

第3章 デマンドアサイン波長分割多重マルチアクセス光ローカルエリアネットワーク

3.1 序

近年のデータトラフィックの急増にともない、LAN (Local Area Network), MAN (Metropolitan Area Network)への需要が高まっている。マルチメディア対応、および、高速、大容量通信を思考した数 100Mb/s クラスの LAN, MAN として、例えば、FDDI-II (Fiber Distribution Data Interface)[1]や IEEE802.6 DQDB (Distributed Queuing Dual Bus)[2]などが規格化されている。これらの光ネットワークは、制限された帯域を時分割方式により必要に応じて割り振ることで、パケット交換と回線交換を収容するものである。しかしながら、例えば、動画像や高精細静止画像の伝送には 100Mb/s 以上の伝送速度をある程度長時間に渡り確保する必要がある。このようなマルチメディア通信のニーズに対応するためには、現状の高速光 LAN をより高速化、高スループット化するとともに、マルチメディア通信のニーズに適したアーキテクチャが必要となる。

一方、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術により、異なる波長を用いることにより、異なる通信サービスを同時に提供することが可能となる。また、他の回線容量に影響を与えない独立な回線を収容できる。このため、これら WDM 技術の特長を生かした光 LAN, 光 MAN が提案されている[3, 4]。しかし、これらの光 LAN は、既存の光 LAN と全く異なるアーキテクチャを持つため、既存の光 LAN との整合性に欠ける。

本章では、既存の標準化光 LAN との整合性の良い WDM 光 LAN を提案する。この光 LAN は、従来のトークンパッシング (Token Passing), TDMA (Time Division Multiple-Access), スロットドループ (Slotted Loop) 方式などの伝送速度 100Mb/s 程度の既存光 LAN とデマンドアサイン (DA: Demand Assign) WDMA (Wavelength Division Multiple-Access)方式による波長分割多重伝送を複合したものである。本章では、最初に提案する DA-WDMA 光 LAN の構成について述べる。また、現状利用できる WD チャンネル数について検討する。次に、アクセスコントローラの設計と動作および、AO (Acousto-Optic) フィルタを用いて試作した実験システムの動作について述べる。

3.2 ネットワークの構成

提案する光 LAN は、FDDI などの標準光 LAN の部分と同一の光ファイバを用いて異なる波長の WD チャンネル伝送を行う部分から構成される。図 3.1 に、提案する光 LAN の構成と動作を示す。同図に示す様に、提案する光 LAN は、リング型光 LAN である。提案する光 LAN の標準光 LAN 部の構成 (アーキテクチャ) は、任意である。例えばトークンパッシングリング (Token-Passing Ring) 形式のアーキテクチャを持つ標準光 LAN とすることができる。提案する光 LAN は、複数の波長を用いる。図 3.1 において、波長 λ_A は、標準光 LAN の通信に用いられる。また、WD チャンネル (波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$) は、標

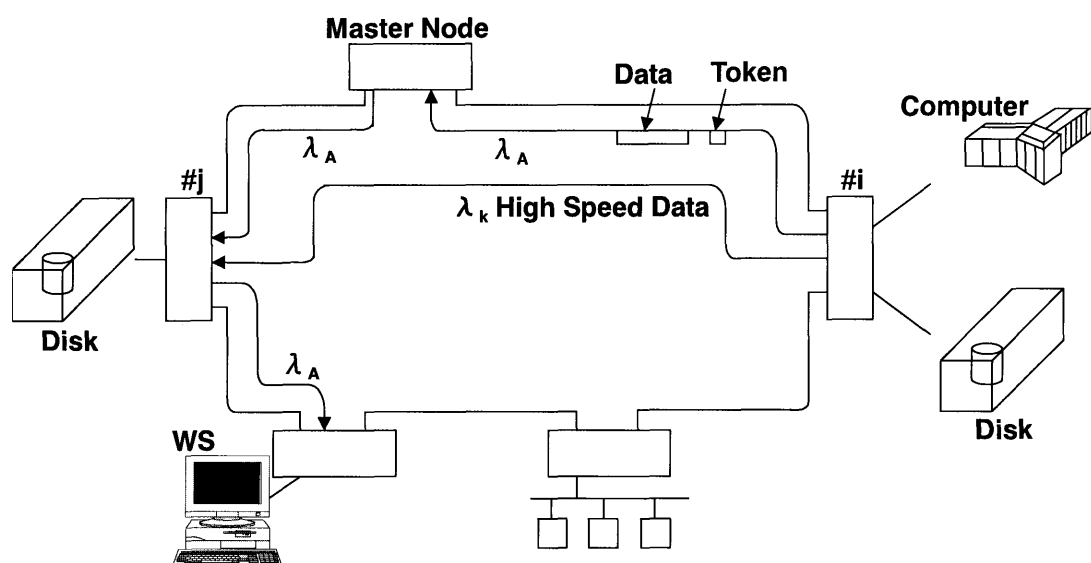


図3. 1 提案するマルチメディア光ネットワークの動作

標準光 LAN の伝送速度に依存しない通信サービスを提供するために用いられる。WD チャンネル ($\lambda_1 \sim \lambda_N$) は、標準光 LAN を介して、DA-WDMA (Demand Assign Wavelength Division Multiple-Access)方式で制御される。二つのノード (#i, #j) 間にある程度の伝送時間を必要とする高速伝送の要求が生じると、WD チャンネルの割付要求が標準光 LAN (λ_A) により制御ノード (Master Node) に送られる。制御ノードでは、未使用の WD チャンネル (λ_k) を要求のあった二つのノード (#i, #j) 間の通信に割り当てる。標準光 LAN 経由で、制御ノードからの WD チャンネルの割当てを通知されたノード #i は、送信波長を λ_k に制御し、データの送信を開始する。同時に、標準光 LAN 経由で、制御ノードからの WD チャンネルの割当てを通知されたノード #j は、波長 λ_k の WD チャンネルを選択、受信する。

図3. 2 に、提案する光 LAN を構成するノードのブロック図を示す。各ノードの入力部分において、波長 λ_A が波長フィルタにより他の WDM チャンネルと分離される。波長 λ_A の信号は、O/E 変換 (Opto-Electronic Conversion) される。各ノードの出力部では、E/O 変換器 (Electro-Optic Conversion) により出力された波長 λ_A の信号が波長 Multiplexer (WDM カプラ) により、他の WDM チャンネルと多重され、一本の共通の光ファイバで出力される。この波長 λ_A の信号により、標準光 LAN の通信が行われる。先に述べた様に、この標準 LAN の通信により、WDM チャンネルのアクセス制御が行なわれる。また、大容量のデータ転送を必要としない通常データ伝送も、この標準光 LAN でおこなわれる。入力部で波長 λ_A の信号が分離された残りの波長多重光 (波長 $\lambda_1 \sim \lambda_N$) は、可変波長 ADM (Add/Drop Multiplexer) へ入力される。この可変波長 ADM は、次の機能を持つ。

- (1) 特定の WD チャンネルを伝送路から抽出 (Drop) する。
- (2) 特定の WD チャンネルを伝送路へ挿入 (Add) する。
- (3) 他の WD チャンネルを伝送路へ透過させる。

抽出 (Drop), 挿入 (Add) される WD チャンネルは、標準光 LAN によるアクセス制御により決定される。

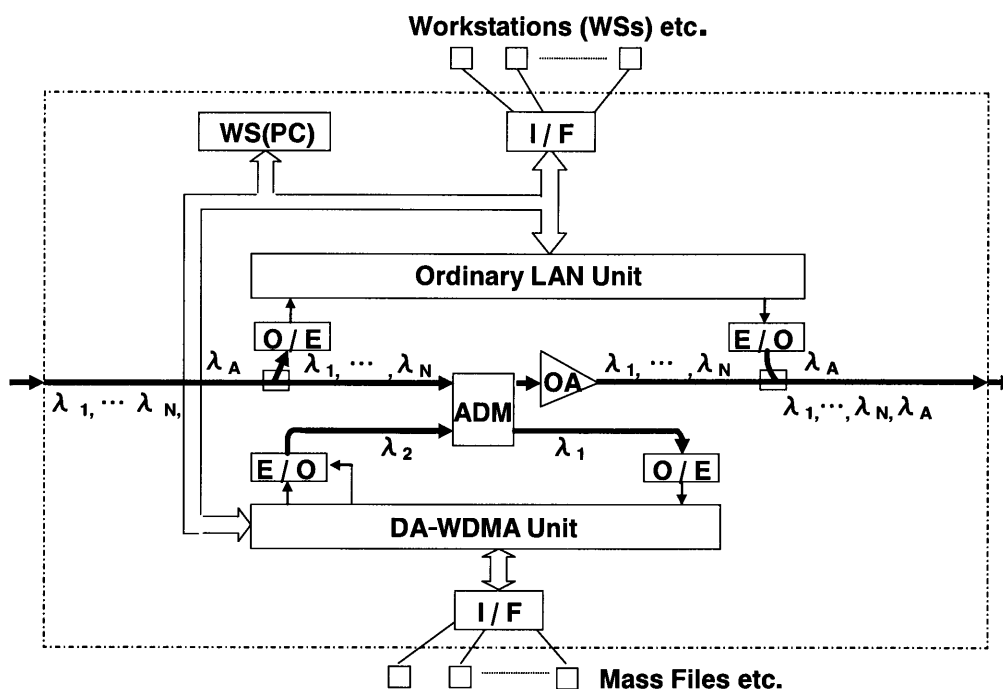


図 3. 2 ノードの構成例

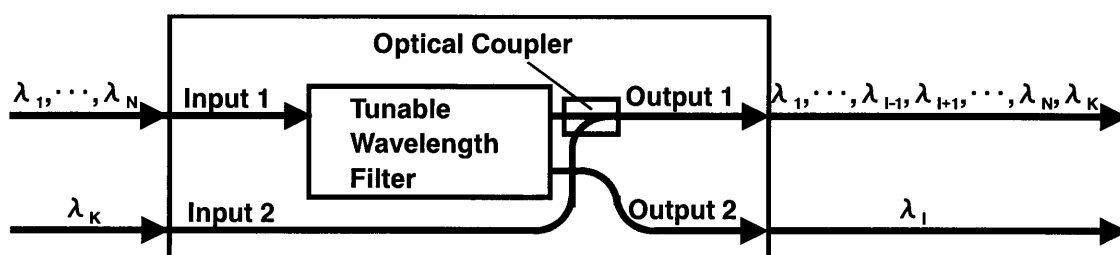


図 3. 3 可変波長フィルタを用いた可変波長 ADM のブロック図

可変波長 ADM は、例えば、偏光無依存 AO (Acousto-Optic)可変波長フィルタにより実現できる[5, 6]。

図 3. 3 に可変波長フィルタを用いた可変波長 ADM の例を示す。可変波長フィルタにより、入力された波長多重光（波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ ）から、任意波長 λ_i の信号光が抽出され、Output 2 へ出力される。可変波長フィルタの透過光（波長 $\lambda_1, \dots, \lambda_{i-1}, \lambda_{i+1}, \dots, \lambda_N$ ）には、光カプラにより Input 2 の入力光 λ_K が多重され、Output 1 へ出力される。

本光 LAN には、次の特長がある。

- (1) 他のノードの通信状態（伝送容量）と無関係に、二つのノード間に、大容量な通信回線を提供する。
- (2) 柔軟なネットワークの再構成が実現できる。
例えば、二つのノード間に常時通信回線を確保することも出来れば、動的に回線を再構成することもできる。また、ファイバチャネル[7]の様な異なる形式の高速な通信回線を収容することもできる。
- (3) 標準光 LAN、あるいは、光 MAN を拡張することにより実現できる。

従来の波長分割多重 (WDM) 技術を用いた光 LAN や MAN は、パワーバジェットの点で有利になることからスター型のネットワークアーキテクチャを採用しているものが多い。これに対し、標準光 LAN や MAN は、ごく最近ではスター型 (ツリー型) の例もあるが、アクセス制御の点からループ型あるいは、バス型のネットワークアーキテクチャを採用するものも多く、従来の WDM 光 LAN あるいは、MAN との整合性が悪い。一方、本光 LAN は、既存の標準光 LAN に DA-WDMA のプロトコルによる WD チャネルを複合するもので、どのような光 LAN でも、本提案の方法により、WDM 複合光 LAN へ拡張することができる。

3. 3 システム設計

3. 3. 1 波長チャネル数

提案する光 LAN では、個々のノードは、要求により割付けられる共通の波長 (WD) チャネルを利用できる。数十のノードを持つ通常の LAN や MAN に対して、全ノードの十数%が同時に WD チャネルを利用することを仮定すれば、十数チャネルの WD チャネルが必要になる。利用できる WD チャネル数は、

- (1) 送信光源と可変波長 ADM の波長可変範囲
- (2) 伝送損失を補償するための光アンプの波長帯域
- (3) WD チャネル間クロストーク抑圧条件から決まる WD チャネル間隔

により決まる。

提案する光 LAN では、送信光源の波長可変範囲、可変波長 ADM の波長可変範囲および光アンプの波長帯域の中で一番狭い帯域に制限される。提案する光 LAN では、送信光源の波長を連続的に可変する必要は無いので、送信光源として既に報告されている 63nm の可変範囲を持つ SSG (Super Structure Grating) DFB (Distributed Feedback) レーザ[8]などを用いることができる。また、可変波長 ADM には、AO フィルタを用いることができる。AO フィルタは、数 μm の波長可変範囲を持つ。通常の C バンドの Er ドープ光ファイバアンプは、30~40nm の波長帯域を持つ。従って、提案する光 LAN の帯域は、光ファイバアンプの波長帯域 30~40nm に制限される。

使用する可変波長 ADM の透過特性 (透過波長帯域幅) が決まると、必要な WD チャネル間クロストーク抑圧比を確保するための WD チャネル間隔が決まる。例えば、第 4 章の検討から、伝送速度 2Gb/s で必要となる WD チャネル間クロストーク抑圧比は、約 10dB である。可変波長 ADM に AO フィルタを用いると、AO フィルタの透過特性から、約 10dB の WD チャネル間クロストーク抑圧比を確保するためには、2~3nm 以上の WD チャネル間隔が必要になる。

光ファイバアンプの波長帯域 30~40nm と 2~3nm 以上の WD チャネル間隔を考慮しても、十数チャネルの WD チャネル数を確保できる。

3. 3. 2 パワーバジェットの設計例

図 3. 4 にパワーバジェット検討のための送信ノード、透過ノード、受信ノードの模式化したブロック図を示す。また、パワーバジェットを表 3. 1 に示す。WD チャネルの波長には、 $1.5\mu\text{m}$ 帯を、標準光 LAN の通信には、 $1.3\mu\text{m}$ 帯 (λ_A) を用いて、標準光 LAN の波長を、WDM カプラを用いてノード

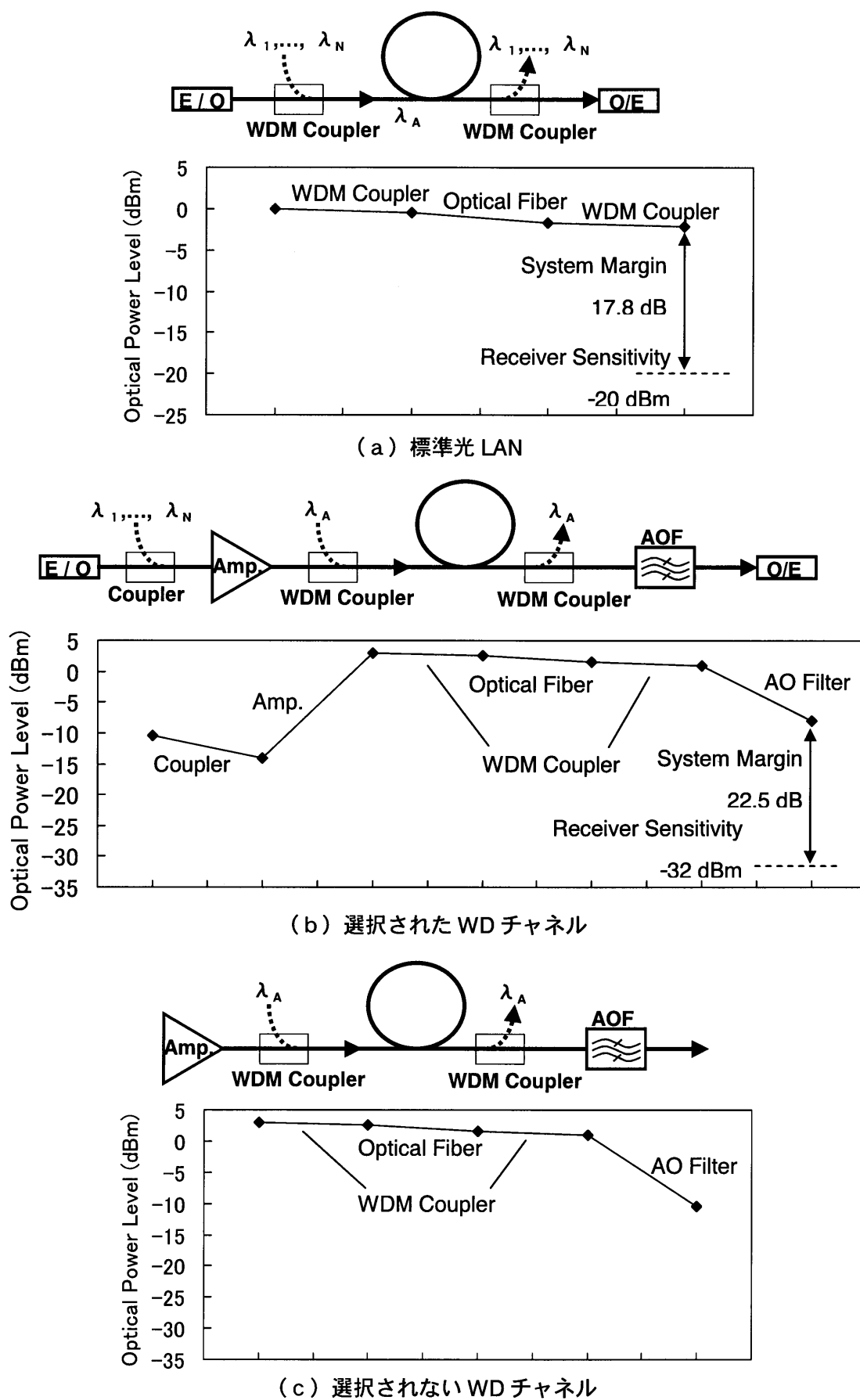


図 3. 4 送信ノード，透過ノード，受信ノードの模式化したブロック図と
レベルダイヤグラム

表 3. 1 パワーバジェット

	Ordinary LAN	Selected WD Channel	Un-Selected WD Channel	
Tx Output	0.0	-13.5		dBm
EDFA Output		0.0	0.0	dBm/ch
Receiver Sensitivity (@10 ⁻⁹ BER)	-32.0/-20.0	-32.0		dBm
Allowable Loss	32.0/20.0	32.0		dB
Optical Loss				
Coupler		3.5		dB
WDM Coupler	0.5	0.5	0.5	dB
1km Optical Fiber Cable (including connectors)	1.2	1.0	1.0	dB
WDM Coupler	0.5	0.5	0.5	dB
AO Filter				
Filter Output		9.0		dB
Through Output			11.5	dB
Power Penalty				
Inter Channel Crosstalk		0.5		dB
Optical Fiber Amplifier		1.0		dB
Total (Loss + Penalty)	2.2	17.0	13.5	dB
System Margin	29.8/17.8	15.0		dB

の入出力部で分離，合波する。標準光 LAN の信号光は、各ノードの入出力で O/E 変換，E/O 変換される。従って、標準光 LAN の信号光には、DA-WDMA チャンネルが付加されない通常のノード間伝送損失に WDM カプラ 2 台分の過剰損失が加わるだけであり、その大きさは高々 1dB 以下である。標準光 LAN の送信出力，受信感度は、そのシステム設計（伝送速度，デバイス）によるが、例えば、送信出力+0dBm，最小受信感度-20dBm（PIN-PD（PIN Photodiode）受信器を想定）あるいは、-32dBm（APD（Avalanche Photodiode）受信器を想定），伝送損失 1.2dB（光ファイバ 1km とコネクタ挿入損失）とすると、システムマージン約 17.8dB あるいは、29.8dB が得られる。

WD チャンネルの送信光は、波長多重用のカプラ，WDM カプラ，光ファイバ伝送路，次ノードの WDM カプラを経て、AO フィルタに入力される。次のノードで受信される場合は、AO フィルタで選択（Drop）され O/E 変換される。次のノードで受信されない場合は、AO フィルタの透過出力ポートを経て、光ファイバアンプで増幅される。WD チャンネル毎の光ファイバアンプ出力レベルがこのノードの WD チャンネル送信レベルにほぼ等しくなる様に光ファイバアンプのゲインと WD チャンネル送信レベルを決める。例えば、送信出力-13.5dBm，最小受信感度-32dBm，伝送損失 1.0dB（光ファイバ 1km とコネクタ挿入損失）とすると、システムマージン約 15.0dB が得られる。このとき光ファイバアンプの入力レベルは、-13.5dBm/ch、チャンネル当りの光ファイバアンプ出力を 0.0dBm/ch とすると、チャンネル当りのゲインは、13.5dB となり、光ファイバアンプのパワーペナルティは、高々 1dB 程度になる。また、WD チャンネル数を 16 としても、最大出力は約 12dBm となり、WDM 用光ファイバアンプとして充分入手可能な仕様である。最近の WDM 用光ファイバアンプは、CPU インターフェースを介して、入力 WDM チャンネル数を光ファイバアンプモジュールに入力し、WDM チャンネル毎の出力レベルが一定になる様に制御する方式

を採用している。本光 LAN の場合、DA-WDMA コントローラを介して、ノード毎に光ファイバアンプを通過する WDM チャンネル数を光ファイバアンプモジュールに入力することが可能であり、これにより光ファイバアンプの出力レベルを制御できる。

3. 4 アクセスコントローラ

標準光 LAN を用いて DA-WDMA 制御機能を実現するアクセスコントローラを開発した。アクセスコントローラは、標準光 LAN のコントローラに追加されるソフトウェアとマイクロコンピュータを用いた専用コントローラから構成される。このコントローラは、次の機能を実現する。

(1) 送信 WD チャンネルの設定

WD チャンネル通信用の可変波長半導体レーザの注入電流を変えることにより、送信波長を制御する。

(2) WD チャンネルへのランダムアクセス

可変波長 AO フィルタの駆動周波数を制御することにより、受信 WD チャンネルをランダムに選択する。

(3) 可変波長 AO フィルタのトラッキング制御

隣接 WD チャンネルからのクロストークを充分抑圧するためには、受信 WD チャンネル波長に可変波長 AO フィルタの透過波長を合わせる必要がある。ここでは、AO フィルタの制御周波数に微小な変調を加えて、AO フィルタの出力光強度をこの変調周波数で同期検波して波長誤差を検出し、AO フィルタのトラッキング制御を行っている。

図 3. 5 に DA-WDMA を実現する MAC (Media Access Control) の手順を示す。高速データ伝送の必要が生じた送信ノードでは、制御ノードへデータ伝送を行うための WD チャンネルの割当てを要求する。制御ノードは、使用可能な WD チャンネル (λ_k) を割当て、制御テーブルに記録し、受信ノード、送信ノードの順番に、割当てられた WD チャンネルを通知する。これらの通知を受信すると、受信ノード、送信ノードでそれぞれ光 ADM と可変波長光源を割当てられた WD チャンネルの波長へ制御する。データ伝送が完

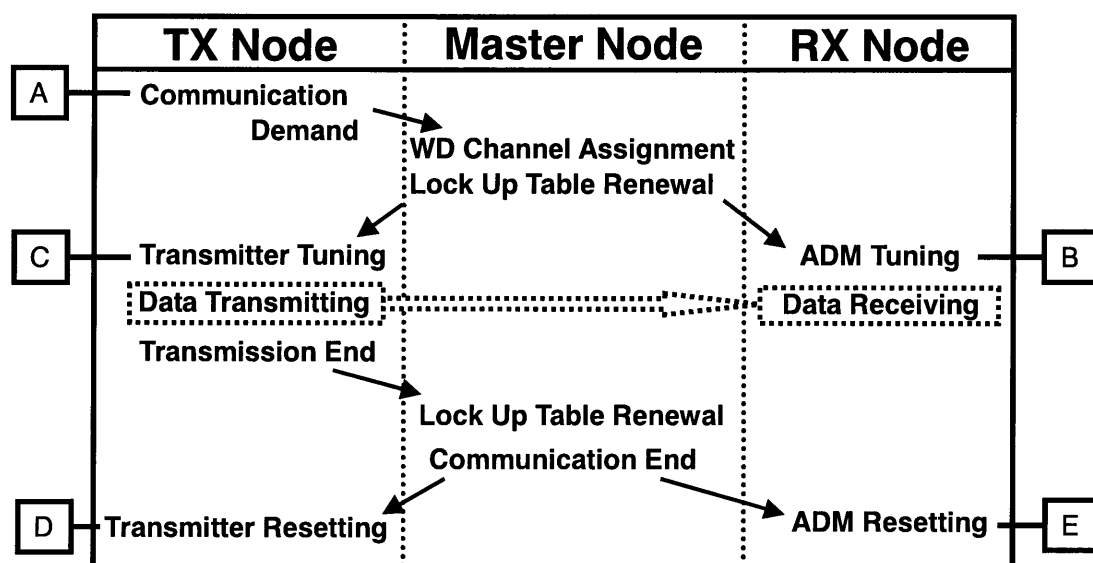


図 3. 5 DA-WDMA 制御の手順

了すると、送信ノードは、制御ノードヘデータ伝送の完了を通知する。この通知を受けた制御ノードは、受信ノードヘデータ伝送完了を通知するとともに、制御テーブルを更新する。

3. 5 実験システム

提案する光ネットワークの有効性を示すために実験システムを構築した。実験システムでは、標準光 LAN として IEEE802.6 トークンパッシング型の商用光 LAN を用いた。この標準光 LAN の特性を表 3. 2 に示す。信号伝送速度 2Mb/s の本標準光 LAN は、パーソナルコンピュータ間のデータ通信に利用される場合が多く、パーソナルコンピュータ用拡張ボードで容易に構築することができる。実験シ

表 3. 2 IEEE802.6 トークンパッシング型の商用光 LAN の特性

Topology	Ring
Access Control	Token Passing
Protocol	Compatible with IEEE802.5
Signal Speed	2 Mb/s
Signal Format	Manchester
Terminal	PC-9801(NEC) etc.

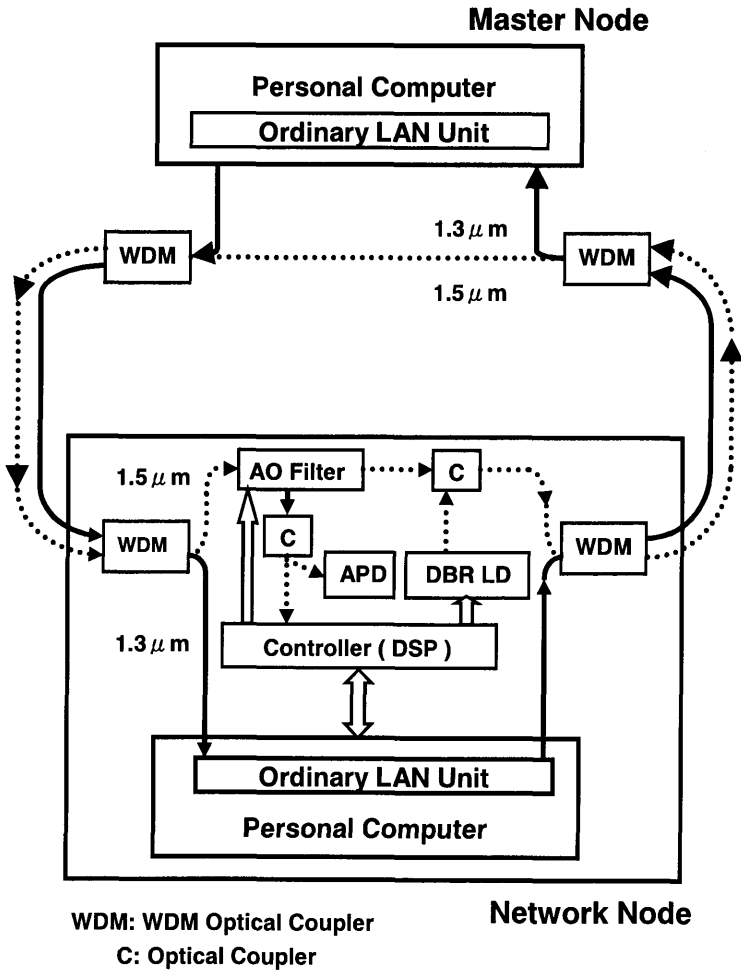


図 3. 6 実験システムのブロック図

システムでは、構築が容易なことから同光 LAN を標準光 LAN として採用したが、開発したアクセスコントローラは、FDDI（伝送速度 100Mb/s）や IEEE802.6 DQDB（伝送速度 150Mb/s）にも適用可能である。

図 3. 6 に実験システムのブロック図を示す。この実験システムは、二つのノードから構成される。一つのノードは、WDM チャンネルの割当てを行う制御ノード（Master Node）として機能する。もう一つのノードは、WD チャンネルの送信ノードと受信ノードを兼ねる。送信ノードから送出された信号は、制御ノードを介して、受信ノード（送信ノードと同じノード）で受信される。これにより、ループ状の伝送路に接続された二つのノード間のデータ伝送を模擬する。データ伝送の要求を受信した制御ノードは、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の WD チャンネルを割当て、割当てた波長を各ノードに通知する。コントローラは、送信器と AO フィルタを用いた ADM の波長を割当てられた波長へ制御する。WD チャンネルで伝送するデータには、1.2Gb/s の NRZ PN (Non Return to Zero Pseudo-Random) パターンを用いた。送信光源用 LD には、3 Section DBR LD[9]を用いた。また、可変波長 ADM は、AO フィルタと偏光ビームスプリッタを組み合わせで構成した。

AO フィルタの動作原理を図 3. 7 に示す。AO フィルタは、Ti 拡散 LiNbO_3 光導波路による音響光学効果を用いた TE/TM モード変換器と偏光ビームスプリッタにより構成される。モード変換は、音響波の周波数で決まる特定の波長（WD チャンネル）のみに対して起こるため、出力側の偏光ビームスプリッタによりモード変換の起こった波長（WD チャンネル）を選択的に透過させることができる。図 3. 8 (a) に実験に用いた AO フィルタの構造を示す。同図に示す様に AO フィルタは、Ti 拡散 LiNbO_3 光導波路型 TE/TM モード変換器と偏光ビームスプリッタにより構成される[10]。実験には、バルク型の偏光ビームスプリッタを用いたが、現在では、導波路型の偏光ビームスプリッタにより、偏光無依存全導波路型 AO フィルタ[6]が実現されている。実験に用いた AO フィルタは、十分なサイドモード抑圧比を得るため、表面弾性音響波（SAW: Surface Acoustic Wave）に対する重み付け導波路構造を採用している。同図 (b) に AO フィルタの代表的透過特性を示す。サイドモード抑圧比として 13.6dB が得られている。半値全幅は、約 2.6nm である。この透過特性は、送信器に波長チャープングのある半導体レーザの直接

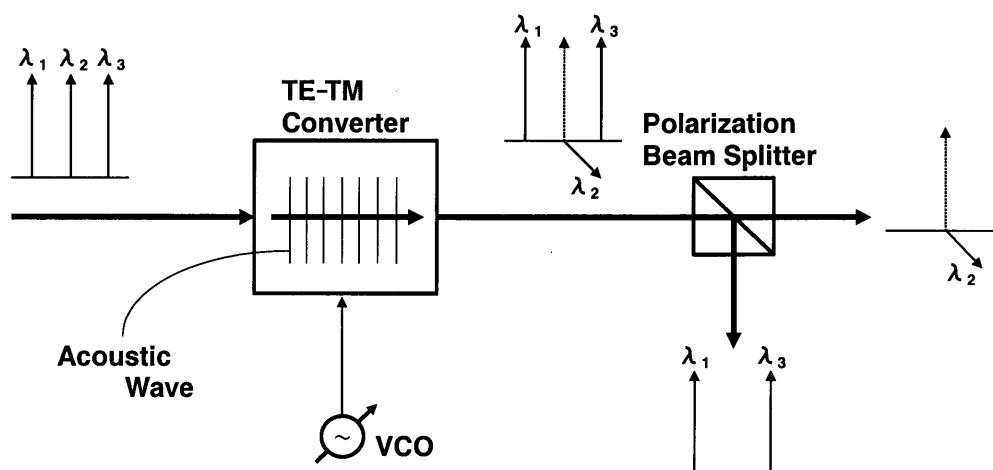
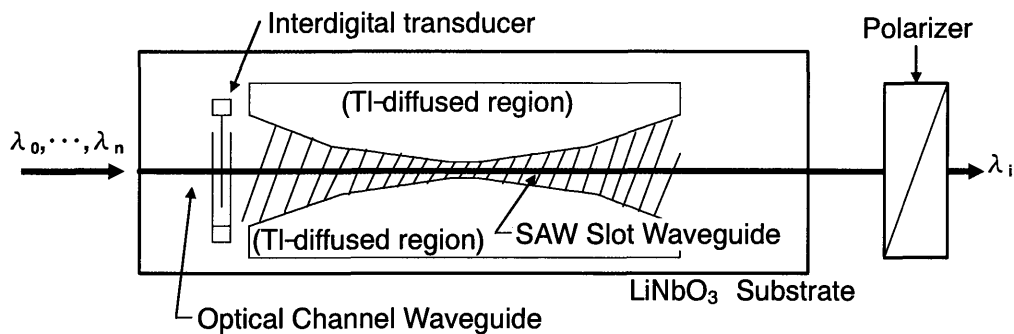
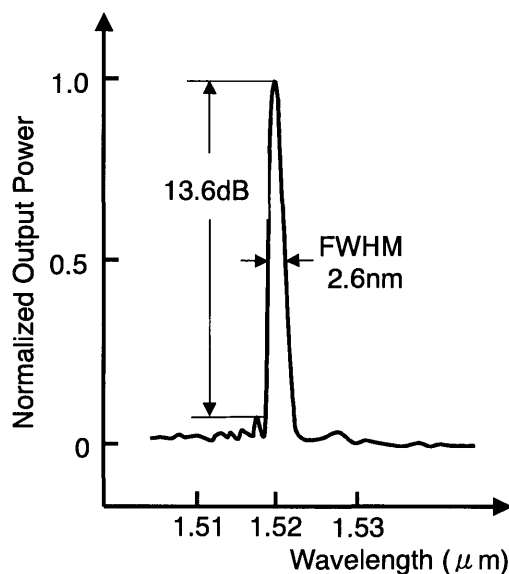


図 3. 7 AO フィルタの動作原理



(a) AO フィルタの構造



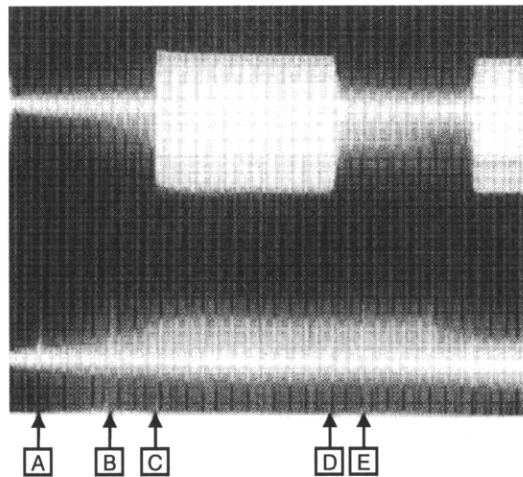
(b) AO フィルタの透過特性

図 3. 8 AO フィルタの構造と透過特性

変調方式を用いる場合に適した特性である。

図 3. 9 に実験結果を示す。この実験では、WD チャンネルの割当て要求を定期的に発生させ、2 チャンネルの WD チャンネルを交互に割当ててる。WD チャンネルの波長は、それぞれ 1540.5nm, 1544.5nm である。写真の上側は、WD チャンネルを AO フィルタで選択し、高速の受信器で受信した波形である。写真の下側は、図 3. 4 に示す制御タイミングに対応してアクセスコントローラから発生させたパルスである。図 3. 9 の A~E は、図 3. 4 の A~E に対応する。WD チャンネルの受信波形と標準光 LAN の受信波形をそれぞれ図 3. 10 (a), (b) に示す。いずれも良好な受信波形が得られている。WD チャンネルの割付け要求発生から WD チャンネルの通信が始まるまでの処理時間は、23ms であった。この処理時間のほとんどは、標準光 LAN での処理時間である。送信器とフィルタの波長を制御するのに要する時間 100ms 程度と比較して、DA-WDMA 制御の処理時間は充分短い。

図 3. 11 は、AO フィルタを用いた可変波長 ADM のトラッキング制御を行った場合と行わない場合の波長誤差を示す。波長誤差は、31.3pm 以下であり、開発した ADM の制御回路により充分な波長トラッキング安定度が得られている。



A: Communication Demand

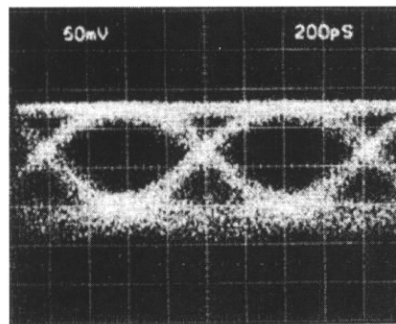
B: ADM Tuning

C: Transmitter Tuning

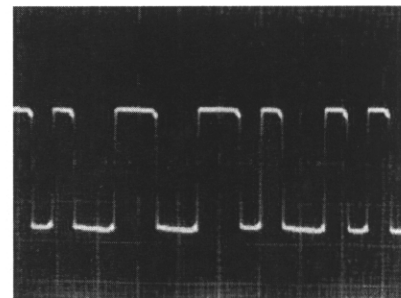
D: Transmitter Resetting

E: ADM Resetting

図 3. 9 WDM チャンネルの波形および制御タイミング



(a) WDM チャンネル (1.2Gb/s)



(b) 標準光 LAN (2Mb/s マンチスターコード)

図 3. 10 WDM チャンネルと標準光 LAN の同時受信波形

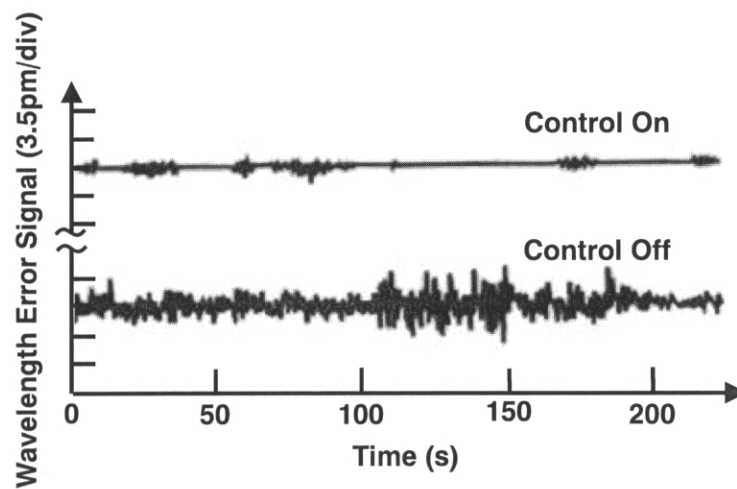


図 3. 11 AO フィルタの波長誤差

3. 6 結

本章では、DA-WDMA を用いた複合型光 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 WD チャンネルから構成される。WD チャンネルは、標準光 LAN の伝送速度に依存しない、他チャンネルのデータ伝送の影響を受けない伝送路を提供する。また、提案した光 LAN は、既存の標準 LAN を拡張することにより実現される。

WD チャンネル数は、光ファイバアンプの波長帯域に制限される。約 35nm の Er ドープ光ファイバアンプの波長帯域幅と可変波長 ADM 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 WD チャンネルが使用できる。十数の付加的 WD チャンネルは、数十のノードを持つ実用的光 LAN あるいは、MAN の応用に対して十分な伝送容量を付加する。

設計例に基づき、パワーバジェットを検討し、この場合のシステムマージンとして、約 17.8dB (PIN-PD 受信器を想定) あるいは、29.8dB (APD 受信器を想定) が確保できることを示した。これにより、提案する光 LAN が実現性の高いシステムであることを示した。

標準光 LAN を用いて DA-WDMA 制御を実現するための専用のコントローラとソフトウェアを開発した。また、実験システムでは、標準光 LAN に、IEEE802.6 に準拠する $1.3\mu\text{m}$ 帯、伝送速度 4Mb/s の光 LAN を用い、可変波長 ADM には、AO フィルタを用いた。付加する WD チャンネルの伝送速度は、1.2Gb/s とした。これにより、提案する複合型光 LAN の実用性を示すとともに、本光 LAN に必要とされる DA-WDMA 制御などの要素技術を確認した。

既存の光 LAN に DA-WDMA の回線を付加する概念は、加入者系光ネットワーク[11]やオフィス間光ネットワーク[12]などへも適用可能である。

本光 LAN では、DA-WDMA により、少ない波長チャンネルを有効に利用することが特長の一つになる。しかし、近年、数十～百数十 WD チャンネルの WDM 用（固定波長）半導体レーザが入手できるようになった。また、数十 nm の可変幅を実現した可変波長フィルタも入手できるようになった。したがって、本提案の光 LAN の変形として、DA-WDMA 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。この場合、各ノードには、付加回線用の送信波長として、固有の波長を割当て、デマンドアサイン (DA) で WD チャンネルの割当てを行う代わりに、受信側ノードの可変波長フィルタの設定を行うだけで、WD チャンネルの回線を確保することになる。

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 チャンネル数を持つ DA-WDMA システムが制限なく構築できるようになれば、既存 LAN に DA-WDMA を付加するという概念は不要となり、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。本研究には、将来の DA-WDMA システム基礎技術の確立という意味付けもできる。デマンドアサイン (DA) で WD チャンネルを確保するためには、何らかのプロトコルと処理時間を必要とする。この処理時間を短縮することも一つの研究課題であるが、DA-WDMA システムは、当面、処理時間の相対的割合が小さくなる様な回線交換的な応用に適用されると考えられる。現状、数十 nm の可変幅を実現した可変波長フィルタは、入手できるようになったが、測定器用に製品化されている比較的大形の外部共振器を用いた可変波長レーザを省いて、システムに組込める大きさの数十 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。数十 nm 以上の可変幅を実現した可変波長光源の実用化も今後の課題の一つである。

第3章の参考文献

- [1] F. E. Ross, "FDDI-a tutorial," IEEE Commun. Mag., Vol. 24, No. 5, pp. 10-17, May 1986.
- [2] J. F. Mollenauer, "Standards for Metropolitan Area Networks," IEEE Commun. Mag., Vol. 26, No. 4, pp. 15-19, Apr. 1988.
- [3] M. S. Goodman, H. Kobrinski, M. P. Vecchi, R. M. Bulley, and J. L. Gimlett, "The LambdaNet Multi-Wavelength Network: Architecture, Applications and Demonstration," IEEE J. Selected Areas in Commun., Vol. 8, No. 6, pp. 995-1003, Aug. 1990.
- [4] A. S. Acampora, M. J. Karol, and M. G. Hluchyj, "Terabit Lightwave Networks: the Multihop Approach," AT&T Tech. J., Vol. 66, Issue 6, pp. 21-34, Nov./Dec. 1987.
- [5] D. A. Smith, J. E. Bara, K. W. Cheung, and J. J. Johnson, "Polarization-Independent Acoustically-Tunable Optical Filter," in Proc. ECOC'89 Gothenburg, Sweden, PDB-7, pp. 70-73, Sep. 1989.
- [6] 中屋研一, 細井亨, 岩崎正明, 小松耕哉, "温度制御機能内蔵 LN AO 波長可変フィルタモジュール," NEC 技報, Vol. 51, No. 4, 1998.
- [7] D. Getchell and P. Rupert, "Fiber Channel in the Local Area Network," IEEE LTS, Vol. 3, No. 2, pp. 38-42, May 1992.
- [8] Y. Tohmori, Y. Yoshikuni, T. Tamamura, H. Ishii, Y. Kondo, and M. Yamamoto, "Broad-Range Wavelength Tuning DBR Lasers with Super Structure Grating SSG," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 5, No. 2, pp. 126-129, Feb. 1993.
- [9] 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.
- [10] 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. ECOC/IOOC'91 Paris, France, Part 2, WeB9-3, pp. 545-548, Sep. 1991.
- [11] 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.
- [12] T. H. Wu, D. J. Kolar, R. H. Cardwell, "High-Speed Self-Healing Ring Architectures for Future Interoffice Networks," in Conference Record IEEE GLOBECOM'89 Dallas, Texas, 23.1, pp. 801-807, Nov. 1989.

第4章 波長分割・時分割・空間分割複合多重映像信号分配光ネットワーク

4.1 序

放送局、特にキー局（複数の系列放送局の中心的役割を果たす局）では、多チャネルの映像信号を局内の各スタジオ副調整室やVTR (Video Tape Recorder)室などに分配するネットワークを必要とする。近年、放送局では、デジタル化が進み、数100Mb/sの伝送速度を持つ非圧縮のシリアルデジタル映像信号を伝送する大容量でフレキシブルな映像信号分配ネットワークが必要となっている。また、分配する映像信号の多くは、実時間で伝送する必要がある。

従来、放送局内映像信号伝送は、ルーティングスイッチャと呼ばれる電気スイッチャと同軸ケーブル伝送により行なわれていた。図4.1に従来のルーティングスイッチャを用いた映像信号伝送システムの構成を示す。VTRやスタジオあるいは、放送局外からの全ての映像信号がルーティングスイッチャに入力される。ルーティングスイッチャの出力は、同軸ケーブルを介してスタジオやVTR室などに接続される。ルーティングスイッチャは、予めプログラムされたスケジュールに従って、入力を出力に接続あるいは分配し、各スタジオやVTR室などに必要とする映像信号を伝送する。

放送局内映像信号分配ネットワークは、伝送するデータが映像信号に限定される特徴があるが、このネットワークも一種のローカルエリアネットワーク（LAN: Local Area Network）である。放送局内で扱われる映像信号は、ARIB (Association of Radio Industries and Businesses)あるいはSMPTE (Society of Motion Pictures and Television Engineers)などで規格化されているが、伝送ネットワークの規格は無いため、任意なネットワーク構成が可能である。また、放送局内という閉じた空間内のネットワークであることから、放送局内映像信号分配ネットワークは、新しい技術を導入し易い環境にあった。

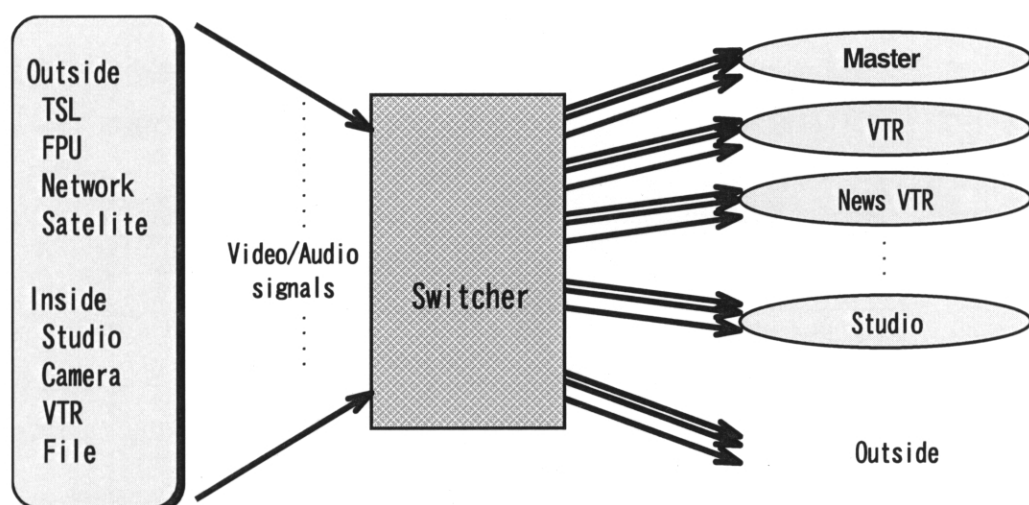


図4.1 従来の放送局内映像信号分配システム（ルーティングスイッチャ）

放送局で要求される大容量、フレキシブルなネットワークは、波長分割多重などの光通信技術の導入により実現できる[1, 2]。1997 年 3 月より、本放送を開始したフジテレビジョンの新社屋には、放送局内映像信号分配ネットワークとして世界で初めて、光ネットワーク（波長分割（WD: Wavelength Division）・時分割（TD: Time Division）複合多重光ネットワーク）が導入された[3-7]。

本章では、フジテレビジョンに導入したシステムを中心に放送局向光ネットワークについて述べる。最初にキー局の映像信号分配ネットワークに要求される特性、仕様について述べ、次に、この要求仕様を満たす波長分割・時分割複合多重光ネットワークの構成と設計について述べる。更に、開発した装置とその特性およびフジテレビジョン新社屋への導入状況について述べる。

4. 2 放送局向映像信号分配ネットワークの要件とネットワークの構成

前述の様に、近年、放送局内では、映像信号のデジタル化、将来に向けてのマルチメディア化への動きが急速に進んでいる。この中で、局内のスタジオ、マスタ（送出設備）などを結ぶ映像信号分配ネットワークは、放送局の基本的なインフラストラクチャとして、重要性をますます増している。今後の局内映像信号分配ネットワークは以下の要求を満足する必要がある。

- (1) 高速性： 数 100Mb/s 以上の非圧縮シリアルデジタル映像信号に対応可能である。
- (2) マルチフォーマット： 現状の種々の映像信号方式（SDTV (Standard Definition Television), EDTV (Enhanced Definition Television), HDTV (High Definition Television)など）に加え圧縮信号も含めた新しい映像、音声方式に対応可能である。
- (3) 大容量： 後述する様にキー局では、多チャンネル（大容量）の非圧縮、および、圧縮の映像信号および音声信号を分配する必要がある。
- (4) 拡張容易： 放送局では、デジタル放送に向けて映像信号分配ネットワークを順次拡張することになる。従って、ネットワークの柔軟な拡張性が要求される。
- (5) 柔軟な運用性, 操作性： 従来の集中型スイッチャでの運用負荷集中を軽減することが望まれる。

表 4. 1 にフジテレビジョンの場合を例として、キー局の現状および近い将来の拡張時に必要な映像信号分配ネットワークの仕様を示す。これらの要求を満足するためには、従来の電気スイッチャを用い

表 4. 1 映像／音声信号分配ネットワークへの要求仕様

		Requirements	
		Present	Future
Transmission Format		NTSC Composite(143Mb/s) HDTV(1.5Gb/s)	
Number of Signals	NTSC	150	>200
	HDTV	15	20
Number of Distributions		20	>50
Number of Outputs		150	>200

た方式ではケーブル敷設も含めて膨大な設備が必要となる。これに対し、光ネットワークは、これら要求を容易に満足することができる。以下に、キー局向映像信号分配光ネットワークについて検討する。

一般に光通信システムは、放送局内に導入するのに適した以下の優れた特長を持っている。

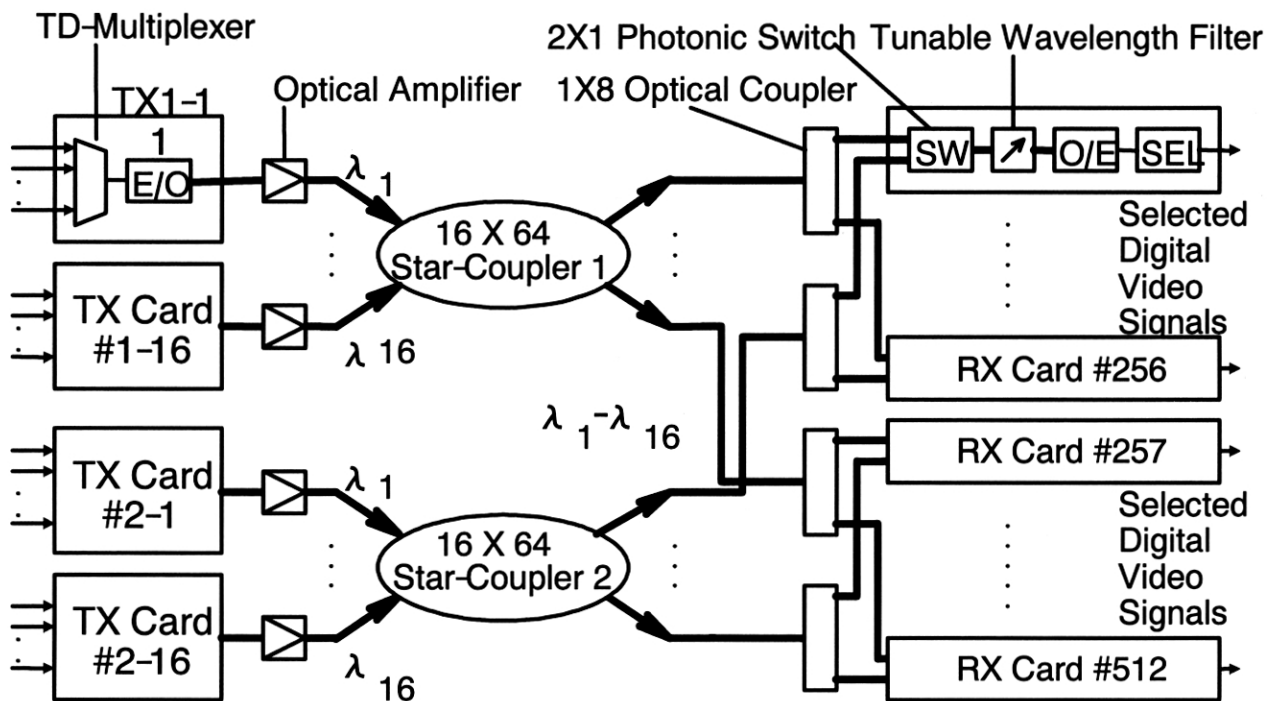
- (1) 高速，長距離伝送： 高速，長距離伝送が可能である。
- (2) 大容量： 波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing），時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）などにより、一本の光ファイバで多数のシリアルデジタル映像信号を多重伝送することが可能である。
- (3) EMI フリー： 電磁誘導による雑音の影響を受けない。
(Electromagnetic Induction Free)
- (4) 光ファイバの軽量，可とう性： 同軸ケーブルと比較し、光ファイバは、敷設工事が容易である。

従って、これらの光ネットワークの特長を生かして、放送局内に導入するのに最も適した光ネットワーク方式を検討することが次の課題となる。

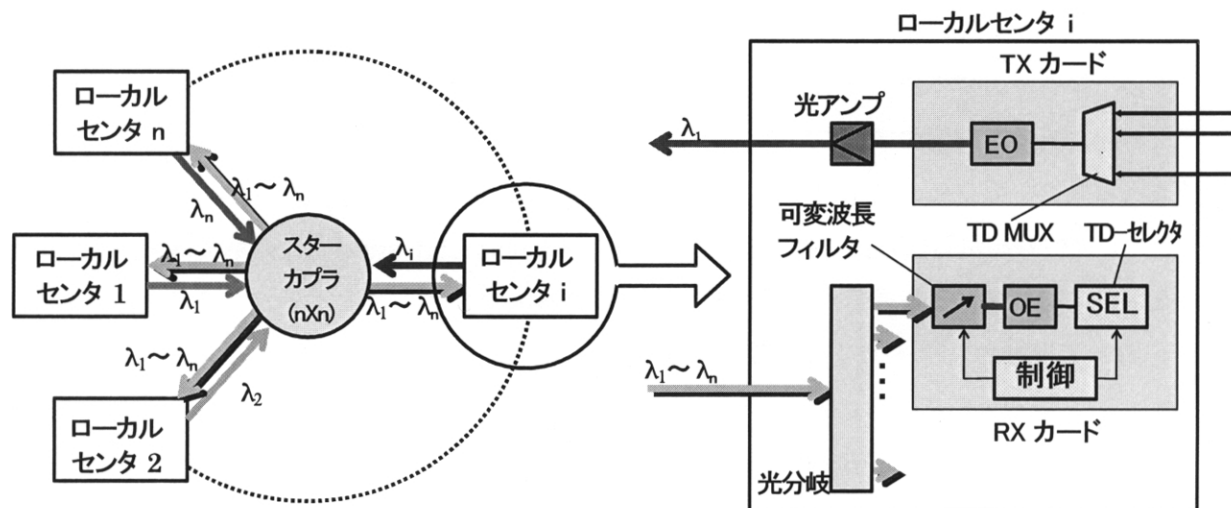
図4. 2 (a) に提案するキー局向映像信号分配光ネットワークの構成例としてフジテレビジョンに採用された光ネットワークの構成を示す。音声信号が多重された（SDTV: Standard Definition Television）シリアルデジタル映像信号は、送信器毎に時分割多重（TDM: Time Division Multiplexing）され、お互いに出力波長の異なる光電気変換器（E/O: Electro-Optic Converter）で光信号に変換され、スターカプラへ送出される。スターカプラでは、複数の波長の光信号が波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）され、分岐されて出力される。従って、時分割多重と波長分割多重された光信号がスターカプラ出力として得られる。スターカプラは、波長 MUX (Multiplexer) と同時に光分配器の機能を持つ。スターカプラの前段には、スターカプラの分配損を補償するための光アンプが挿入される。スターカプラの前段に光アンプを配置することで、波長多重用光ファイバアンプより安価な単一波長用光アンプが使用できる。スターカプラ出力光信号は、光ケーブルにより、スタジオ副調整室等に設置された受信ユニットに分配される。同図の構成では、この様なスターカプラが2組あり、各受信ユニットでは、光スイッチによりスターカプラの系選択を行う。次に、各受信ユニットでは、可変波長フィルタで所要の波長選択を行い、光信号を電気信号に変換する（O/E: Opto-Electric Converter）。この電気信号から時分割選択回路を用いて所要の（音声信号が多重された）デジタル映像信号を選択する。本構成において、光スイッチを用いて複数のスターカプラの系統を選択することは、空間分割多重（SDM: Space Division Multiplexing）技術を用いていることに相当する。従って、本光ネットワークは、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（SDM），波長分割多重（WDM），時分割多重（TDM））を適用している。

図4. 2 (b) は、送受信器を一つのローカルセンタにまとめたスター型のトポロジーに本光ネットワークを置き換えたものである。本章では、信号分配ネットワークとしての応用を主題として述べるが、本光ネットワークは一般的な光 LAN にも適用できる。

この光ネットワークは、次の様な特長を持つ。



(a) WD・TD・SD 複合多重映像信号分配光ネットワークの構成



(b) スター型トポロジーの構成

図 4. 2 映像信号分配ネットワークの構成

- (1) マルチフォーマット： 波長毎に異なる形式の映像信号を対応させる事により、容易にマルチフォーマットに対応できる（フジテレビジョン新社屋では SDTV と HDTV で波長を分けている）。
- (2) 大容量： 時分割多重度、波長（WD）チャンネル数、スターカプラ系統数の積に等しいチャンネル数の信号を伝送できる。
- (3) 運用の柔軟性： 多重されて分配される全ての信号から受信側で自由に任意の信号を選択できる。従って、分散制御により、回線センタの運用上の負荷を低減できる。
- (4) 拡張性： 導入時には送受信器数を最小限とし、送受信器を順次増設することが容易にできる。
- (5) 高信頼性： スターカプラを複数系統用いることにより容量の拡大と共に冗長性を持たせ、特別なスタンバイ系を持たずに障害回復機能を実現できる。

また、フジテレビジョンの場合は、映像信号分配ネットワークと別に設けられた LAN を用いて、オペレータが光ネットワークの構成を意識せずに操作可能なユーザインタフェースを実現している。

4. 3 システム設計

前節で述べた局内映像信号伝送ネットワークに要求される仕様を基に、時分割多重（TDM）システム、波長分割多重（WDM）システム、波長（WD）チャンネルのクロストークと波形劣化、パワーバジェットに関する検討を行った。以下にこれらのシステム設計、検討について述べる。

4. 3. 1 時分割多重（TDM）システム

基幹系の光通信システムでは、SDH（Synchronous Digital Hierarchy）が広く採用されている。時分割多重の方式として、SDH のフォーマットに従った多重方式も考えられるが、現時点では、放送局内ネットワークとしては、複雑となり、高価な多重方式と考えられる。そこで、本光ネットワークでは、単純なビット多重による時分割多重方式を採用した。また、フレーム同期を取るために、時分割多重の 1 チャンネルをフレーム識別チャンネルとした。フレーム識別チャンネルは、回路の簡単化と時分割多重信号のランダム性を考慮し、隣接チャンネルのビット反転とした。

標準的なシリアルデジタル映像信号（SDTV コンポジット、コンポーネント、HDTV）は、その規格で 9 次のスクランブルがかけられているが、20 ビット同符号連続や 1/20 低マーク率が容易に発生することが知られている[8]。すなわち、シリアルデジタル映像信号が低周波数成分を持つ場合がある。ビット多重方式を用いる場合、同符号連続を持つ信号が多重されることにより、更に長い同符号連続が発生する可能性がある。光通信で通常使われる AC 結合を用いた（低域が遮断された）受信器を使用する場合、この同符号連続が問題となる場合がある。本光ネットワークでは、この問題を解決するため、時分割多重した信号に対して、 $X^{17}+X^3+1$ の生成多項式に従うスクランブルを行う方式を採用した。このスクランブル機能は、時分割多重前のシリアルデジタル映像信号の速度（143Mb/s, 270Mb/s）で動作する集積回路で実現できる[9]。

現状で最も高速かつ妥当なコストで実現できる光通信システムの伝送速度は、基幹系の STM-16 (OC-48)で利用されている 2.5Gb/s である。言い換えると、妥当なコストでシステムを実現するために

は、1 波長チャンネル当たりの伝送速度は、2.5Gb/s 以下でなければならない。そこで、NTSC コンポジット信号（143Mb/s）に対しては、15 チャンネルとフレームチャンネル 1 チャンネルを、16:1 の MUX, DEMUX（Multiplexer, Demultiplexer）を用いて時分割多重し、1 波長チャンネル当たりの伝送速度を 2.29Gb/s とする。また、NTSC コンポーネント信号（270Mb/s）に対しては、7 チャンネルとフレームチャンネル 1 チャンネルを、8:1 の MUX, DEMUX を用いて時分割多重し、1 波長チャンネル当たりの伝送速度を 2.16Gb/s とする。HDTV の伝送速度は、1.5Gb/s なので、時分割多重を行わずに、1 波長チャンネル当たりの伝送速度を 1.5Gb/s とする。

以上述べた時分割多重方式は、ITU-R (International Telecommunication Union Telecommunication standardization sector)に提案中である[10]。

4. 3. 2 波長分割多重（WDM）システム

光ヘテロダイン検波などの高価な波長フィルタ技術を別に考えると、ファブリペロー（Fabry-Perot）フィルタや誘電体多層膜フィルタなどが価格面で実用的な波長フィルタとなる。これらの波長フィルタの波長分離度から判断すると、WD チャンネル間隔 0.8~1nm が実用的波長間隔となる。ITU-R では、0.4nm (50GHz)と 0.8nm (100GHz)間隔の波長グリッドのリコメンデーションを発行している[11]。これに加えて、Er ドープ光ファイバアンプ（EDFA: Er-Doped Optical Fiber Amplifier）の C バンドの波長帯域を考えると 32 チャンネル程度まで波長分割多重を行うことができる。同時に、この波長帯域（約 30nm）で発振する波長分割多重用半導体レーザを揃える必要がある。現在では、比較的容易に波長分割多重用半導体レーザを入手できるようになったが、フジテレビジョン新社屋向装置開発時点では、30nm の範囲に渡って、半導体レーザを揃えることは、相当なコスト高をもたらす状況であった。このため、著者らは、1545~1560nm の 1nm 間隔、16 チャンネルの波長分割多重システムを選択した。

以上述べた波長分割多重および時分割多重方式を用いると、図 4. 2 に示した構成では、NTSC コンポジット映像信号換算で、最大 480 チャンネル、HDTV 信号換算で、最大 32 チャンネルの映像信号の分配伝送が可能となる。NTSC に 10 波長（WD）チャンネル、HDTV に 15 波長（WD）チャンネルを割り当てることで表 4. 1 の要求を満足できる。

4. 3. 3 波長チャンネル間クロストークと波形劣化

波長分割多重における受信感度劣化の主要因は、波長チャンネル間クロストークと波長フィルタが受信 WD チャンネルの光スペクトルに与える歪による波形劣化と考えられる。これらの要因によるパワーペナルティをアイパターンのシミュレーションにより計算した。

図 4. 3 に、アイパターンシミュレーションの方法を示す。このシミュレーションでは、伝送方式として、強度変調、直接検波（IM/DD: Intensity Modulation/Direct Detection）を仮定している。以下に、アイパターンシミュレーションの手順を説明する。

- （１） 理想的な矩形の変調波形に対して FFT (First Fourier Transformation)を行い、周波数領域でローパスフィルタをかけてスムージングを行う。変調波形には、 2^6-1 の PN (Pseudo-Random)パターンを用いた。
- （２） IFFT (Inverse First Fourier Transformation)を行い、時間領域でチャープニングを加える。

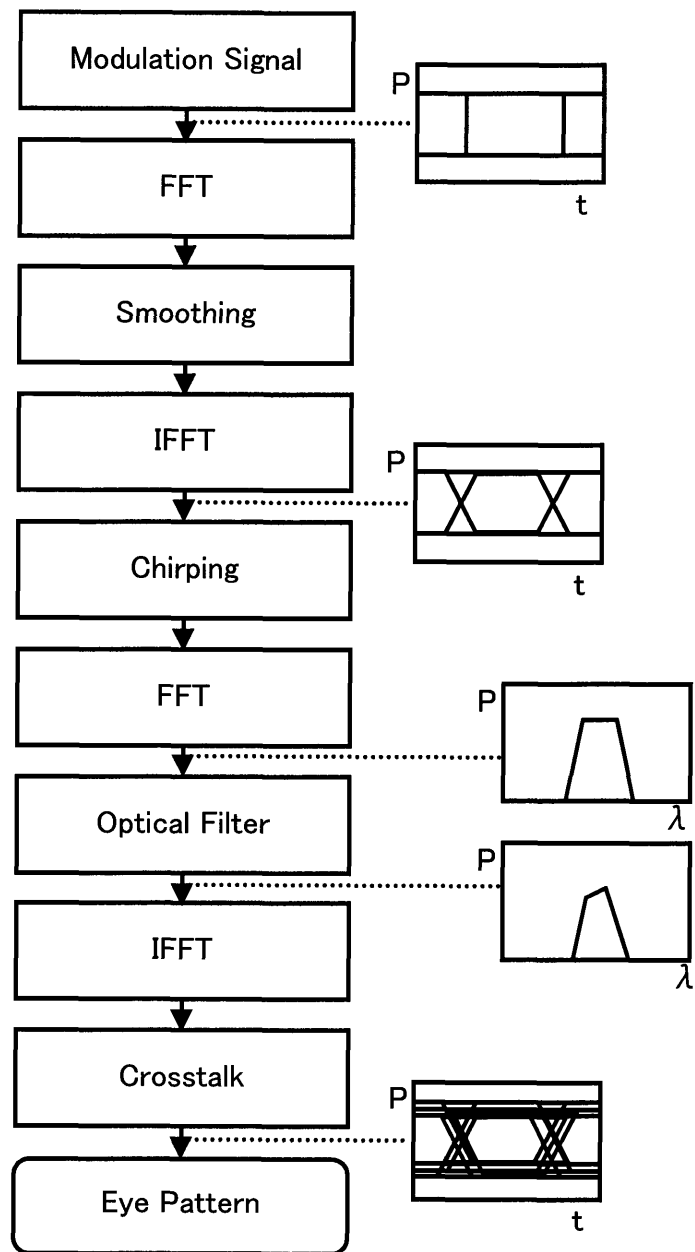
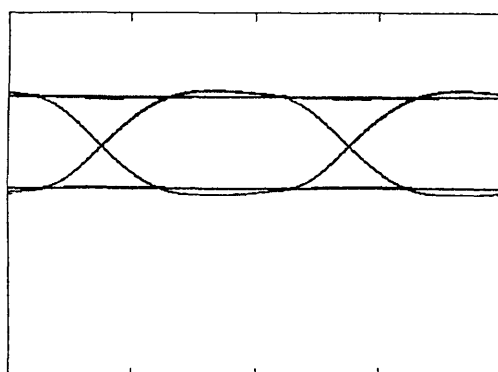
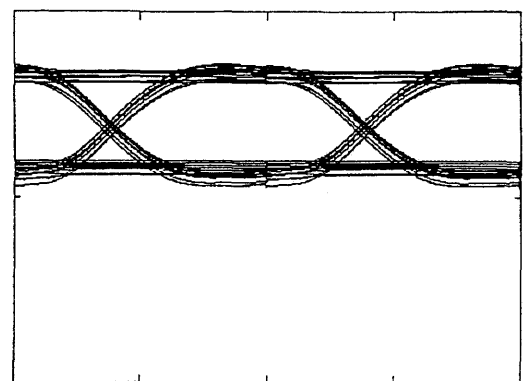


図 4. 3 アイパターンのシミュレーション方法



(a) クロストークの無い場合



(b) 15チャンネルのクロストーク

(総クロストーク-5dB) のある場合

図 4. 4 アイパターンのシミュレーションの結果

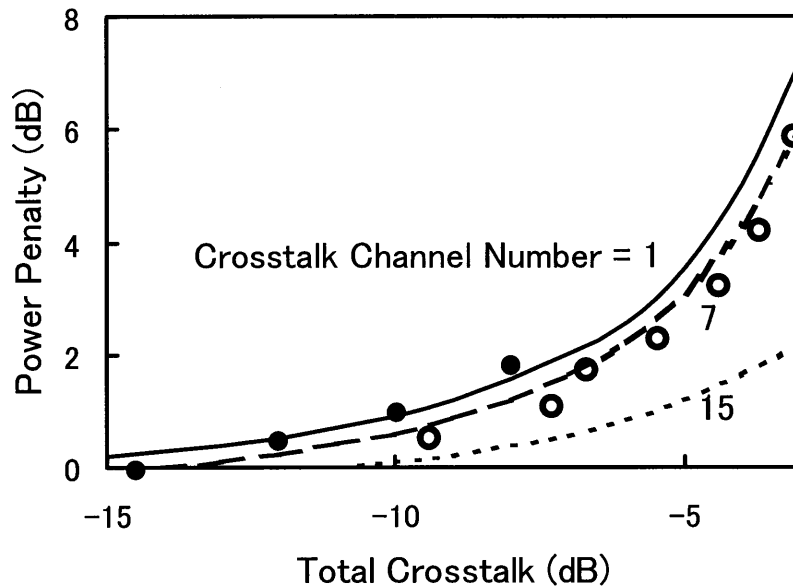


図 4. 5 クロストークと波形歪みによるパワーペナルティ

(3) FFT を行い、周波数領域で波長フィルタによる歪を加える。波長フィルタのスペクトル伝達関数には、SINC 関数を用いた。

(4) IFFT (Inverse First Fourier Transformation)を行い、時間領域でクロストークを加え、アイ開口劣化からパワーペナルティを求める。各 WD チャンルの光パワーは等しいものとした。

図 4. 4 にアイパターンシミュレーションの結果を示す。同図 (a) は、クロストークが無い場合であり、(b) は、合計のクロストークを-5dB としたときの 15 チャンルのクロストークが加わった場合である。図 4. 5 は、アイパターンシミュレーションにより求めた 1 チャンルのクロストークがある場合、7 チャンルのクロストークがある場合、15 チャンルのクロストークがある場合について、クロストークの合計とパワーペナルティの関係を示す。同図において、黒丸 (●) は、1 チャンルのクロストークがある場合、白丸 (○) は、7 チャンルのクロストークがある場合の実験により得られたパワーペナルティである。アイパターンシミュレーションにより求めたパワーペナルティと実験結果が良く一致している。同図より、合計のクロストークが-10dB 以下であれば、パワーペナルティは、1dB 以下となることが分かる。通常の波長フィルタでは、隣接チャンネルのクロストークが支配的である。従って、各 WD チャンルのレベルのバラツキや設定波長誤差の影響を含めた上で隣接 WD チャン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。

4. 3. 4 パワーバジェット

図 4. 2 に示した構成では、光ファイバアンプは、ブースタアンプとして光送信器とスターカプラの間に置かれる。この構成であれば、波長多重用光ファイバアンプより比較的安価な単一波長用光アンプが使用できる。更に、光送信器間の出力レベルのバラツキも光ファイバアンプの APC (Automatic Power Control)により補償できる。

表 4. 2 および図 4. 6 にフジテレビジョン新社屋の光ネットワークのパワーバジェットを示す。送

表 4. 2 パワーバジェット

EO Output	0.0 dBm
EDFA Output	14.5 dBm
Receiver Sencitivity (@10 ⁻⁹ BER)	-32.0 dBm
Allowable Loss	46.5 dB
Worst Case Optical Loss	
16x64 Starcoupler	20.0 dB
1km Optical Fiber Cable (including connectors)	2.0 dB
1x8 Optical Coupler	11.0 dB
1x2 Photonic Switch	1.0 dB
Tunable Wavelength Filter	4.0 dB
1x2 Optical Coupler	1.0 dB
Power Penalty (dB)	
EDFA Noise	negligible
Inter Channel Crosstalk	0.5 dB
Total (Loss+Penalty)	39.5 dB
System Margin (dB)	7.0 dB

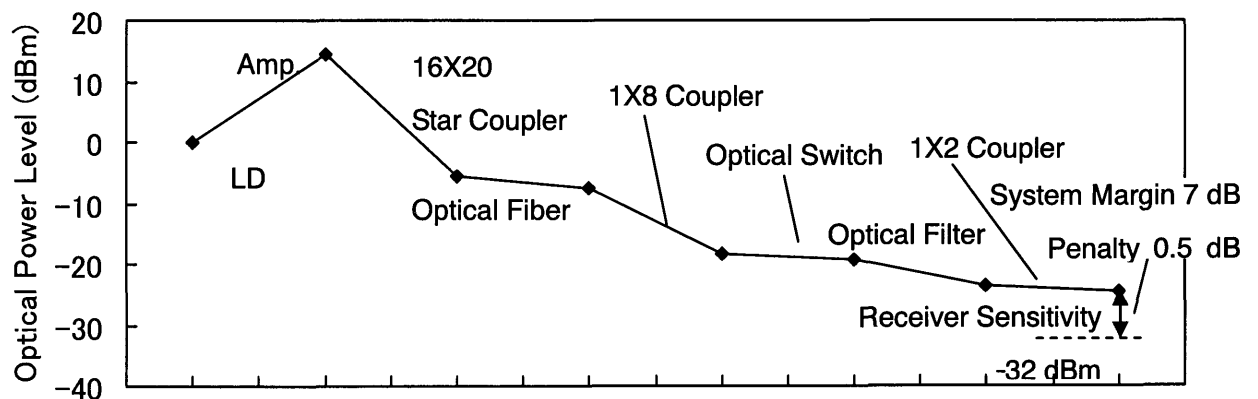


図 4. 6 パワーバジェット

信光源には、DFB-LD (Distributed Feedback Laser Diode)と EA (Electro-Absorption)変調器[12]を用いた。可変波長フィルタには、ファブリペロー (Fabry-Perot) 型の光フィルタを用いた。透過波長ピークから 1nm 離れた波長位置でのクロストークレベルは、-15dB 以下である。

光ファイバアンプの出力は、APC 制御されているので、パワーバジェットとしては、光ファイバアンプ出力から受信器までを考慮すれば良い。光ファイバアンプは、ブースタアンプとして入力レベルが充分高い状態で使用しているので、光ファイバアンプのパワーペナルティは、ほとんど生じない。また、充分な隣接 WD チャンネル抑圧比を持った波長フィルタを使用しているので、隣接 WD チャンネルのクロストークによるパワーペナルティは、0.5dB とした。表 4. 2 から分かる様に、システムマージンは、最悪値で 7dB と充分な値が得られている。

4. 4 装置開発と特性

以上のシステム設計を基に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を開発した。本節では、開発した装置の構成、特性について述べる。

SDTV (NTSC コンポジット) 用送信 (Tx) カードのブロック図と写真をそれぞれ図 4. 7, 8 に示す。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) は、専用の IC でクロック抽出され、ゲートアレイでビット同期、フレームチャネル付加、(パラレル) スクランブルを行った後、ビット MUX により時分割多重される。時分割多重信号は、波長多重用半導体レーザと EA (Electro-Absorption) 変調器により構成される E/O 変換器により光信号に変換される*1。また、Tx カード上の CPU により、入力のデジタル信号の状態、半導体レーザの温度異常、出力レベル異常などが監視され、異常が発生するとアラームを出力する。

波長多重用半導体レーザの出力光は、光カプラにより分岐され、誘電体多層膜フィルタを用いた波長基準に入力される。同レーザの出力波長は、ステップ・バイ・ステップ法により波長基準用フィルタの出力光強度を最大とすることにより、安定化される。He・Ne レーザを基準にした干渉計型波長計 (アドバンテスト TQ8325) を用いて測定した波長安定度を図 4. 9 に示す。同図より、 $\pm 0.05\text{nm}$ 以下の波長安定度が得られていることが分かる。この安定度は、1nm 間隔の波長分割多重に対して、十分な値である。

SDTV (NTSC コンポジット) 用受信 (Rx) カードのブロック図と写真をそれぞれ図 4. 10, 11 に示す。Rx カードに入力された光信号は、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、APD (Avalanche Photodiode) を用いた O/E 変換器により電気信号に変換される。この電気信号は、ビット DEMUX により時分割分離された後、ゲートアレイで (パラレル) デスクランブル、フレーム同期され、時分割 (TD) チャンネル選択回路を用いて所要のシリアルデジタル映像信号が出力される。また、Rx カード上の CPU により、可変波長フィルタの制御、TD チャンネル選択回路の制御が行なわれるとともに、入力光レベルの異常、波長フィルタの異常、フレーム同期の異常などが監視され、異常が発生するとアラームを出力する。

Tx カードと Rx カードのそれぞれに使用しているビット同期、フレーム同期、スクランブル、デスクランブル、TD チャンネル選択の機能を持つ 2 種類の ECL (Emitter-Coupled Logic) ゲートアレイを開発した。また、MUX, DEMUX には、GaAs の IC を用いた*2。

Tx カード、Rx カードの大きさは、 $380 \times 270\text{mm}$ である。

図 4. 12 (a), (b), (c) は、それぞれ MUX 出力波形、Tx カード光出力波形、TD チャンネル選択出力波形である。MUX 出力波形は、15 チャンネルの SDTV (NTSC) コンポジットシリアルデジタル信号 (143Mb/s) とフレーム識別チャネルを時分割多重したものである。Tx カード光出力波形は、8GHz

*1 現在では、EA 変調器を半導体レーザに集積化した EA 変調器集積化半導体レーザを用いることができる。

*2 現在は、Si の MUX/DEMUX 用 IC が実用化されている。

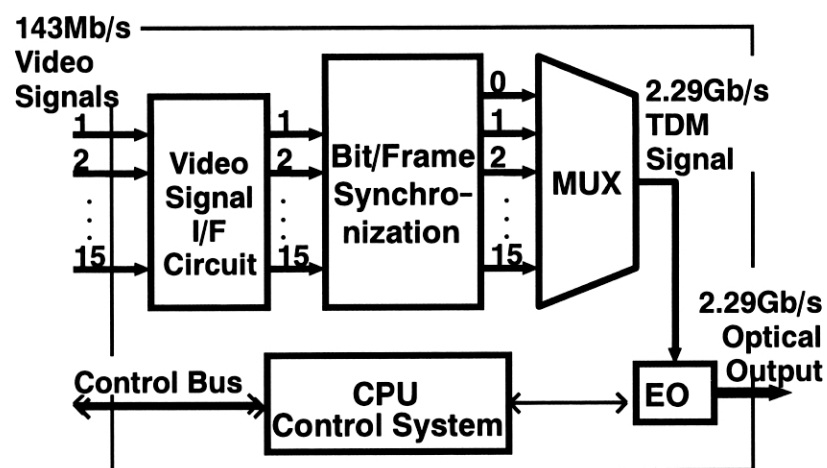


図 4. 7 SDTV 用 Tx カードのブロック図

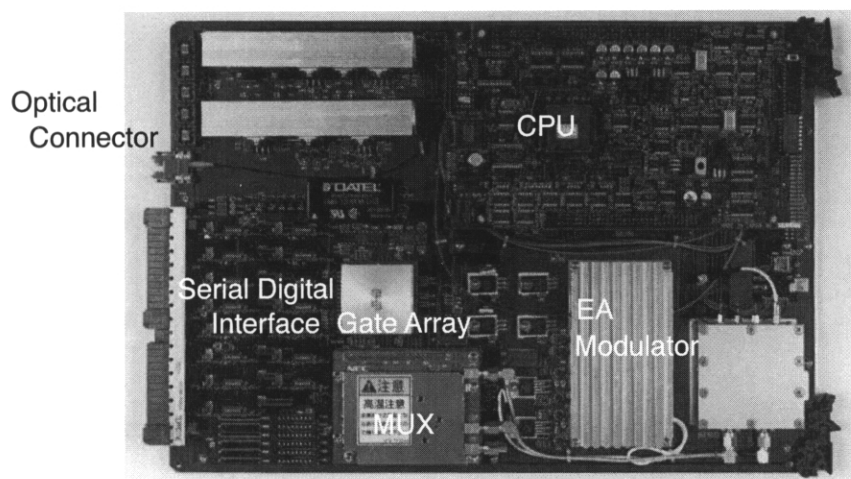


図 4. 8 SDTV 用 Tx カード

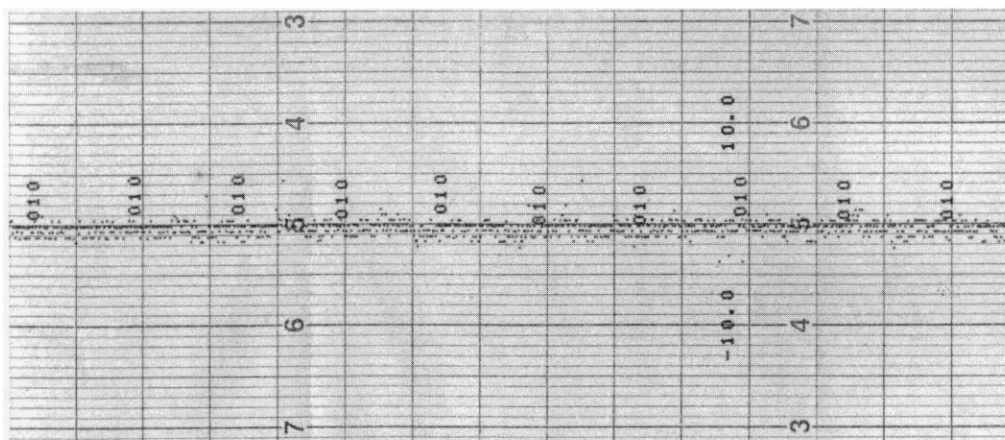


図 4. 9 波長安定度

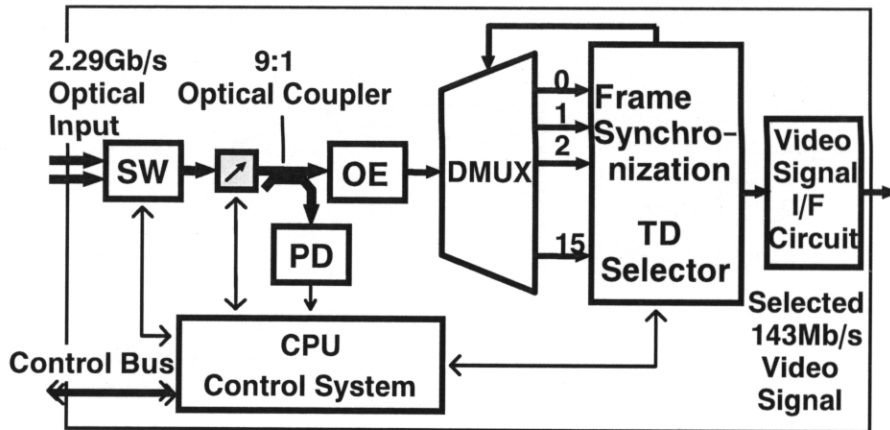


図 4. 1 0 SDTV 用 Rx カードのブロック図

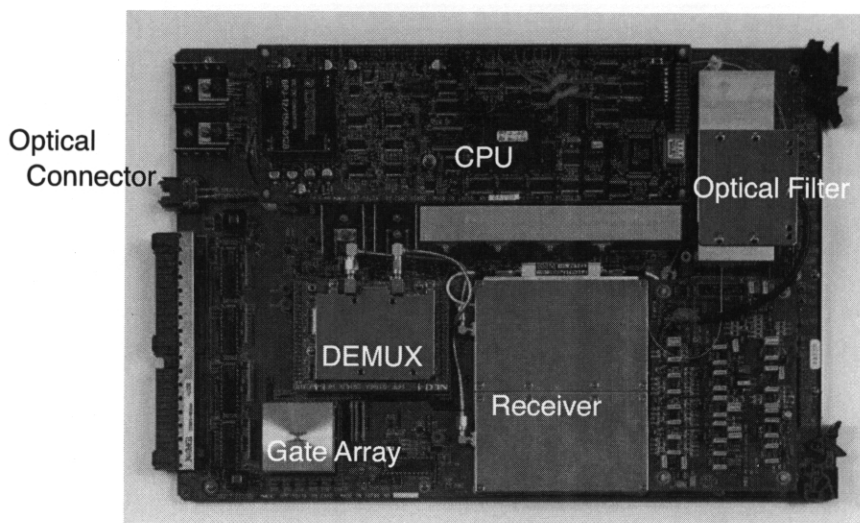
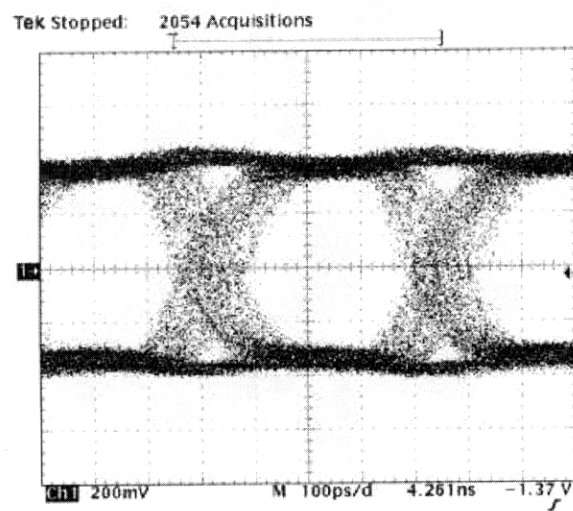


図 4. 1 1 SDTV 用 Rx カード

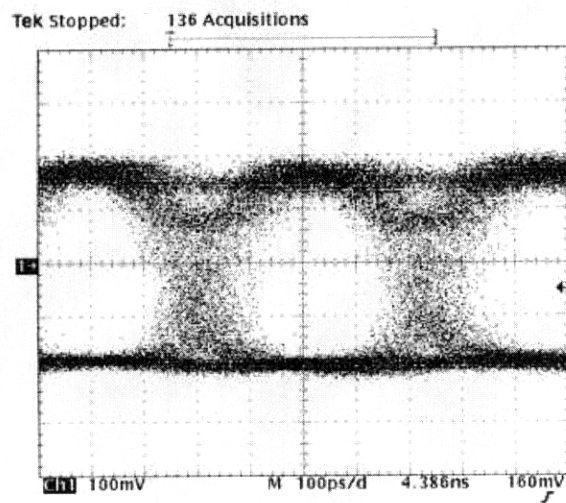
の帯域を持つ PIN ホトダイオードを用いて測定した。また、TD チャンネル選択出力波形は、2.29Gb/s の時分割多重信号を DEMUX IC とゲートアレイ（フレーム同期回路、デスクランブル回路、TD チャンネル選択回路）により選択した SDTV（NTSC）コンポジットシリアルデジタル信号（143Mb/s）波形である。いずれも、良好なアイ開口が得られている。

HDTV 用送信（Tx）カードのブロック図と写真をそれぞれ図 4. 1 3，1 4 に示す。HDTV シリアルデジタル信号（1.5Gb/s）は、専用の IC でクロック抽出され、波長多重用半導体レーザと EA 変調器により構成される E/O 変換器により光信号に変換される。SDTV の場合と異なり、時分割多重は、行わない。また、Tx カード上の CPU により、入力のデジタル信号の状態、半導体レーザの温度異常、出力レベル異常などが監視され、異常が発生するとアラームを出力する。波長多重用半導体レーザの出力光は、SDTV 用送信（Tx）カードの場合と同様に波長安定化される。

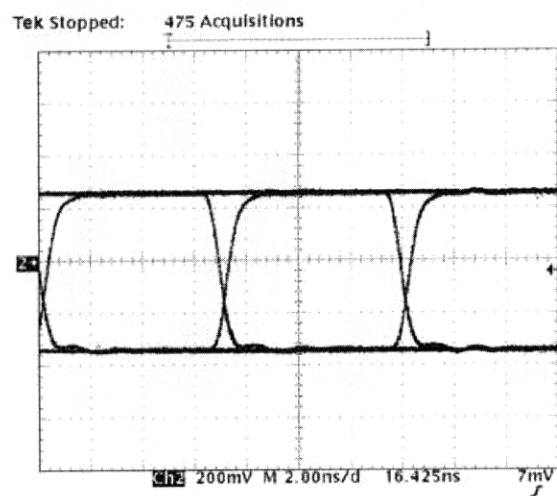
HDTV 用受信（Rx）カードのブロック図と写真をそれぞれ図 4. 1 5，1 6 に示す。Rx カードに入力された光信号は、光スイッチにより系選択され、可変波長フィルタで所要の波長選択が行なわれた後、APD を用いた O/E 変換器により電気信号に変換される。また、Rx カード上の CPU により、可変波長



(a) MUX 出力



(b) Tx カード光出力



(c) TD チャンネル選択出力

図 4. 1 2 出力波形 (SDTV)

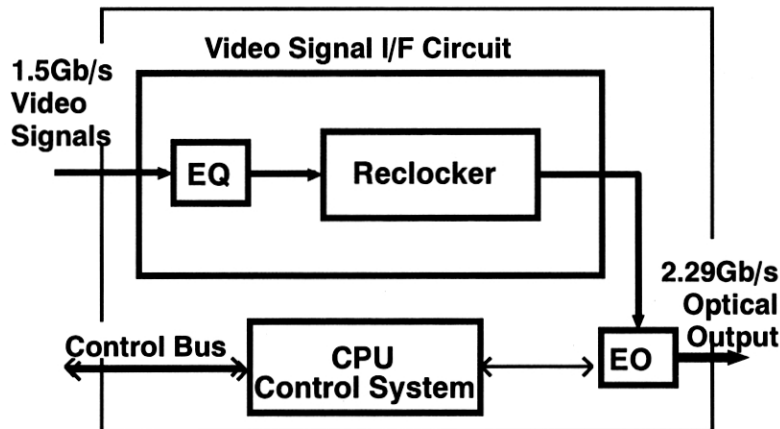


図 4. 1 3 HDTV 用 Tx カードのブロック図

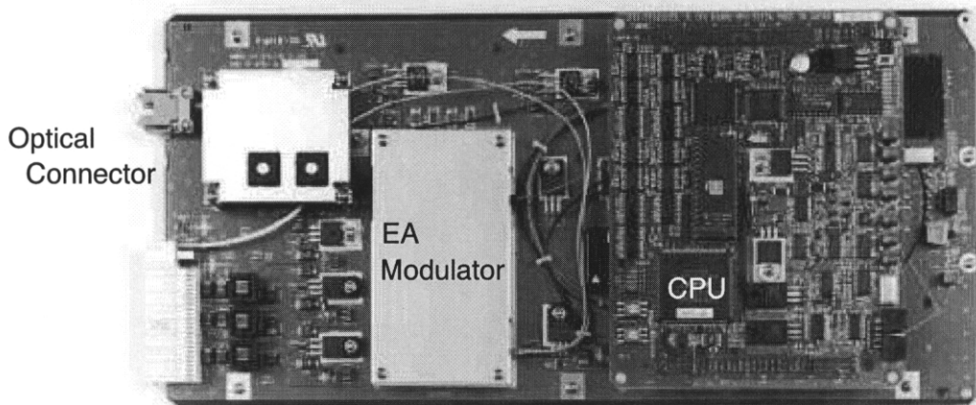


図 4. 1 4 HDTV 用 Tx カード

フィルタの制御が行なわれるとともに、入力光レベルの異常、波長フィルタの異常などが監視され、異常が発生するとアラームを出力する。

HDTV 用 Tx カード、Rx カードの大きさは、170×340mm である。

図 4. 1 7 (a), (b) に、それぞれ 1.5Gb/s の HDTV シリアルデジタル信号の Tx カード出力光波形と Rx カード出力（受信）受信波形を示す。いずれも、良好なアイ開口が得られている。

図 4. 1 8 に光アンプカードの写真を示す。光アンプカードには、入出力光レベルの異常、励起用半導体レーザの異常を監視し、アラームとして出力する機能がある。光アンプカードの大きさは、170×380mm である。

送信、光アンプ、スターカプラ、受信の各ユニットの写真を図 4. 1 9 に示す。送信、光アンプ、受信の各ユニットには、それぞれ 8 枚のカードが実装できる。

2.29Gb/s の疑似ランダムパターンを用いて、16 波長 (WD) チャンネルの伝送実験を行った。光ファイバアンプと WD チャンネルを選択するための可変波長光フィルタを使用した状態で符号誤り率 (Bit Error Rate) を測定した。図 4. 2 0 は、可変波長フィルタ透過後の光スペクトルである。隣接チャンネルの抑

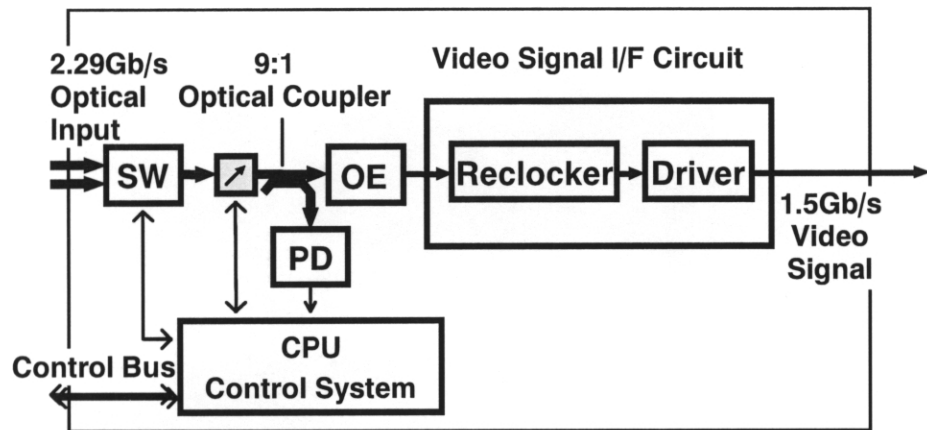


図4. 15 HDTV用Rxカードのブロック図

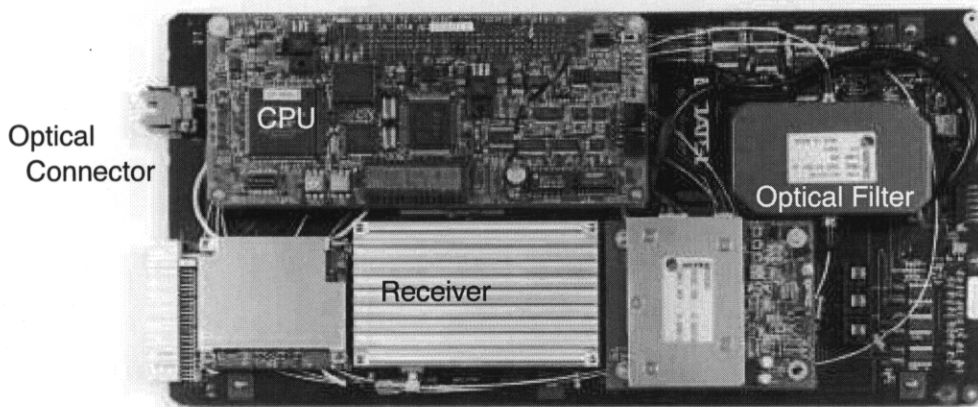


図4. 16 HDTV用Rxカード

圧比は、18dB 以上であった。図4. 21に符号誤り率の測定結果を示す。バック・ツー・バック（Back-to-Back）とWDチャンネル選択後の受信感度（符号誤り率 10^{-9} ）は、それぞれ、-32.0dBmと-31.8dBmであり、光ファイバアンプと波長分割多重によるパワーペナルティは、0.2dBと充分小さな値であった。

図4. 22に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の中心となる回線センタのオペレーション室の写真を示す。回線センタでの制御は、パーソナルコンピュータを用いた端末より行われる。従来、回線センタでは、ルーティングスイッチの制御を行うことにより、分配する映像信号を管理していたが、本システムでは、受信側に制御を任せ、回線センタでは、分配する映像信号の情報管理のみを行えば良い。図4. 23に、ラック室に置かれた送信ラック、受信ラックの写真を示す。手前側の2つのラックが（SDTV用）送信ラックで、送信ユニット、光アンプユニット、スターカブラが1系、2系の順番で実装されている。手前から3番目のラックが（SDTV用）受信ラックで、受信ユニットが実装されている。同軸ケーブルと比較して軽量、フレキシブルな光ファイバの特長を生かし、設備の小形化が実現されている。