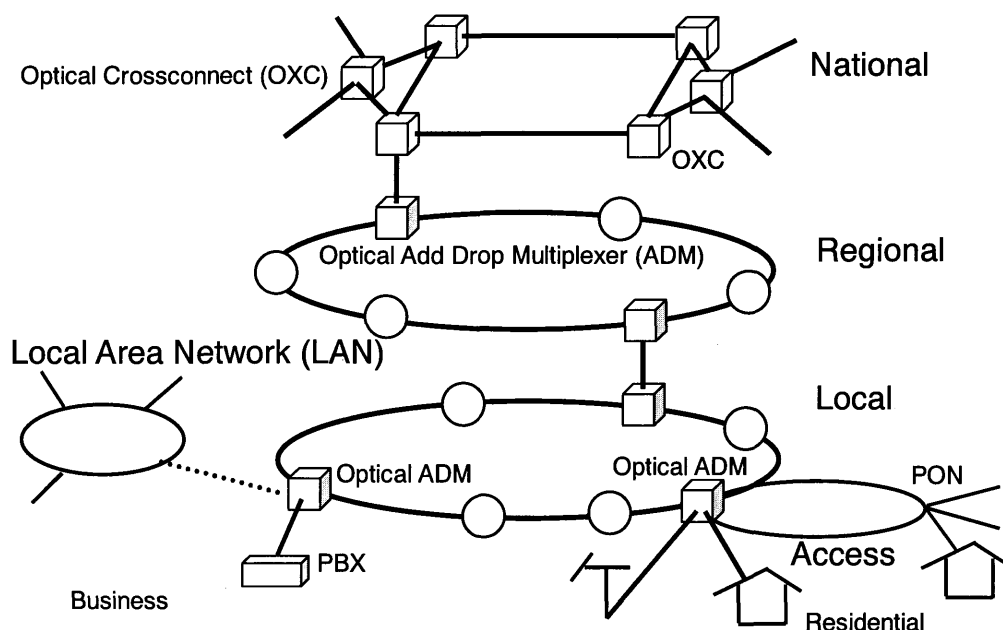


図7. 1 光ネットワークの構成例

第1章では、光通信、光ネットワークの研究経緯について概観し、将来の全光ネットワークの構成を示すことで、本研究の意義を明らかにした。

第2章では、最初に、光ネットワークに適用される主な多重化技術（時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）、空間分割多重（SDM: Space Division Multiplexing）、波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）、サブキャリア（副搬送波）多重（SCM: Subcarrier Multiplexing）、光符号分割多重（OCDM: Optical Code Division Multiplexing））についてまとめた。これら多重化技術の中で、波長分割多重（WDM）は、実用性と広い応用の可能性を持ち、今後も重要な多重化技術となる。

次に、光源と波長フィルタの動作モード（固定波長、可変波長）により、WDM システムを分類し、各システムの特長および要求される波長チャンネル数について述べた（表2. 1）。

次に、これら WDM システムに用いられる代表的な（固定波長、可変波長）光源と（固定波長、可変波長）フィルタについてまとめた。

次に、WDM システムにおいて、波長フィルタに要求される特性について検討した。波長フィルタの半値全幅を $\Delta\lambda_F$ すると、WDM 波長間隔は、 $2.5\Delta\lambda_F$ 以上である必要がある。また、レーザ波長と波長フィルタの透過波長ピークの相対誤差が波長間隔の 10%以下である必要がある。一方、送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる波形劣化のパワーペナルティと送信光源のスペクトルが波長フィルタにより削られることによる光パワー損失から波長フィルタの半値全幅 $\Delta\lambda_F$ と光源の半値全幅 $\Delta\lambda_{LD}$ 比について、 $\Delta\lambda_F/\Delta\lambda_{LD} > 3\sim 4$ がシステム設計上の指針となることを示した。

更に、光源とフィルタから分類した各波長分割多重（WDM）システムに対して適用可能な光源およびフィルタについてまとめた（表2. 4）。

また、本論文で提案する各光ネットワークについて、光源とフィルタから見た波長分割多重（WDM）システムの分類における位置付について述べた。

第3章では、DA-WDMA を用いた光ローカルエリアネットワーク（LAN）を提案した。提案した光 LAN は、既存の標準光 LAN とこれに付加される波長（WD）チャンネルから構成される。従って、提案した光 LAN は、既存の標準光 LAN を拡張することにより実現される。提案した光 LAN の WD チャンネルは、標準光 LAN の伝送速度に依存しない伝送路を提供する。また、この WD チャンネルは、他の WD チャンネルの影響を受けない。

約 35nm の C バンド用 Er ドープ光ファイバンプの波長帯域幅と可変波長 ADM (Add Drop Multiplexer)の半値幅から制限される数 nm の WD チャンネル間隔を考慮すると、十数の波長（WD）チャンネルが使用できる。同波長（WD）チャンネル数は、実用的光 LAN あるいは、MAN (Metropolitan Area Network)の応用に対して十分な伝送容量を付加する。標準光 LAN を用いて DA-WDMA 制御を実現するための専用コントローラとソフトウェアを開発し、実用性を示した。

提案する光 LAN は、加入者系光ネットワークやオフィス間光ネットワークなどへも適用できる。

第4章では、波長多重を用いた放送局向け映像信号分配ネットワークについて、本格的波長多重光ネットワークを世界で初めて導入したフジテレビジョン新社屋の例を中心に述べた。最初に、WD・TD複合多重を用いた放送局内映像信号分配ネットワークを提案し、このネットワークの構成と基本コンセプトについて述べた。次に、本光ネットワークの時分割多重システムと波長多重システムの設計、波長(WD)チャンネル間クロストークと波長フィルタでの波形歪のシミュレーション、パワーバジェットについて述べた。時分割多重度は、商用システムの伝送速度とシリアルデジタル映像信号の伝送速度により決まる。本ネットワークでは、SDTV (Standard Definition Television)コンポジット信号の場合、15チャンネルを、SDTV コンポーネント信号の場合、7チャンネルを1波長(WD)チャンネルへ時分割多重する。HDTV (High Definition Television)信号の場合、時分割多重を行わない。波長多重度は、光アンプの帯域と可変波長フィルタの特性(隣接WDチャンネルの抑圧比)により決まる。現状、Cバンドで32波長(WD)チャンネル程度まで波長分割多重を行うことができる。波長(WD)チャンネル間クロストークと波長フィルタでの波形歪のシミュレーションから、隣接WDチャンネルのクロストークの合計が-10dB以下になる様に波長フィルタを選定すれば、パワーペナルティは、1dB以下になることを示した。パワーバジェットの検討からフジテレビジョンの場合、システムマージンは、最悪値で7dBと十分な値が得られることを示した。次に、開発した装置の構成、特性について述べた。2.29Gb/sの疑似ランダムパターンを用いた16波長(WD)チャンネルの伝送実験を行った結果、パワーペナルティは、0.2dBと充分小さな値であった。

フジテレビジョン新社屋の映像信号分配光ネットワークは、SDTVシステムの導入が1996年夏から始まり、運用試験を経て1997年3月より本格運用された。また、HDTVシステムは、1999年4月より本格運用が開始され、現在両システムともに順調に稼働している。

第5章では、加入者ネットワークへの適用が期待できるU-FDMA/D-TDM光マルチアクセスネットワークを提案した。本ネットワークでは、各ネットワークターミネータ固有の周波数で変調された上りの信号光をスターカプラでサブキャリア多重(SCM: Subcarrier Multiplexing)し、この信号をセントラルオフィスの受信器の帯域通過フィルタにより電氣的に分離する。各ネットワークターミネータに単一のキャリア周波数を割り当てるので、通常のSCM方式と比較して、ネットワークターミネータの送信器に線形性の高いデバイスを必要としない。下りの通信には、TDMを用い、ブロードバンドサービスを放送モードで提供する。また、上りと下りの通信に異なるキャリア周波数を割り当てることで、双方向通信を容易に実現している。更に、セントラルオフィスの受信器での光ビート雑音を避ける一つの方法としてネットワークターミネータの送信光源に広い光スペクトル幅を持つSLD (Superluminescence Laser Diode)を用いることを提案した。

本ネットワークのCNRと光ファイバの波長分散によるパワーペナルティを計算し、チャンネル容量を求めた。例として、光ファイバ長10km、分岐数32に対して、上り約1.5Mb/s、下り約800Mb/sの最大チャンネル容量が得られる。また、ビート雑音の影響を回避するために、近年入手可能になったC-WDM用半導体レーザを上りの通信に用いた場合のチャンネル容量を求めた。この場合、例えば、波長1.5 μ m,

分岐数 32 に対して、上り約 180Mb/s, 下り約 1.6Gb/s の最大チャネル容量が得られる。

第 6 章では、波長アドレス（波長ラベル）を用いたパケット転送光ネットワークを提案した。本光ネットワークは、アクセス方式として、スロットドループ（あるいは、バス）を採用し、ネットワーク内の各ノードは、互いに異なる波長によってアドレスされる。各ノードでは、自ノードに割当てられたアドレス波長の信号を選択受信する。フレーム同期とアクセス制御は、フレームパルスに割当てられた特定の波長により行う。従って、①WDM 技術による高スループット、②アクセス制御が簡便、③ハードウェアの実現性が高い、④ハードウェアの低減が可能などの特徴がある。

更に、光デバイス、制御技術の点から本ネットワークの実現性を検討するとともに、パワーバジェットの設計例を示した。

また、本ネットワークの要素技術として高速の波長切換え光源がある。高速波長切換え光源として二つの可変波長半導体レーザと光スイッチを用いる構成を提案した。例えば、53byte の ATM (Asynchronous Transfer Mode)セル単位でのセル伝送を仮定すると、伝送速度 600Mb/s に対して、波長切換え安定化に要求される時間は、700ns 以下となる。次に、この要求時間以内に高速波長安定化する方法として、ファブリペローエタロンを用いた方式を提案し、動作を実験的に確認した。試作した波長切換え光源の特性は、伝送速度 600Mb/s のシステムに充分適用できる。

更に、本光ネットワークの基本動作である高速パケット信号伝送、選択受信の実験を行い、クロストークの少ない良好な受信波形が得られることを確認した。

本論文で述べた以上の成果は、図 7. 1 に示す全光ネットワークの構成要素となる光ネットワークを実現するものである。また、第 2 章で述べた光源と波長フィルタの動作モード（固定波長、可変波長）による WDM システムの分類と各章で提案した光ネットワークの関係を表 7. 1 に再度示す。本研究は、将来の全光ネットワークを構成する技術の一つである WDM 技術の光ネットワークへの適用を中心に、システム設計から要素技術の研究に及んでいる。各章で述べた WDM システムの設計手法や第 3 章の

表 7. 1 波長分割多重（WDM）システムと光源、波長フィルタの組合

Tx (Transmitter)	Rx (Receiver)	System	Laser	Filter	WDM Ch. Number	WDM Ch. Number (Demand)	Chapter Number
Constant	Constant	Point to Point	DFB	AWG	160	160 $\sim\infty$	
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	DFB	AWG	16 \sim 32	16 \sim 32	
Constant	Variable	Broadcasting (Signal Distribution)	DFB	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	32 \sim 256	Chapter 4
		WDMA (Wavelength Division Multiple Access)	DFB	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	16 \sim 32	
Variable	Constant	Wavelength Label (Wavelength Path)	Semiconductor Lasers	Dielectric Thin Film	16 \sim 32 \sim 64	160 $\sim\infty$	Chapter 6
Variable	Variable	DA(Demand Assign)-WDMA	Semiconductor Lasers	Dielectric Thin Film, Fabry-Perot, AO	16 \sim 32	16 \sim 32	Chapter 3
—	—	Other Combination System	—	—	—	—	Chapter 5

DA-WDMA アクセス制御、第6章の高速波長切換え光源などの要素技術は、全国（National）ネットワーク（中長距離ネットワーク）で想定される WDM クロスコネクシステムなどにも応用可能な技術である。

全光ネットワーク実現のシナリオの時代区分中で、現在が本格的な光ネットワーク導入期にあるとすると、本研究は、光ネットワーク導入の模索期に行われた研究と言える。デバイスおよび要素技術が未成熟な状況の中で、机上の提案だけでは全光ネットワークに向けた研究を加速することができないと考え、序論で述べた様に実用化を意識した研究を行った。実用化のステップを踏むことが、相乗効果として、デバイスおよび要素技術の進展を促すと言える。特に、基幹回線で波長多重が導入される前に、16 波長多重用の半導体レーザを開発し、放送局向波長分割多重（WDM）ネットワークを実現したことは、今日実用化されている WDM 伝送システムの礎になったと自負している。

全光ネットワークは、多様な構成の光ネットワークとそれを支える要素技術により実現されるものであり、本研究で全てを網羅することは不可能であるが、本研究の成果が将来の全光ネットワーク実現の一助となると考えている。

表 7. 2 に本論文で提案した光ネットワークの今後の展開についてまとめた。

第3章で提案した DA-WDMA 光 LAN では、DA-WDMA により、少ない波長チャネルを有効に利用することが特長の一つになっている。しかし、近年、数十～百数十波長（WD）チャネルの WDM 用（固定波長）半導体レーザと可変波長フィルタが入手できるようになった。したがって、DA-WDM の回線の代わりに、固定波長光源と可変波長フィルタを用いた回線を用いることができるようになった。

DA-WDMA システムは、ある意味究極の自由度を持った WDM システムである。将来、十分な WD チャネル数を持つ DA-WDMA システムが制限なく構築できるようになれば、DA-WDMA システムのみで自重度の高い光 LAN を構成することが可能となる。

第4章で提案した映像信号分配光ネットワークは、現在、主に経済性の理由から、電気的スイッチを用いたシステムに置き換わっている。したがって、本光ネットワークの課題は、低価格な可変範囲の大きい可変波長フィルタを実現することである。一方、他の新しい光技術の導入により、放送局内映像信号分配ネットワークを構築する道も考えられる。一つには、大規模な光スイッチの実現による光スイッ

表 7. 2 本論文で提案した光ネットワークの展開

Tx (Transmitter)	Rx (Receiver)	Proposed Optical Network	Future Optical Network
Variable	Variable	Chapter 3. DA-WDMA LAN	DA-WDMA Higher Layer LAN
Constant	Variable	(Low Cost Optical Filter) Chapter 4. Broadcasting (Signal Distribution)	DA-WDMA LAN Broadcasting (Signal Distribution)
Variable	Constant	Chapter 6. Wavelength Address Transport Network	Wavelength Address Transport Network
Constant	Constant		WDM Network
—	—	Chapter 5. U-FDMA/D-TDM Access Network	Optical Switcher (Signal Distribution) IP Network (Signal Distribution)

チャの導入が考えられる。この場合、分配接続機能を光スイッチャで実現することが課題となる。もう一つは、IP (Internet Protocol)系の装置の導入である。現在、IP 系の装置は、大容量、高速、低価格化が進んでいるため、これらの装置を映像信号分配に用いることが考えられる。IP 伝送の場合、映像信号の実時間伝送の保証が課題の一つである。

第5章で提案した SCM 技術を用いた加入者系光ネットワークは、現時点での経済性を考慮した一つの提案である。一方、低価格な WDM デバイスの研究も進められている。上りのマルチアクセスに WDM 技術を導入した場合、ベースバンドでの信号処理が可能のため、伝送容量の拡大が容易になる。今後の加入者ネットワークの伝送容量の拡大と WDM デバイスの低価格化が、SCM 技術を用いた加入者ネットワークの伝送速度当りのコストと WDM 技術をもちいた加入者ネットワークの伝送速度当りのコストとを逆転させる可能性が充分ある。

第6章で提案した WDM パケット転送光ネットワークは、現在、検討が進んでいる波長バス、波長ルーティングの次の技術と言える。第6章では、高速の波長切換え光源など、WDM 光パケットを扱うための要素技術の一部を提案した。WDM 光パケットを扱う技術は、まだ未成熟であり、デバイス、システム両面において、今後、実用化のための研究開発が必要と考える。

7. 2 今後の課題

7. 2. 1 光ネットワークの研究課題

先に述べた様に、現在は本格的な光ネットワーク導入期に入ったと言える。21 世紀の通信インフラストラクチャの基盤を担うのは、光ネットワークである。通信インフラストラクチャの光化を加速するためには、光ネットワークへの展開を意識した実用化開発が必要である。また、加入者ネットワークの光化にともなう数量効果も考慮した光ネットワーク方式およびデバイス面での経済化も重要な要因である。この様な意味で、ネットワーク技術およびデバイス技術への課題も多い。表 7. 3 に、ネットワークング、ルーティング、大容量伝送 (WDM)、高速伝送 (TDM)、超長距離伝送、共通課題の分類の基に、方式、技術の研究課題とデバイスの研究課題についてキーワードを示した。実際には、これらの課題は、多次元的に関連するものであり、総合的に検討する必要がある。

ネットワークングの側面で見ると、光ネットワークを構築する際に、電気 TDM、光 TDM、WDM、SDM、SCM などの多重化技術の何を選択あるいは組合せるかが常に課題となる。また、本研究では、触れなかったが、監視制御を含めたネットワークマネジメントシステムの構築も重要であり、これらの課題を含めた物理層からアプリケーション層までのトータルシステム設計が要求される。

今後、伝送容量が拡大し、伝送速度も高くなると光領域でのルーティングや光パケットスイッチング等の光ルーティング技術が必要になる。光ルーティング技術の進展には、光クロスコネクタ (OXC: Optical Crossconnect)、光 ADM などの機能デバイス、光スイッチ、波長変換素子などのデバイス開発が不可欠である。

WDM には、分散管理技術 (四光波混合抑圧技術)、波長制御技術、利得制御技術が不可欠である。また、最近では、L バンドや S バンドの新たな波長帯の開発による帯域拡大も実現されている。これらの

表 7. 3 光ネットワークの研究課題

分類	方式、技術の研究課題	デバイスの研究課題
ネットワークング	多重化技術の選択、組合せ (電気TDM, 光TDM, WDM, SDM, SCM) トータルシステム設計 光ネットワークマネジメント	
ルーティング	光領域でのルーティング/SD, WDスイッチング 光ATM(光パケットスイッチング)	光スイッチ (MEMS, TOSW, 光ゲートSW) OXC 光ADM 波長変換
大容量伝送(WDM)	分散管理技術(四光波混合抑圧技術) 波長制御技術 利得制御技術	光ファイバ 波長安定化レーザ WDM-MUX/DEMUX(AWG) 多波長レーザ 波長フィルタ WDM光アンプ
高速伝送(TDM)	電気TDM 光TDM ソリトン(分散制御技術)	高速電子デバイス 高速光デバイス 光ファイバ
超長距離伝送	システム設計 分散補償技術 非線形対策 利得補償技術	光ファイバ 光アンプ
共通課題	小型化/装置化技術 経済化(方式, デバイス)	小形 低コスト 波長依存性 偏波依存性 温度依存性 低消費電力

技術は、光ファイバの分散制御を始めとして、波長安定化レーザ、AWG (Array Waveguided Grating), 多波長レーザ、波長フィルタ、WDM 光アンプなどのデバイス技術と関連付けられる。

TDM には、電気 TDM の高速化や光 TDM 技術の進展、また、ソリトン伝送などの技術課題があり、これらは、高速電子デバイス、高速光デバイス、光ファイバの分散制御技術などと関連付けられる。

超長距離伝送においては、光ファイバを用いた分散補償技術や、非線形効果を抑圧するための分散設計、レベル設計（光アンプによる利得補償）などを含めたシステム設計が課題となる。

また、共通課題として、装置化技術、小型化技術、また、経済化が上げられる。特に、デバイスにお

ける低コスト化が今後の全光ネットワークの進展に重要である。

以下では、特に、WDM デバイスの充実と光デバイスの低コスト化について考察する。

7. 2. 2 波長分割多重 (WDM) 用デバイスの充実

本論文で提案したシステムでは、可変波長光源、可変波長フィルタ、ADM などの WDM デバイスが必要になる。北米を中心とした WDM 光通信の普及により、波長多重用の (固定波長) 半導体レーザ (LD: Laser Diode) や AWG (Array Waveguided Grating) を用いた波長 MUX (Multiplexer), DEMUX (Demultiplexer) が容易に入手できる様になった。しかし、通信用可変波長光源、また、可変波長フィルタなどは、入手が難しかったり、高価であったりする。より自由度の高い WDM 光ネットワークを普及させるためには、可変波長光源や可変波長フィルタなどをより入手し易いものにする必要がある。可変波長光源については、3 電極 DBR LD などの可変範囲の広い LD や複数の可変波長 LD を集積化するなどの技術が確立しつつある[1, 2]。また、可変波長フィルタについては、AO (Acousto-Optic) フィルタの他に、最近では、マイクロマシンによる可変波長フィルタの可能性が注目されつつある[3, 4]。これらの WDM デバイスの成熟と普及が、全光ネットワークの実現へのステップになると考えられる。

7. 2. 3 光デバイスの低コスト化

加入者系光ネットワークでは、設備コストが重要な要素となる。このため同光ネットワークを構成する光デバイスのコストを下げることは元より、幾つかの機能を集積化したり、コスト効率の良いシステムを採用したりする必要がある。

また、高速電子デバイスの発達により、一部の LAN では、光伝送よりも同軸ケーブルを用いた伝送方式の方が、低コスト化が図れるという議論もある。更に、映像信号の基幹伝送においても、圧縮伝送には、画質劣化が伴うにもかかわらず、伝送コストを下げるための映像信号圧縮技術が注目されている。これは、逆説的には、ビット伝送単価が下がれば、映像信号の非圧縮伝送が可能であり、基幹伝送においても、伝送コストの低減が求められていることを意味する。このような背景は、全光ネットワーク化の推進における低コスト化の重要性を示唆している。

WDM 伝送技術の導入などシステムの低コスト化の努力とともに、光デバイスの低コスト化が重要である。光デバイスの低コスト化のために、半導体光デバイスの集積化、石英系導波路デバイスの活用や多機能化、半導体光デバイスと石英系導波路デバイスの集積化などが期待される。また、前述のマイクロマシンを用いた光スイッチは、大規模化が比較的容易であり、低コスト化だけでなく、基幹伝送において大規模な光クロスコネクトシステムを実現するのに欠かせない光デバイスとして期待される。

本章で述べた課題が順次解決され、本論文の研究成果が活用されて行くことが、全光ネットワークの実現、実用化に寄与することを期待する。