

高密度波長多重を用いた光アクセス方式における光源の波長制御

山本 泉也*

(平成 17 年 1 月 16 日受理)

Wavelength Control of Optical Sources for Dense WDM Optical Access Network

Takaya YAMAMOTO*

This paper describes a high density wavelength division multiplexing (WDM) optical access network for broadband access networks. In the network, a wavelength is pre-assigned to each subscriber. Arrayed waveguide gratings (AWGs) are used at a central office and a remote node for wavelength multi/demultiplexers.

We introduce a method to tune the wavelengths of transmitters in both the central office and the subscriber premises to the center of each assigned transmission spectrum of an access network. Using this method, we confirm experimentally the controllability of the wavelengths on four laser diodes in the access network which was composed of two subscribers.

The 1×40 AWGs with 0.8 nm spacing were used. The experimental results indicate the controllability of the wavelengths of transmitters within the deviation of ± 0.25 nm from the center of the transmission spectrum of two AWGs. The wavelengths are controlled during the environmental temperature of the AWG in the remote node varies within the range of ± 20 . The temperature range of ± 20 is not enough for practical use. So as to minimize the temperature change of AWG, we propose a WDM access network which utilizes an athermal AWG in the remote node. The perfect temperature compensation of the athermal AWG is not necessarily required because the wavelength control system already exists. This results in the cost reduction of the athermal AWG.

We study the wavelength control using cost-effective one-board-computer instead of the measurement server.

Key words : optical access network, dense wavelength division multiplexing (DWDM), wavelength control

1. はじめに

アクセス方式とは、一般家庭や企業などのユーザ側と通信業者の局舎を結ぶシステムで、約 20km までの距離をカバーする伝送方式である。最近、このアクセス方式では、インターネットの急速な展開によってブロードバンド化が進んでいる。取り分け、電話線を用いた ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) の導入によって、下り回線についてみれば、1.5Mbps、8Mbps、12Mbps と高速化し、さらには VDSL (Very high-data-rate Digital Subscriber Line) によって 50Mbps のサービスが提供されている。しかし、これらの

* 理工学部メディアサイエンス学科

ADSL や VDSL では電話局から距離が遠くなるにつれて急激に信号が弱くなり 7km を超える距離では殆ど通信はできない。50Mbps のような高速になると距離は 1~2km に限られる。

このような状況の中で、広帯域性と伝送距離の問題を解決できる技術として光ファイバを用いた光アクセス方式が徐々に導入されようとしている¹⁾。光ファイバを電話局から加入者宅まで敷設したアクセス方式を通常 FTTH (Fiber To The Home) サービスと呼ぶ。

光アクセスネットワークのトポロジーを図 1.1 に示した。光アクセス方式はシングルスター(SS)構成とダブルスター構成に分類される。SS 構成は局と加入者宅の間に 1 本ずつ光ファイバで結ばれる構成であり、ダブルスター構成は局と加入者宅の光ファイバや装置の一部を複数の加入者が共用する構成である。

ダブルスター構成は、さらに、アクティブ・ダブル・スター (ADS) 形とパッシブ・ダブル・スター (PDS) 形に分類される。ADS は局と加入者宅の間のノードに多重変換回路や電気光変換回路など能動部品からなる電子装置を有する構成であり、PDS は光学的受動部品(例えば、スプリッタや合分波器) からなる装置を局と加入者宅の間のノードに有する構成である。PDS の構成を図 1.2 に示す。スプリッタを用いた PDS の場合、通信相手を識別する手段として、タイムスロット

位置で制御する TDMA (Time Division Multiple Access) 方式と波長で制御する WDMA (Wavelength Division Multiple Access) 方式がある。波長合分波器を用いた PDS では、WDMA になる。光学的受動部品で構成されたネットワークを PON (Passive Optical Network) ともいう。

大雑把な経済比較をすれば、シングルスター方式とダブルスター方式では、共用部分のあるダブルスター方式の方が経済的であり、ADS と PDS では PDS の方が経済的である。PDS は光学的にトランスペアレントな伝送路となるため、伝送速度は必要に応じて対応できるなど、柔軟性に富んだネットワークを構成できる。

ブロードバンド光アクセス方式として、現在、パッシブ・ダブル・スター (PDS) 方式、アクティブ・ダ

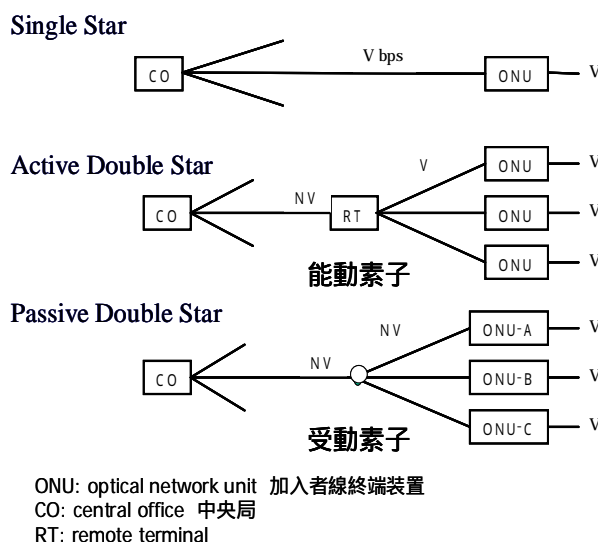


図 1.1 光アクセスネットワークのトポロジー

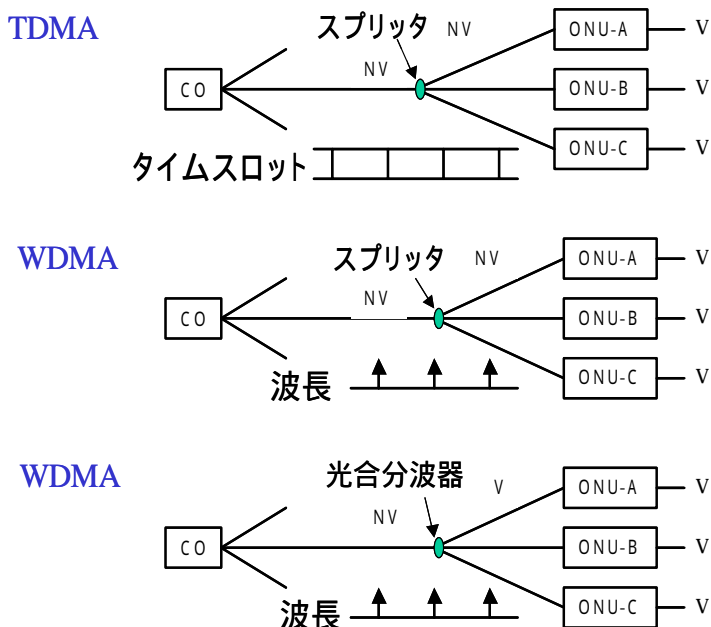


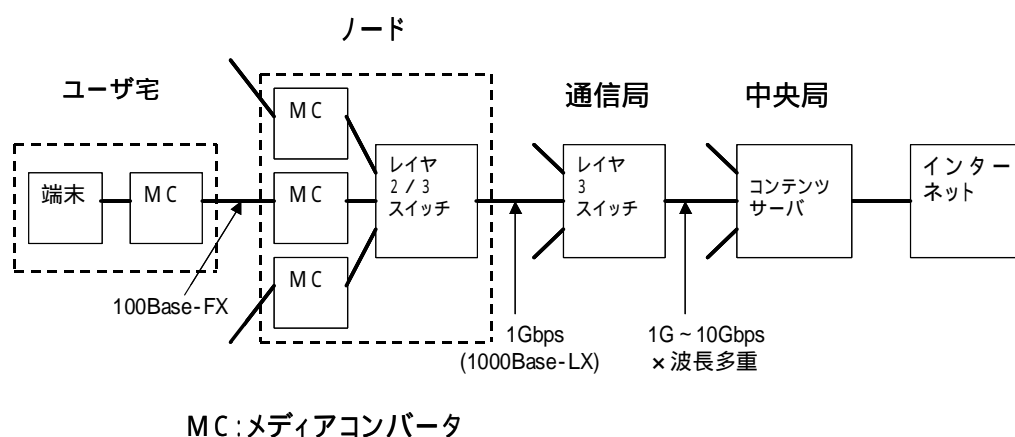
図 1.2 PDS(pass double star)の構成

ブルスター（ADS）方式、シングルスター（SS）方式が利用されている。

PDS方式にはBPON（Broadband Passive Optical Network）²⁾やギガビットイーサネットPON（GPON）がある³⁾。これらはいずれも図 1.2 のTDMAを利用したものである。BPONは53バイトのATM(Asynchronous Transfer Mode)セルをベースにしたフレーム形式を採用している。伝送速度は 上り 150Mbps /下り 600Mbps、 上り下りとも 150Mbps、 上り下りともに 600Mbpsの 3 種類がある。上り、下りには、それぞれ 1.5 μmと 1.3 μmの波長多重を利用している。 は、PDSで 64 分岐し、動的な帯域割り当てを行って最大 100Mbpsのアクセスを実現する。GPONはMACフレームをそのまま伝送し、1Gbpsの帯域を複数（16 分岐）のユーザで利用しようとするもの。BPONと同様に上り 1.3 μm、下り 1.5 μmの波長多重を用いて 1 条双方向の伝送を行う。伝送距離は 10kmから 20kmである。

PDS (PON) では、SS 方式にくらべて加入者宅からの光ファイバを途中でまとめて収容局につなぐため、光ファイバを節約できるコストメリットは大きい。しかし、TDMA を利用した PDS を実現するにはSS 方式にない複雑なしくみが必要になる。例えば、各加入者宅からの上り信号がスプリッターのところで衝突しないように各加入者はデータを送信するしくみや光ファイバを流れるデータから自分あてのものを識別して受信するしくみ、さらに収容局からのデータが全ての加入者に送られることに対する暗号機能などである。そして、これらの方式では、複数のユーザが帯域を共有するため、伝送速度が 600Mbps や 1Gbps であっても、利用できる帯域はそれより少なくなる。

光アクセス方式の立ち上げの契機を作ったのが有線ブロードバンドネットワーク（株）の子会社ユーズコミュニケーションズのFTTH方式である⁴⁾。その方式を図 1.3 に示す。これはADS方式であり、1 加入者あたり 100Mbpsのサービスを提供できる。リモートノードにはLANスイッチが置かれ、そこで各加入者へ分岐する。分岐された信号はメディアコンバータで光信号に変換されて加入者宅まで送られる。LANスイッチや加入者数だけメディアコンバータを収容するには小屋が必要であり、その小屋を設置する場所も確保しなければならない。さらにはそのメンテナンスも問題になる。



MC :メディアコンバータ
図 1.3 ユーズコミュニケーションズの FTTH

NTT も有線ブロードネットワークに対抗するために、局舎内に LAN スイッチを置いた方式をサービスとして提供している（B フレッツベーシックタイプ）。この場合のトポロジーはSS 方式になる。

インターネット等、コンピュータ通信の発展によって画像情報を含む広帯域サービスの需要が一般家庭にも及びつつある。ましてや企業レベルでは伝送容量の大きなアクセス方式が必要になってきた。本研究では、100Mbps を超え 1Gbps の伝送速度も視野に入れた光アクセス方式について検討を行う。この方式では、各加

入者に波長を割り当て、加入者宅の近くに合分波器を置いたリモート・ノードまで、1本のファイバ上を波長多重で送る波長多重方式を採用する。この方式は物理的にはPDS (PON)方式であり、かつ回線(波長)としてみればSS方式になっており、両者の長所を活用することができる。つまり、リモートノードまでファイバーを共有してシステムの経済化をはかり、BPONやGPONで問題となった複雑なしくみを加入者に波長を割り当てることで回避できる。そして、リモートノードには受動光学部品である合分波器を設置するだけでよく、ユーズコミュニケーションズ方式のようなリモートノードの場所的な制約もなくなる。ネットワーク規模の拡大の容易さや柔軟性などの観点からも、高密度波長多重方式は極めて有望な広帯域アクセス方式であると考えられる。波長多重方式を用いた光アクセス方式の基本構成を図1.4に示した。

検討を行った方式の波長多重の波長間隔は0.8nmである。高密度波長多重方式を光アクセス方式に導入する際の大きな問題は光源となる半導体レーザーの発振波長を合分波器を含むネットワーク自身の波長特性の変動に合わせて如何に制御するかである。半導体レーザーの発振波長は10の温度変化で1nm変化する。局側の光信号を各加入者に分したり、各加入者からの上り光信号を合波する合分波器は柱上やとう道・管路など劣悪な温度環境に置かれ、50の温度変化で0.5nm波長特性が変化する。そのため、例えば、図1.5(a)

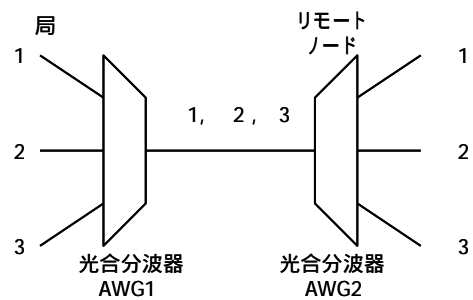


図1.4 波長多重を用いた光アクセス方式

に示すように、最初は、局側とリモート・ノードの合分波器 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) の波長特性が一致していて、光源の波長はそれらの重なった波長スペクトルの中心波長になるように制御されていたものとする。光合分波器は受動デバイスで電源は不要であり、システムの経済化をはかるため、リモートノードのAWGはメンテナンスフリーを前提とし、その温度制御を想定していない。環境温度が変化して同図(b)のようにリモート・ノードの合分波器の波長特性がシフトすれば、局とリモート・ノードの2つの合分波器の総合的な透過特性は同図(c)のようになって、もはや初期に設定された光源の波長では通信が遮断されることになる。通信を行うためには、(c)図のように光源の波長を総合透過特性の中心波長までシフトさせなければならない。局や加入者宅に置かれた光源の発振波長はただ単に安定化されるだけでなく、ネットワークの波長特性の変動にも追従して制御されなければならない。

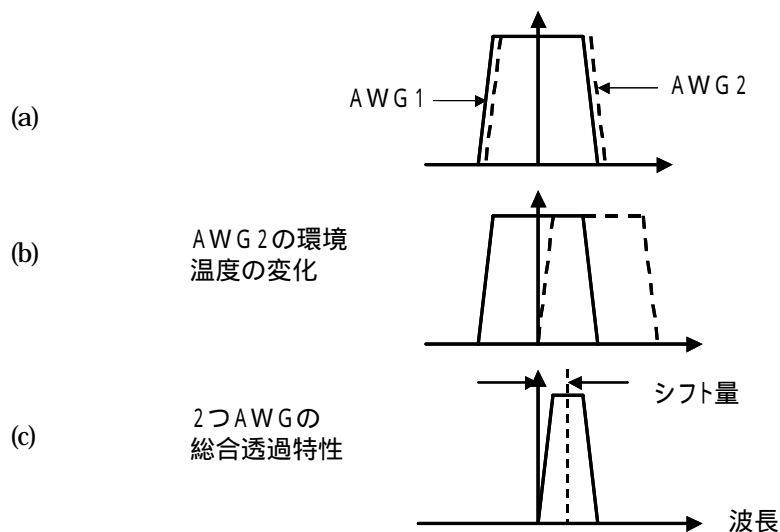


図1.5 AWG2の環境温度変化と2つのAWGの総合透過特性

本報告では、高密度波長多重方式を利用した光アクセス方式における波長制御に関する研究成果を報告する5.6)。

報告の構成は、第2章で波長制御方法と波長制御アルゴリズムを紹介し、第3章ではIP網によるアクセスネットワークを構築して、そのネットワーク上で波長制御の基本動作を実験的に検証するとともにリモートノードの環境温度を変化させたときの光源の波長制御性を明らかにし、第4章でアサーマルAWG導入の提案、制御性の限界と実際の対応およびone-board-computerを用いたネットワーク上での温度制御の経済化について述べ、最後に第5章で結論をまとめる。

2. 波長制御方法と波長制御アルゴリズム

2.1 波長制御方法

図2.1に1加入者のみを対象にした波長制御を説明するためのシステム構成図を示す。AWG2はリモートノードに置かれている。制御方法は、局とリモートノードに置かれた2つのAWGで決まる総合透過スペクトルの中心波長に、局と加入者宅の光源の波長を局側にある制御系で制御しようとするものである。この波長制御方法では、総合透過スペクトルをいわば波長基準器として利用している。

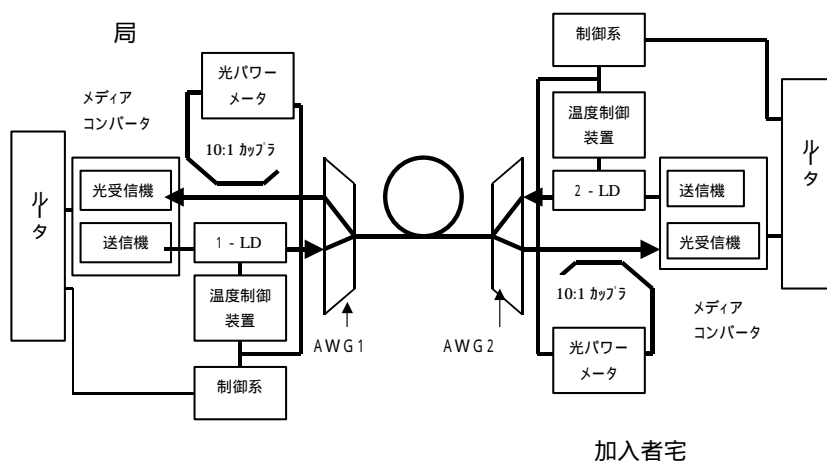


図2.1 波長制御法を説明するためのシステム構成図

図2.1のシステム構成図を用いて波長制御法を説明する。局側の光源の波長(1)を制御する場合、まず、光源(1-LD)の動作温度を温度制御装置を用いて変化させることにより発振波長を変えて、システムの総合透過スペクトルを加入者宅の光パワーメータで測定する。その際、情報本線に影響を与えないよう、10:1カプラーで受信光の10分の1の光パワーをモニターする。そのデータにもとづいて、局側で、透過スペクトルの中心動作温度を求め、その温度で局側の光源を動作させる。加入者宅の光源(2-LD)については、局側からコマンドにより、加入者宅の光源(2-LD)の動作温度を変化させ、局側の光パワーメータで透過特性をモニターする。測定した透過スペクトルから中心動作温度を求め、その温度で加入者宅光源を動作させる。この間、光源は定出力動作するように制御されている。制御信号は情報本線のネットワークを介して伝送される。

加入者数が複数である場合、順次、各加入者に対向する局側の光源と加入者側の光源との間で波長制御が行われる。

2.2 波長制御アルゴリズム

(1) アルゴリズム

波長制御アルゴリズムは、次の通りである。

- 1) ステップ 1: 制御すべき光源の動作温度が、測定した透過スペクトルの正の勾配領域にあるか負の勾配領域にあるかを判断するため、光源の動作温度を 0.5 だけ上げて、その出力変化 P を見る。その値が正であれば正の勾配領域にあり、負であれば負の勾配領域にあることになる(図 2.2)。
- 2) ステップ 2: 正の勾配領域にあれば、そのまま 0.5 ずつ光源の動作温度を上昇させ、 P が初めて負になるまで続け、その 1 つ手前の動作温度を透過スペクトルの最大値 P_{max} の動作温度 T_{max} とする(図 2.2)。

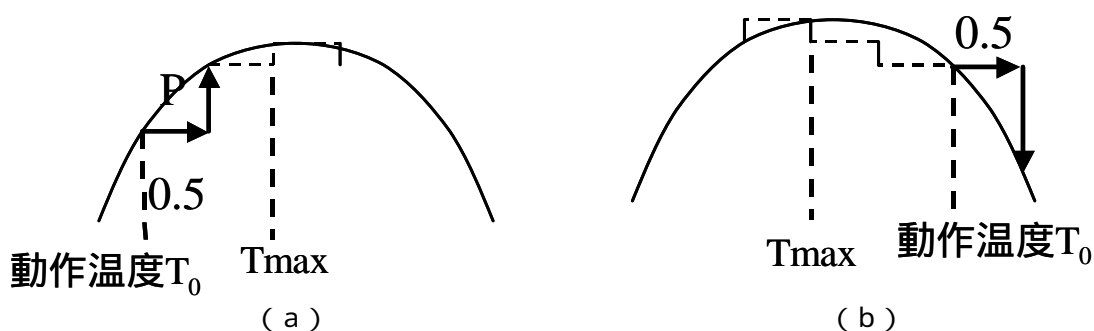


図 2.2 透過スペクトルの正の勾配領域(a)と負の勾配領域(b)

- 3) ステップ 3: 光源の動作温度を $T_{max}-1.5$ から $T_{max}+1.5$ まで 0.5 間隔で変化させて透過スペクトルを測定する(図 2.3)。

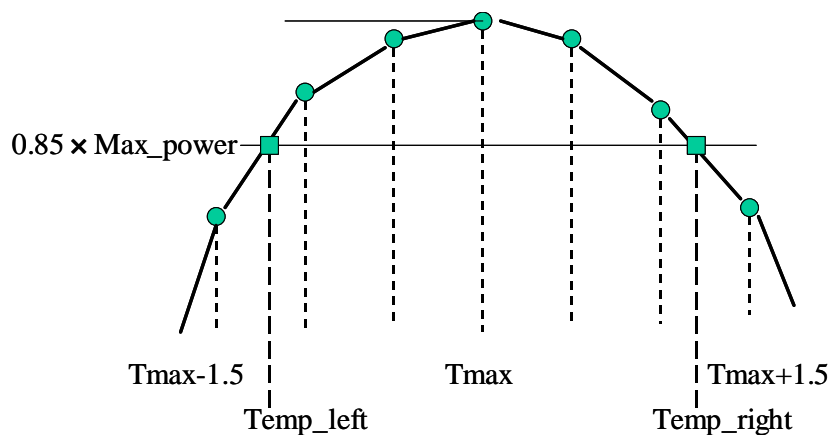


図 2.3 Temp_left と Temp_right

- 4) ステップ 4: 測定したスペクトルから $0.85 \times \text{Max_power}$ に対応する動作温度 Temp_left と Temp_right を求める(図 2.3)。
- 5) ステップ 5: 求める制御動作温度 Temp_center は

$$\text{Temp_center} = (\text{Temp_left} + \text{Temp_right}) / 2 \quad (2.1)$$

となる。

(2) Temp_center の計算

図 2.4 に書かれたパラメータを用いて Temp_center を求める。

半導体レーザの動作温度を Temp_s から Temp_step 刻みで Temp_e まで変える。

$$N_step = \frac{Temp_e - Temp_s}{Temp_step} \quad (2.2)$$

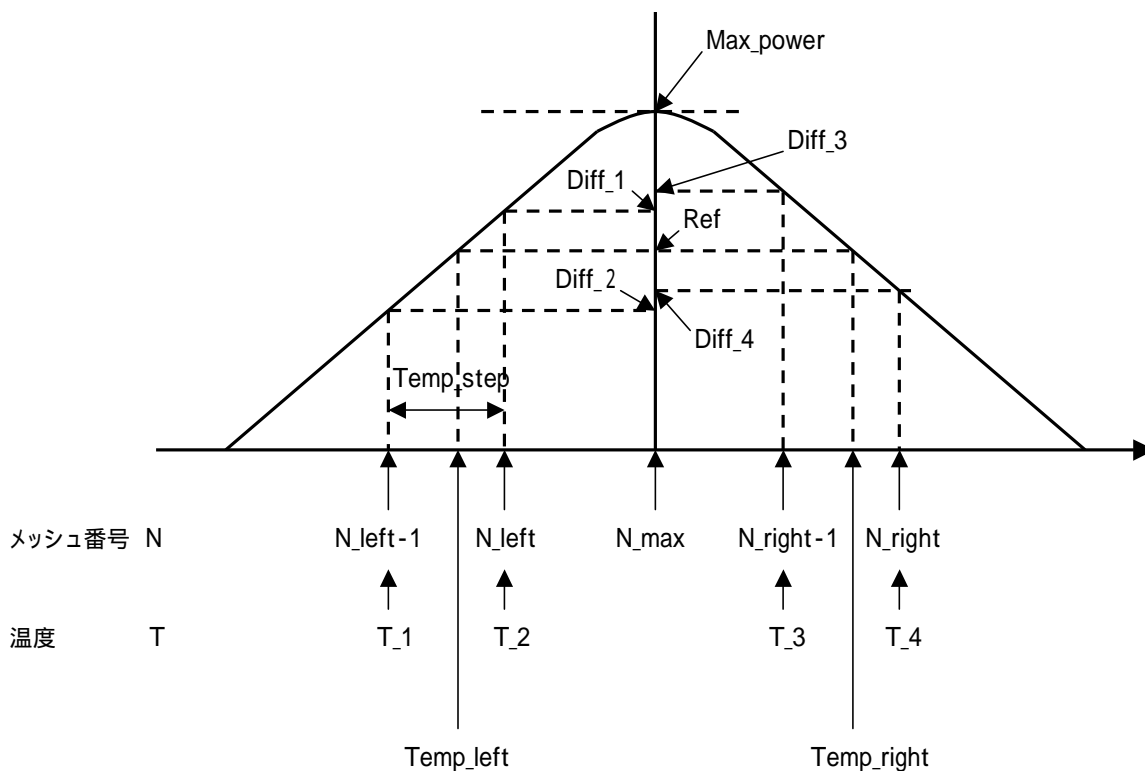


図 2.4 Temp_center の計算に用いる記号

より求まる N_step を用いて、Temp_s を測定順番の 1 番とすれば Temp_e は(N_step+1)番になる。反射スペクトルのピーク値 Max_power を与える番号を N_max とする。Max_power の、例えば、85%のレベルを Ref として、そのレベルと反射スペクトルが交わる温度 Temp_left と Temp_right を求め、これらから、反射スペクトルの中心波長 (温度) Temp_center は

$$Temp_center = \frac{Temp_right + Temp_left}{2} \quad (2.3)$$

より求まる。

ここで、まず、Temp_left を求める。測定順番の 1 番から (N_step+1) 番まで、それぞれに対応する測定レベルがメモリ配列に格納されている。1 番目のレベルから調べて、初めて Ref と等しくなるか、大きくなる番号を N_left とし、そのレベルを Diff_1 とする。その一つ手前の番号 (N_left-1) 番のレベルを Diff_2 とすれば、Ref はその中間にあり、次のような簡単な比例関係式が成り立つ。

$$(Diff_1 - Diff_2) : Temp_step = (Diff_1 - Ref) : (T_2 - Temp_left) \quad (2.4)$$

ただし、 T_2 は N_left に対応する温度で次式により求まる。

$$T_2 = Temp_s + (N_left - 1) \cdot Temp_step \quad (2.5)$$

これらより

$$Temp_left = T_2 - \frac{Temp_step \times (Diff_1 - Ref)}{Diff_1 - Diff_2} \quad (2.6)$$

同様に、 $Temp_right$ を求める。

$$(Diff_3 - Diff_4) : Temp_step = (Diff_3 - Ref) : (Temp_right - T_3) \quad (2.7)$$

$$T_3 = Temp_s + (N_right - 2) \cdot Temp_step \quad (2.8)$$

$$Temp_right = T_3 + \frac{Temp_step \times (Diff_3 - Ref)}{Diff_3 - Diff_4} \quad (2.9)$$

これらから式(2.6)(2.9)を式(2.3)に代入すれば反射スペクトルの中心波長(温度)が求まる。

3. 波長制御実験とその結果

3.4 実験系

本実験では、加入者 A と加入者 B の 2 加入者で構成されるアクセス網において、加入者の 2 つの光源と、加入者に対向して局側にある 2 つの光源、あわせて 4 つの光源の波長制御を行う。図 3.1 に実験系の構成を示す。光合分波器 AWG1 は局に AWG2 はリモートノードにある。2 つの光合分波器は長さ 20km の単一モードファイバーで接続されている。光ファイバーの損失は 0.2dB/km である。

アクセス網はイーサネット構成されている。局側では、ルータ (Cisco3620) の 2 つのポートからの 100BASE-T の出力をメディアコンバータ (日立電線製 HBN-380FSC) で光化した。加入者側にも光 - 電気変換するためのメディアコンバーターが置かれている。つまり、光ファイバーも含めてアクセス網は 100BASE-T の LAN で構成されている。局・加入者への波長割り当ては 0.8nm 間隔の波長グリッドに基づいて割り当てを行った。加入者 A については、下り (局 加入者) 回線 (光送信機 TX-AC) には 1558.1nm、上り (加入者 局) 回線 (光送信機 TX-AS) には 1554.9nm が、加入者 B については、下り回線 (光送信機 TX-BC) には 1557.3nm、上り回線 (光送信機 TX-BS) には 1555.7nm を、それぞれ割り当てた。光源として分布帰還型半導体レーザを用いている。

光源となる半導体レーザは動作温度が 1 上昇すると、その発振波長が 0.1nm 長波長側へシフトする。半導体レーザ発振波長の制御は温度制御装置を用いて半導体レーザの動作温度の制御によって行われる。

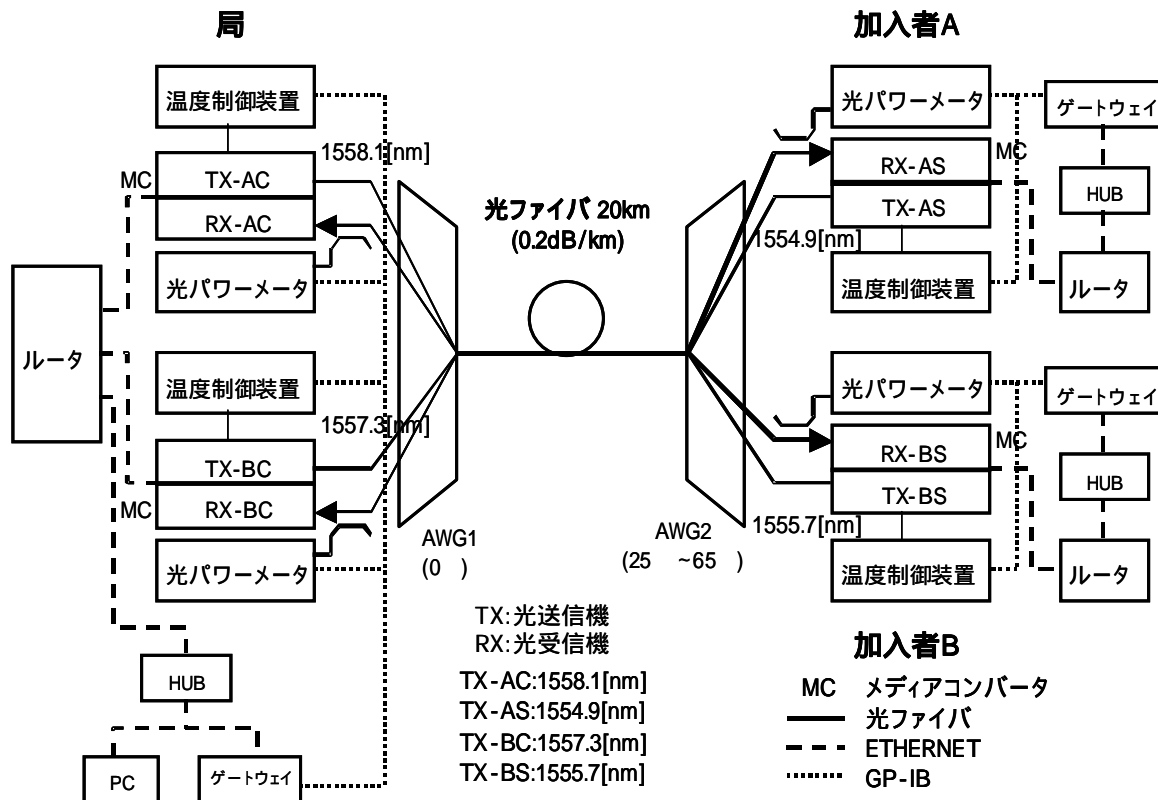


図 3.1 4光源の波長制御実験系

局と各加入者宅には計測サーバであるゲートウェイ (Agilent 製 E2050A) が置かれ、そのもとに光源の動作温度を制御する温度制御装置と光パワーメーターが GP-IB インタフェースで接続されている。このゲートウェイによりイーサネットと GP-IB の変換が行われる。局側にある PC(パソコン)によって、アクセス網 (LAN) 経由で局や加入者宅のゲートウェイに接続された光パワーメーターから光出力を取得し、取得したデータに基づき温度制御装置によって光源の動作温度を制御する。このような制御信号は情報本線であるアクセス網 (LAN) を使って伝送される。

3.4 AWG

図 3.2 に AWG (arrayed waveguide grating) 1 (局側) の透過スペクトルを、図 3.3 に AWG2 (リモートノード) の透過スペクトルを示す。

実験に用いた AWG は波長間隔 0.8nm で 40 分岐のものである。挿入損失は 7 ~ 8dB。分岐された 40 個のポートを短波長側から長波長側へ Port1、Port2、・・・、Port40 と呼び、実験では Port30 (1554.9nm)、Port31 (1555.7nm)、Port33 (1557.3nm)、Port34 (1558.1nm) のポートが用いられた。

AWG1 と AWG2 の波長特性にオフセットがあり、それを補正するために AWG1 の環境温度を 0、AWG2 の環境温度を 25 にしている。

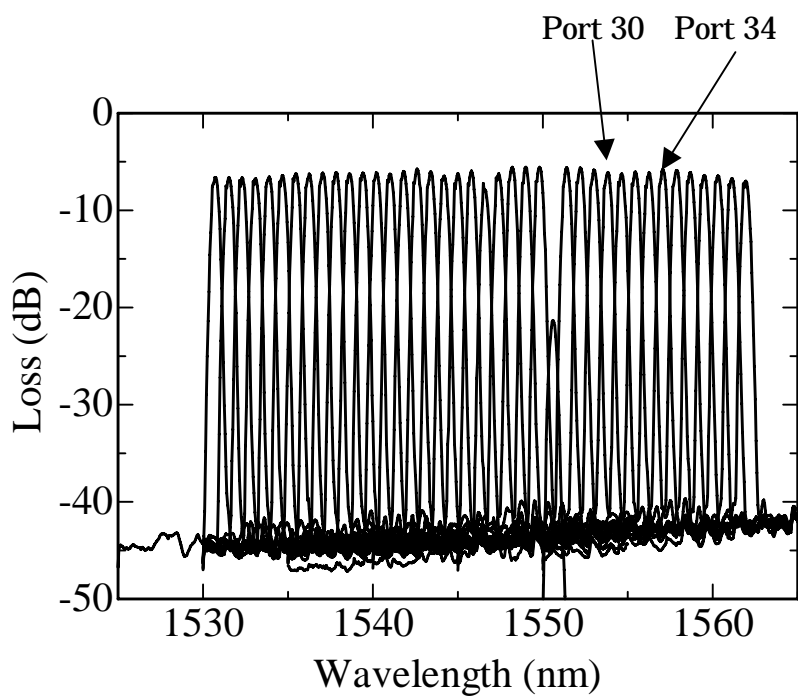


図 3.2 AWG1(局側)の透過スペクトル

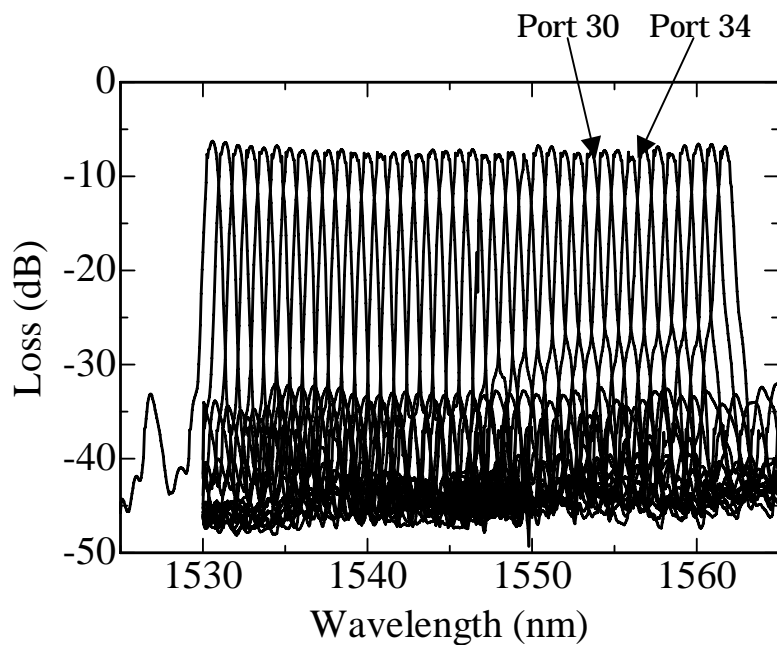


図 3.3 AWG2(リモートノード)の透過スペクトル

3.3 実験方法

加入者 A の光源 (1554.9nm) と対向する局側の光源 (1558.1nm) および加入者 B の光源 (1555.7nm) と対向する局側の光源 (1557.3nm) の 4 つの光源について、表 3.1 に示す初期温度を設定し、6 つの条件の

もとで4波長同時に波長制御できるかどうか実験的に検証した。表3.1の2段目には各ポートの中心波長が、3段目の光源動作温度は半導体レーザがポートの中心波長を発振させるための動作温度を表す。例えば、条件1は、4つの光源全ての動作温度を1.5だけ上げた温度を初期動作温度として選んでいる。半導体レーザの

表3.1 波長制御実験の初期条件

ポート	Port30	Port31	Port33	Port34
中心波長	1554.9nm	1555.7nm	1557.3nm	1558.1nm
光源動作温度	18.7[]	4.6[]	17.2[]	10.6[]
条件1	20.2(+1.5)[]	6.1(+1.5)[]	18.7(+1.5)[]	12.1(+1.5)[]
条件2	17.2(-1.5)[]	3.1(-2.0)[]	15.7(-1.5)[]	9.1(-1.5)[]
条件3	20.2(+1.5)[]	3.1(-2.0)[]	18.7(+1.5)[]	9.1(-1.5)[]
条件4	20.2(+1.5)[]	4.6(0.0)[]	19.2(+2.0)[]	8.6(-2.0)[]
条件5	20.2(+1.5)[]	4.6(0.0)[]	19.7(+2.5)[]	8.1(-2.5)[]
条件6	20.2(+1.5)[]	4.6(0.0)[]	20.2(+3.0)[]	7.6(-3.0)[]

動作温度を1上昇させると発振波長が0.1nm長波長側へシフトするから、条件1の場合、4つの光源の初期値がすべて0.15nm長波長側にシフトした状態で波長制御実験を行うことになる。条件2では、4つの光源の動作温度をすべて1.5~2.0下げている、発振波長は0.15nm~0.2nm短波長側へシフトした状態を初期条件としている。条件3はPort30に対応する光源の波長1554.9nmとPort31に対応する光源の波長1555.7nmがお互いにお互いの接近するように1554.9nmを+0.15nm、1555.7nmを-0.2nmシフトさせている。同様に、port33に対応する光源の波長1557.3nmとPort34に対応する光源の波長1558.1nmが接近するよう、1557.3nmを+0.15nm、1558.1nmを-0.15nmシフトさせている。条件4~6では、1557.3nm(Port33)と1558.1nm(Port34)をさらに、0.2nm、0.25nm、0.3nmずつ、お互いに接近させている。図3.4は条件4~6を図示したものである。

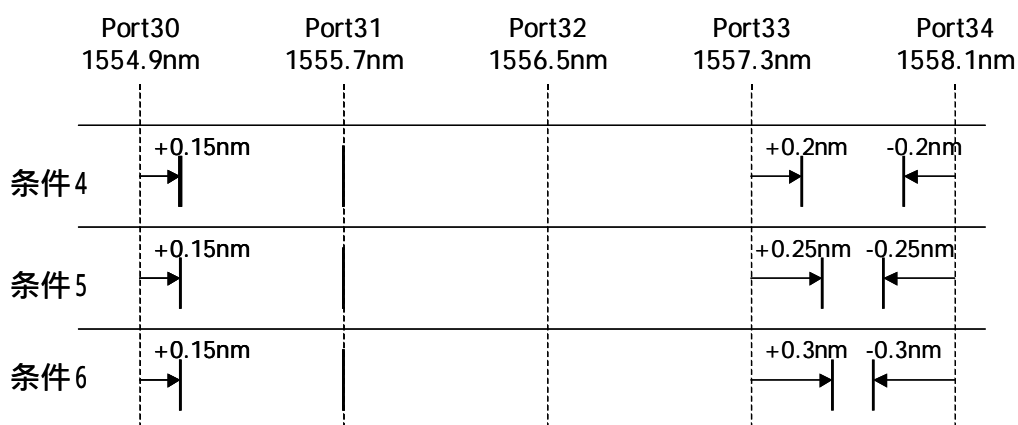


図3.4 表3.1の条件4~6の初期条件

このように発振波長を接近させていくと、AWG透過プロファイルの中心波長からずれることによる光強度の減衰と隣接チャネルへのクロストークの発生により遂に波長制御不能に陥る。これによって波長制御の限界

を知ることができる。制御プログラムは2.2項の制御アルゴリズムに従い、HP-BASICで作成した。ポートごとに順次、制御プログラムが実行される。

3.4 実験結果

3.4.1 4光源の波長制御実験

図3.1において、1) Port30に対応する加入者Aの光送信機TX-ASの光源(1554.9nm) 2) Port31に対応する加入者Bの光送信機TX-BSの光源(1555.7nm) 3) Port33に対応する局内の光送信機TX-BCの光源(1557.3nm) 4) Port34に対応する局内の光送信機TX-ACの光源(1558.1nm)の波長制御を制御プログラムにより順次行った。それらの結果を以下に示す。各光源は一定出力のもとで動作させている。

(1) Port30に対応する加入者Aの光送信機TX-ASの光源(1554.9nm)の波長制御

制御結果を図3.5に示す。

図3.5の横軸は加入者Aの光送信機TX-ASの光源の動作温度を示す。縦軸は加入者Aの光送信機TX-ASの光源の動作温度を変えたとき、局側の受信機RX-ACへの光受信レベルを10:1光カップラーでモニタした光パワーメータの出力を示す。図中、
 の矢印が示す20.2は表3.1の条件1、3、4、5の光源初期動作温度20.2を表す。の矢印が示す17.2は表3.1の条件2の光源初期動作温度17.2を表す。

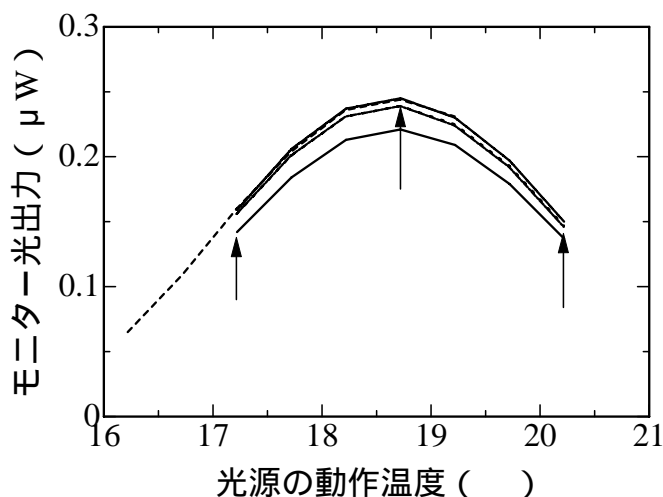


図3.5 加入者Aの光送信機TX-ASの光源(1554.9nm)の波長制御性

実線の曲線は、2.2波長制御アルゴリズムの3)の方法に従って実測した、条件1の場合の総合透過スペクトルを示す。総合透過スペクトルとはAWG1とAWG2を合わせた透過スペクトルを意味する。この透過スペクトルから求めた制御温度Temp_center=18.7が曲線の中央の矢印で示されている。これはPort30の中心波長である。光源の初期動作温度が20.2(波長に換算して1554.9+0.15nm)であったものが制御の結果、光源の動作温度が18.7(波長に換算して1554.9nm)になったことを表す。

破線、点線、一点鎖線、二点鎖線の曲線は、それぞれ条件2~5における加入者Aの光送信機TX-ASの光源の波長制御性を示しており、いずれも光源の初期動作温度の如何にかかわらず、制御の結果、Port30の総合透過スペクトルの中心波長に相当する光源の動作温度18.7(1554.9nm)に制御されている。

(2) Port31に対応する加入者Bの光送信機TX-BSの光源(1555.7nm)の波長制御

前項(1)と同様に、Port31に対応する加入者Bの光送信機TX-BSの光源(1555.7nm)の波長制御の実験結果を図3.6に示す。光源の初期動作温度は条件1(図中)では、6.1、条件2,3(図中)では3.1、条件4,5(図中)では4.6である。

制御の結果、いずれもPort31の総合透過スペクトルの中心波長(1555.7nm)に対応する動作温度4.6に制御される。

(3) Port33に対応するの局内光送信機TX-BCの光源(1557.3nm)の波長制御

Port33 に対応するの局内光送信機 TX-BC の光源 (1557.3nm) の波長制御の実験結果を図 3.7 に示す。光源の初期動作温度は、条件 1、3 (図中 、) では 18.7 、条件 2 (図中) では 15.7 、条件 4 () では 19.2 、条件 5 () では 20.2 である。いずれも、制御の結果、Port33 の総合透過スペクトルの中心波長 (1557.3nm) に対応する動作温度 17.2 に制御された。

(4) Port34 に対応するの局内光送信機 TX-AC の光源 (1558.1nm) の波長制御

Port34 に対応するの局内光送信機 TX-AC の光源 (1558.1nm) の波長制御の実験結果を図 3.8 に示す。光源の初期動作温度は条件 1 () では 12.1 、条件 2,3 (、) では 9.1 、条件 4 () では 8.6 、条件 5 () では 8.1 である。いずれも、制御の結果、Port34 の総合透過スペクトルの中心波長 (1558.1nm) に対応する光源の動作温度 10.6 に制御された。

(5) 条件 6 の制御について

条件 6 の場合、制御不能となった。原因はネットワーク上で正常な通信ができなくなったことによる。これは、Port33 に対応する局内光送信機 TX-BC の光源の波長と Port34 に対応するの局内光送信機 TX-AC の光源の波長が接近してクロストークが発生したものと考えられる。

(6) まとめ

4 光源の波長制御実験の結果、光源の動作温度で ± 2.5 、波長に換算して $\pm 0.25\text{nm}$ の範囲で制御可能であることが明らかにされた。

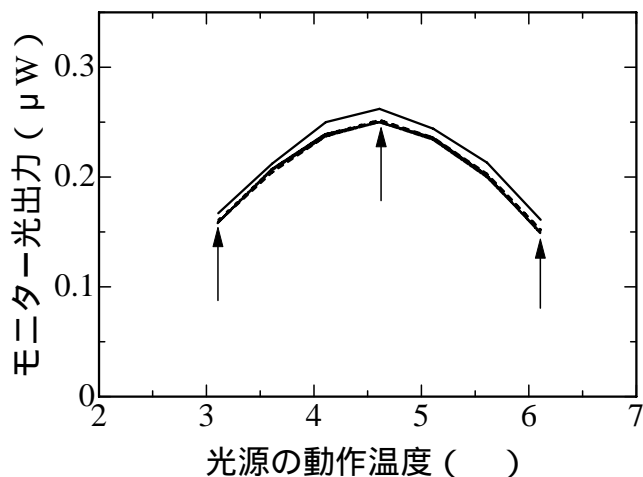


図 3.6 加入者 B の光送信機 TX-BS の光源 (1555.7nm) の波長制御性

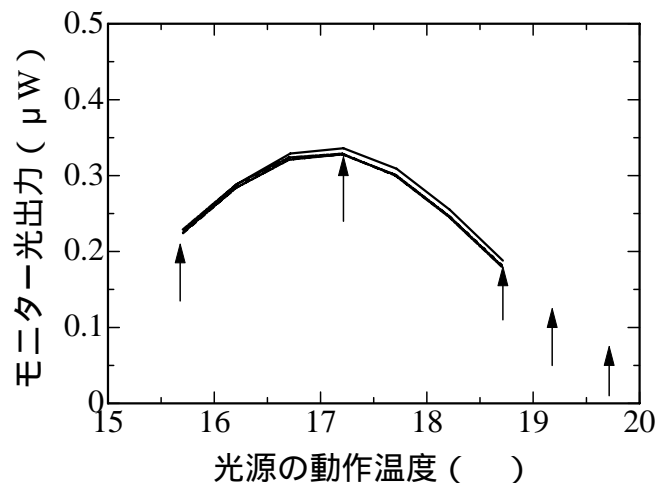


図 3.7 局内光送信機 TX-BC の光源 (1557.3nm) の波長制御性

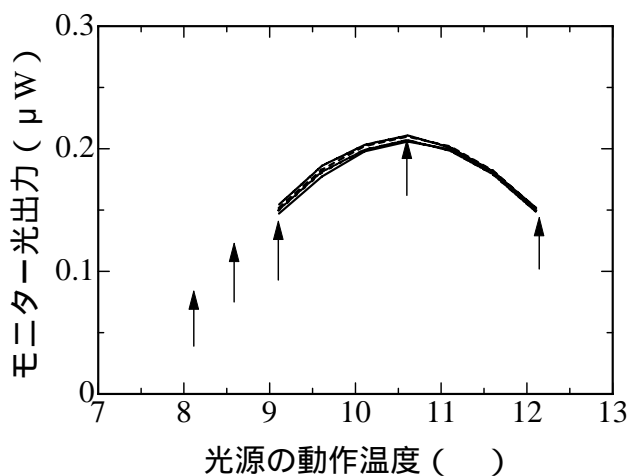


図 3.8 局内光送信機 TX-AC の光源 (1558.1nm) の波長制御

3.4.2 AWG2 の環境温度を変化させた時の光源の波長制御性

図 3.1 の実験系の構成において加入者 B の光送信機 TX-BS に波長 1300nm の半導体レーザを使い、AWG1 と 2 を通さずに局側の光受信機 RX-BC と直結した点を除き同図の構成で AWG2 の環境温度を 25、35、45 と変化させたときの局側の光送信機 TX-AC (波長 1558.1nm、Port34 に対応) と TX-BC (波長 1557.3nm、Port33 に対応) および加入者 A の光送信機 TX-AS (波長 1554.9nm、Port30 に対応) の光源の波長制御を行った。それぞれの光源の波長制御性を図 3.9、図 3.10、図 3.11 に示す。

AWG2 の環境温度ごとに、各ポートで総合透過スペクトルを測定し、その中心となる温度に光源の動作温度を設定している。それらは図中矢印で示されている。AWG2 の環境温度が 45 を超えると制御が不能になる。不能になるということは、ネットワークが正常に動作しなくなり、プログラムが実行できない状態になることを意味している。

リモートノードの光合波器 AWG2 の環境温度の変化に対してネットワーク的に光源の波長を制御できる AWG の温度範囲は ± 20 であることが明らかにされた。

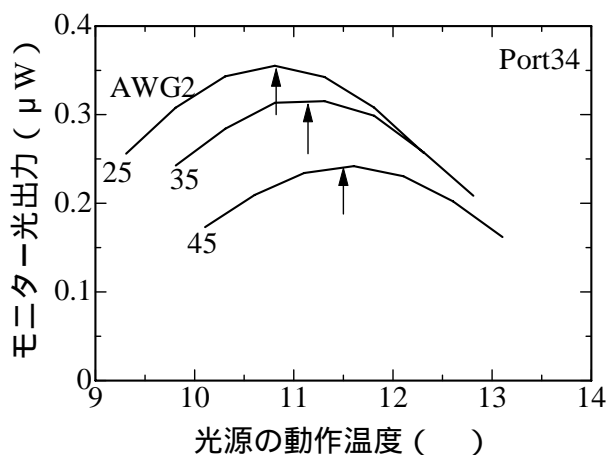


図 3.9 AWG2 の環境温度を変化させたときの光送信機 TX-AC (波長 1558.1nm、Port34 に対応) の光源の波長制御性

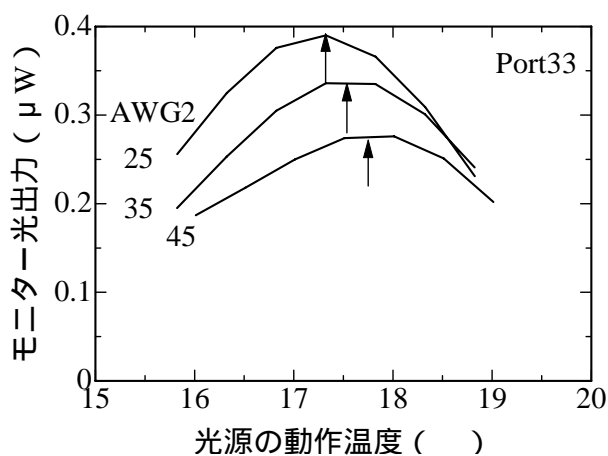


図 3.10 AWG2 の環境温度を変化させたときの光送信機 TX-BC (波長 1557.3nm、Port33 に対応) の光源の波長制御性

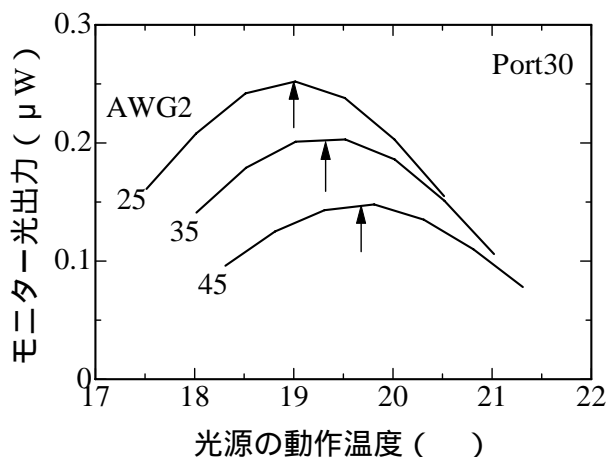


図 3.11 AWG2 の環境温度を変化させたときの加入者 A の光送信機 TX-AS (波長 1554.9nm、Port30 に対応) の光源の制御性

4. 考察

4.1 アサーマル AWG に対する要求条件

この実験で使用してきた通常のAWGの温度特性は $0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$ である⁷⁾。報告されているアサーマルAWGの温度特性は通常のものより一桁小さい $0.0013\text{nm}/^\circ\text{C}$ である⁸⁾。3.4.2 で明らかにされたように通常のAWGの温度変化に対して、波長制御可能な温度範囲は $\pm 20^\circ\text{C}$ である。AWGの標準的な環境温度を 25°C として、最高 70°C まで温度制御を可能とするためには温度範囲は $+45^\circ\text{C}$ になる。それを可能にする温度特性は $0.004\text{nm}/^\circ\text{C}$ であり、報告されているアサーマルAWGの温度特性より3倍大きい。アサーマルAWGの温度特性の要求条件を緩和することにより、アサーマルAWGのコストを下げるができる。

4.2 光源の動作温度制御範囲の限界と実際

波長間隔が 0.8nm の高密度波長多重を用いた光アクセス方式で、光源の動作温度により光源の発振波長を制御する場合、制御が厳しくなるのは、お互いに隣接するポートの光源の波長が接近しているケースである。3.4.1 の実験結果で明らかにされたように、隣接するポートの中心波長からそれぞれ 0.25nm お互いに接近している場合は制御可能であるが、 0.3nm づつ接近すると図 4.1 に示すようにクロストークの影響が大きくなり、これがネットワークの正常な動作を妨げる。

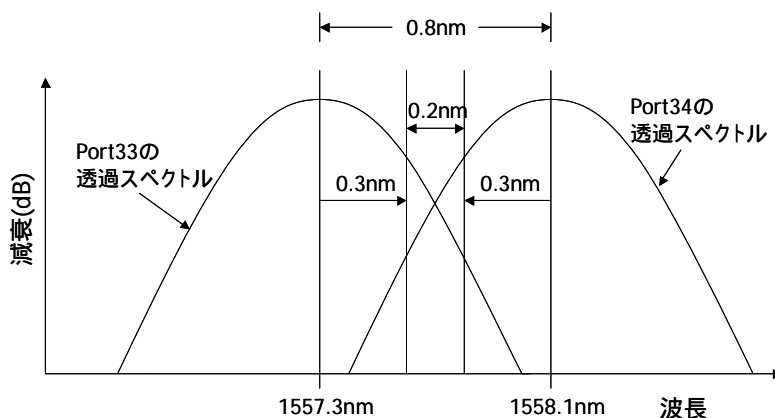


図 4.1 光源の波長シフトと Port33 と Port34 の透過スペクトルの関係

通常のネットワークの運用では、図 4.1 のような状況は急激には生じない。リモートノードの AWG の環境温度変化はゆるやかであり、その変化に追従して光源の発振波長はポートの中心波長の近傍にいる。 0.25nm の波長のシフトは一般的な AWG でも 25°C の温度変化に相当し、アサーマル AWG であればもっと大きな温度変化に相当する。従って、通常の運用状態であれば光源の動作温度の制御範囲が $\pm 2.5^\circ\text{C}$ (波長に換算して 0.25nm) であれば問題はないと考えられる。逆に、光源の動作温度の制御範囲に入るよう、制御頻度を設定することになる。

4.3 計測ネットワークの経済化

第 3 章の実験では、温度制御装置や光パワーメータなどを制御する計測ネットワークのインタフェースとして GP-IB を使用していた。しかし、アクセス網はイーサネットである。そのため、イーサネットと GP-IB の変換を行うために計測サーバである LAN/GP-IB ゲートウェイを用いていた。このゲートウェイが高価であるた

め、ゲートウェイの代わりにTINI⁹⁾と呼ばれる安価なone-board-computerの利用を検討した。図 4.2 にGP-IB 計測ネットワーク（上側）にTINIを用いた計測ネットワーク（下側）の構成を示した。

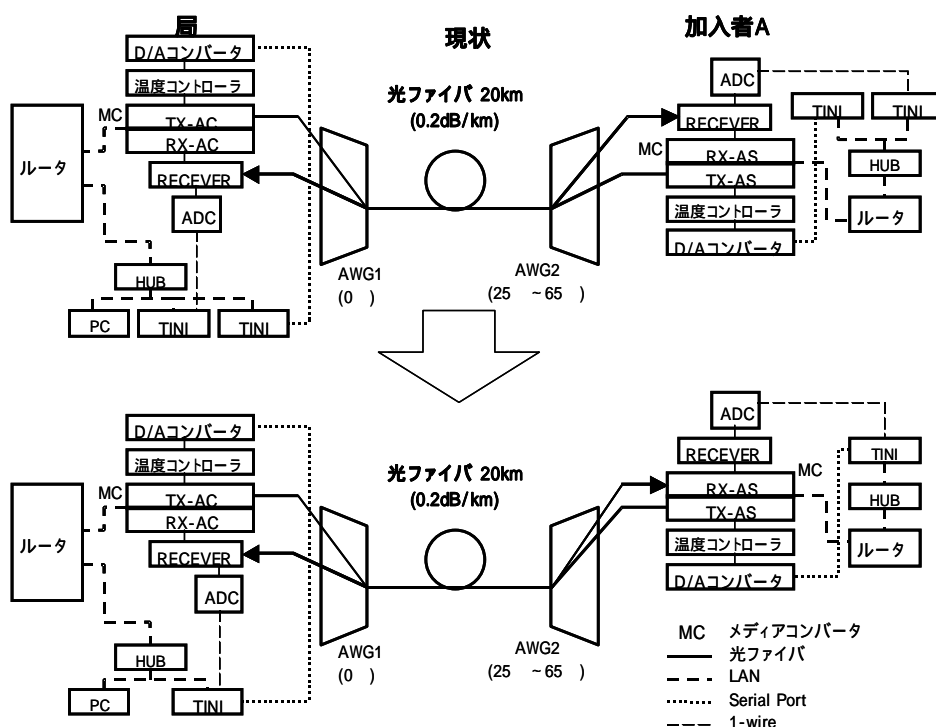


図 4.2 GP-IB 計測ネットワーク(上側)と TINI 計測ネットワーク(下側)

TINI を用いた場合、光パワーメータの代わりに RECEPTOR からのモニター出力を AD コンバータに入力し、そのデジタル信号を 1-wire net で TINI に伝送する。この RECEPTOR は本来メディアコンバータ内の受信機 RX-AS が機能すべきものであるが、その機能がなかったため別の RECEPTOR を利用した。機能とは平均光受信パワーをモニターする機能で、図 4.3 のように光受光素子からの出力をトランスインピーダンス型増幅器で増幅した後、低域フィルタで分岐すれば光平均受信パワーのモニター出力が得られる。光受信機にこの機能を持たせば、光パワーメータのみならず図 3.1 にある 10:1 光カップラーも不要になる。温度制御装置へは TINI のシリアルポート経由で RS-232C インタフェースにより制御信号を送る。

Java による制御プログラムを作成し、TINI を用いて 1 加入者システムの波長制御動作を実験的に検証した。

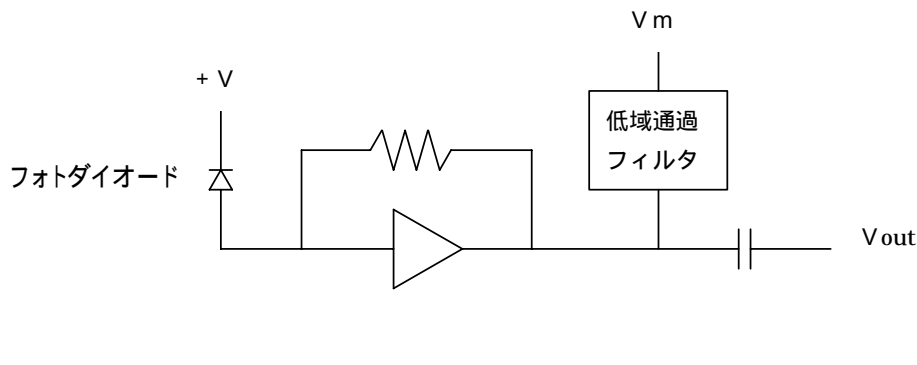


図 4.3 光パワーモニターの機能を持つ光受信機。Vm がモニター出力。

5. おわりに

本文では、波長間隔 0.8nm の高密度波長多重を用いた広帯域光アクセス方式における波長制御方法に関する研究成果について報告を行った。その主な成果は次の通りである。

- (1) 局側の光合分波器 AWG1 とリモートノードの光合分波器 AWG2 の 2 つの AWG を通過させて得られる総合透過スペクトルを波長基準器として、その中心波長に光源の発振波長を動作温度の制御によってロックするアルゴリズムを確立した。
- (2) ファーストイーサネットをベースとして、メディアコンバータで光 - 電気変換する光アクセス網で 2 加入者を収容し、加入者側の 2 つの光源と 2 加入者に対向する局側の 2 つの光源、合わせて 4 個の光源の波長制御実験を行い、0.8nm 波長間隔の総合透過スペクトルの中心波長に対して、 $\pm 0.25\text{nm}$ の波長シフト（光源の動作温度の制御範囲 ± 2.5 ）まで制御可能であることを明らかにした。
- (3) 通常の AWG をリモートノードに置いた実験で、AWG2 の環境温度について 25 を初期動作温度として 45 までの環境温度で波長制御性を確認した。0.8nm 波長間隔の通常の AWG では、環境温度の変動範囲 ± 20 まで波長制御が可能である。
- (4) 温度制御系を使用せずにリモートノードを無保守化することを考えた場合、前項 (3) で明らかにした環境温度の許容される変動範囲 ± 20 は実用的には狭い。そこで、リモートノードにアサーマル AWG を用いることを提案した。AWG の標準的な環境温度を 25 として、最高 70 まで温度制御するには AWG の温度特性は 0.004nm/ であればよく、報告されているアサーマル AWG の温度特性 (-0.0013 nm/) より 3 倍大きな値である。この場合、70 まで温度変化しても波長制御システムによって波長変化を救済できる。アサーマル AWG の温度特性の要求条件を緩和することによって、アサーマル AWG のコストを下げるができる。
- (5) 実験では計測制御のインタフェースとして GP-IB を使用していたため、イーサネットと GP-IB の変換をするため高価なゲートウェイを用いていた。この代わりに安価な TINI と呼ばれる one-board-computer を利用した計測ネットワークの波長制御実験を行い、基本動作の確認を行った。これによってシステムの低コスト化が図られる。

ユビキタス・ネットワーク技術の最近の急速な発展によって、ネットワーク制御の組み込みデバイスは高機能化・低コスト化が図られるものと期待される。波長制御をネットワーク的に制御することはユビキタスネットワーク技術の発展の方向と合致するものである。

BPON や GPON のように一つの帯域を複数のユーザで共有するのと異なり、本アクセス方式は 1 つの波長をユーザが占有するため伝送速度に制約はない。端末さえ変えればユーザの要求する帯域、例えば、1Gbps や 10Gbps に設定することが可能である。システムのアップグレードが柔軟に対応できる。この方式を実現する上での課題は光源となる分布帰還型半導体レーザの低コスト化である。

謝辞

本研究の一部は(株)KDDI 研究所からの受託研究に基づいて行われた。同研究所の関係各位の支援に対して感謝する。

参考文献

1. 阿蘇和人:いよいよ本格普及が始まった FTTH の最新技術を知る .*日経 NETWORK*, (050):43-61,2004.

2. 坪川信:ブロードバンド時代へ向けた光アクセス網技術 <http://www.ieice.org/cs/pni/jpn/files/Tsubokawa.pdf>.
3. J. D. Angelopoulos, H-C. Leligou, T. Argyrio, S. Zontos, E. Ringoot and T. V. Caenegem : Efficient Transport of Packets with QoS in an FSAN-Aligned GPON. *IEEE Communication Magazine* : 42(2), 2004.
4. 後藤 勉 : FTTH, Broadband Internet. 第5回PNI研究会資料: 78-85、2001
5. T. Yamamoto, K. Nishikawa, Y. Horiuchi, M. Usami, M. Suzuki, K. Yamazaki and H. Uetsuka : Wavelength Control for Dense WDM Optical Access Network. *OECC 2002, Technical Digest* : 78-79, 2002.
6. 林 智博 : 高密度波長多重を用いた光アクセス方式における光源の波長制御に関する研究 . 帝京科学大学 理工学研究科 修士論文 : 2004.
7. 高橋 浩、岡崎久晃、日比野善典 : アレー導波路回折格子を用いた光合分波器 . 電子情報通信学会技術報告, PST91-48, 1991.
8. K. Maru, M. Ohkawa, H. Nounen, S. Takasugi, S. Kashimura, H. Okano and H. Uetsuka : Athermal and Center Wavelength Adjustable Arrayed Waveguide Grating. *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2000*. 130-132, 2000.
9. <http://www.ibutton.com/TINI/index.html>