

MS9720A WDM ネットワークテスタ

MS9720A WDM Network Tester

UDC 543.423 : 621.3.032.3 : 621.315.592 : 621.317.35/.75

柿本達樹	Tatsuki Kakimoto	計測器事業本部	計測器事業部	第4開発部
山口史郎	Shiro Yamaguchi	計測器事業本部	計測器事業部	第4開発部
石綿宗男	Muneo Ishiwata	計測器事業本部	計測器事業部	第4開発部
田中一基	Kazuki Tanaka	計測器事業本部	計測器事業部	第4開発部

1 はじめに

インターネットの広範囲普及や、コンピュータ間のデータ伝送の拡大などにより、通信回線容量の増大要求が強まっている。これに対応する手段として、多数の光信号を1本の光ファイバで伝送するWDM (Wavelength Division Multiplex : 波長多重) 通信は、既設の光ファイバが使用でき、伝送容量の大幅増大を比較的容易に実現できるため急速に導入されている。また、最近ではこれらの通信システムを有機的に接続するWDM通信ネットワークの動きも進んでいる。これらWDM通信システムでは信号源としてのレーザだけでなく、光増幅器や、波長成分に応じた信号の分離合成を行う分合波器などの光素子が使用されており、これらの素子の測定、試験はシステムの製造、建設、保守において必須のものとなっている。MS9720A WDM ネットワークテスタはWDM通信システムの評価に必要な光学的測定を一台で可能にするように設計された測定器である。本稿では開発の背景とその性能機能につい

て述べる。図1にMS9720A WDM ネットワークテスタの外観を示す。

2 MS9720A WDM ネットワークテスタの対象市場の動向と必要性能

MS9720A WDM ネットワークテスタの主な対象市場の動向と、その分野でMS9720A WDM ネットワークテスタが適用されるために必要な性能を以下に述べる。

2.1 WDM 通信システムの動向

2.1.1 基幹伝送系における波長多重

WDM通信システムでは次々に新しい技術が開発、採用されている。光増幅器の波長帯は、当初は1,550nm帯 (C-band) を中心にしており、多重数も8個程度で信号間の波長間隔 (チャンネルスペーシング) も緩やかであった。また、ビットレートも2.5GHzが一般的であった。しかし、多重数は急速に増加し128波を使用するシステムもすでに実現されている。また、ビットレートは10GHzへ、さらに使用波長帯も当初導入された1,550nm帯だけでなく、1,580nm帯 (L-band) をも用いたシステムや、さらに1,500nm以下の波長帯の開発も行なわれている。また、電気信号を介さずにWDM光通信ネットワークを構築し都市や国をつなぐ例も実用段階に近づいている。以上のように、WDM通信においては伝送容量の増大は一貫して進んでおり、今後もその動きは継続すると予想される。普及の面でも、もっとも立ち上がりの早かった北米だけでなく、最近では世界中で進みつつある。

2.1.2 海底光通信系における波長多重

海底光通信においてはすでに光増幅器の導入により、中継

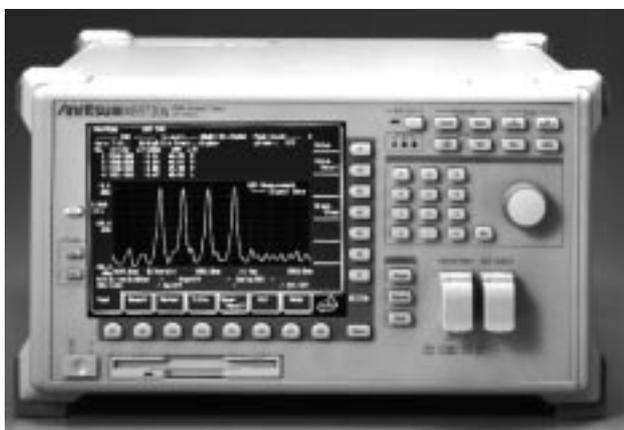


図1 MS9720A 外観図
External view of MS9720A

器において電気信号へ一度戻す3R中継器は使用されなくなっている。これに加え波長多重通信の導入も進んでいる。しかし、陸上と比べ伝送距離が長いために特に考慮しなければならない事項がある。例えば、多数の光増幅器を縦列に接続することにより、1段当りノイズ特性や増幅特性を厳しく管理する必要があること、少しの波長の変動により大きく損失や分散特性が変わる問題への対応を考慮する必要があることなどである。これらはシステム設計上注意深く検討されている。しかし、伝送量の増大への動きは基幹伝送系と基本的には変わらず、多重数の増大、波長帯の拡大、変調速度の高速化に努力が向けられている。また、大陸間を結ぶ回線も数が増えている。

2.2 測定対象

上記のような状況に対応し具体的な技術進歩も激しい。多重化された信号と光増幅器の組み合わせによるだけでなく、新しい機能を持った光学機能素子（双方向で使用する合波器、LバンドとCバンドの分離合成素子、ADM（アドドロップマルチプレクサ）など）が採用されつつある。このような中において、波長特性を高度に利用するWDMシステムでは波長特性の測定の重要性が高い。MS9720A WDMネットワークテストの測定対象もこれらを中心に考えられている。具体的には、送信装置、中継器での信号源の波長、レベル、ノイズ特性や、様々な光学素子の光学特性、伝送路としての光ファイバの特性などである。個々の項目の重要性は対象とするシステムの構成や許容度によってかわる。例えば、陸上の中距離システムの場合、信号波長の変動の許容度は100GHz（約800pm）のチャンネル間隔の10から20%程度で数100pm程度であるが、大陸間を海底ケーブルで結ぶような超長距離の場合、数10pmの変動も許容できない場合もある。また、単一方向の伝送の場合には光部品に要求される特性も比較的緩やかであるが、双方向の場合には反射特性や漏話特性などの厳しい管理が要求される。光増幅器を用いたシステムの場合、ノイズ特性は一般にもっとも重要な特性であり、WDM通信においても同様である、SNRで表現されるノイズ特性が悪化すると直接エラーレートなど伝送品質の悪化につながる。図2にWDM通信装置の光系の基本ブロックを示す。以下に個々の測定項目について触れる。

2.2.1 信号スペクトラムの測定

中心波長、レベル、SNRが主な項目で、信号源だけでなく光増幅器、光ファイバを含む光部品の特性の影響を受ける。

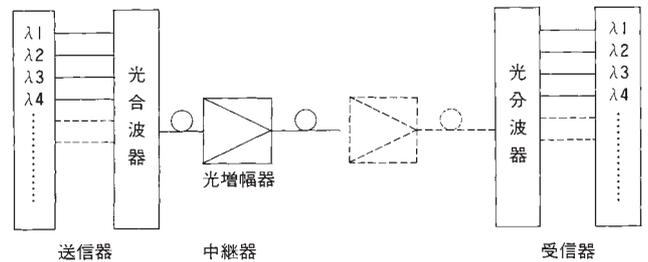


図2 WDM光通信装置光系ブロック図

Block diagram of WDM optical communication system

また、瞬時的な値だけでなく長時間の特性も重要になる。

2.2.2 光学部品、光学素子の測定

双方向の光通信システムの場合に、特に問題になる項目である光学部品の諸特性例を以下に示す（図3参照）。これらはいずれも1波長における値ではなく使用波長帯の範囲全体にわたる測定が要求されている。

・ Insertion Loss

各Portにおいて合波・分波器へ入力されるスペクトラム波形と、それから出力されるスペクトラム波形を比較して各Portでの波長損失特性を評価する。

・ Isolation

合波・分波器のCOM Portから入力されるスペクトラム波形と、それから出力される各Portのスペクトラム波形を比較して波長損失特性を評価する。

・ Directivity

ある1つのPortから合波・分波器へ入力されるスペクトラム波形と、他のPortへ漏れ込む出力スペクトラム波形を比較して波長損失特性を評価する。

・ Return Loss

ある1つのPortから合波・分波器へ入力されるスペクトラム波形と、そのPortから反射してくるスペクトラム波形を比

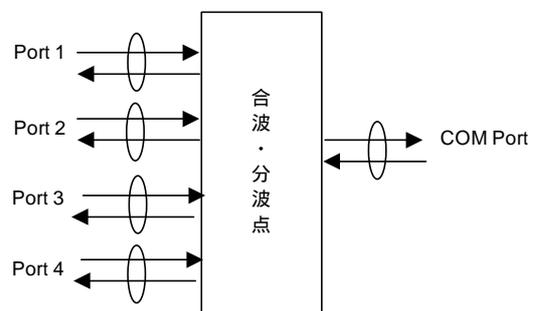


図3 合波・分波器の波長特性の評価

Evaluation of wavelength characteristic

較して波長損失特性を評価する。

2.2.3 光増幅器の測定

WDM 光通信装置に必須となった光増幅器の評価では、対波長利得特性、対波長NF（雑音指数）特性を測定する。

2.2.4 光ファイバ

前述のように光増幅器の導入で光パルス信号を電気信号に変換することなく、光増幅器を設置した光増幅中継器を設けることで、光パルスのままで長距離伝送が可能になった。光ファイバには損失のほか波長分散（材料分散、構造分散に分類される）やPMD（偏波モード分散：Polarization Mode Dispersion）があり、WDMシステムでも高速で長距離の伝送を行う場合、十分考慮される必要がある。分散は伝送波形の時間方向の位相ずれとして現れ、ビットレートにより許容される値が決められる。MS9720A WDM ネットワークテスタでは、分散のうちPMDを簡便に測定することができる。通常の光ファイバではコアが楕円化しているか、あるいは種々の応力により内部に複屈折が生じる。これに光パルスを入射した場合、直交する2つの偏光成分に、屈折率の違いから速度差が生じ、出力光パルスが広がる現象がある。これをPMDという。PMDは光伝送装置において伝送距離を制限する重要な問題となる。

2.3 必要性能

WDM 光信号や各光学部品・光学素子の波長特性を表すスペクトラムは図4のように横軸波長（または周波数）、縦軸レベルで示される。このような信号を正確に測定するためのMS9720A WDM ネットワークテスタに必要とされる基本的な

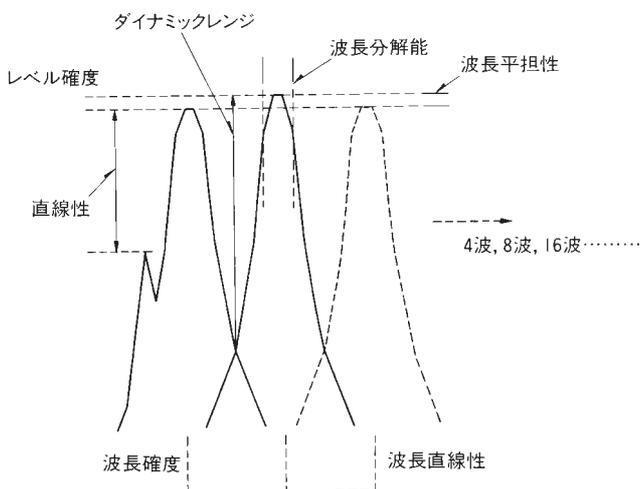


図4 WDM 光通信におけるOSAの重要性能
Important characteristics of OSA for WDM optical communication

性能として、次に記載する波長確度、波長安定度、分解能、ダイナミックレンジ、波長平坦性などがある。

・波長確度

WDM 通信システムにおけるチャンネル間隔は0.4 ~ 1nmである。各チャンネルの信号の独立性を維持し、保障するためには、測定器と±50pm以下の波長確度は必須である。

・波長安定度

前記のチャンネル間隔を前提として測定値の信頼性を維持するためには5pm以下の値が要求される。

・分解能

前記のようにWDM 通信システムにおけるチャンネル間隔は最小0.4 ~ 1nmで考えられている場合が多い。このとき必要な分解能は十分な光信号の分離を考えて0.1nm以下である。

・ダイナミックレンジ（信号両側部分の波形のすそひきの程度を表した量）

WDM 通信システムに用いられる光増幅器のノイズはSNRとして評価される。SNRは光信号レベルとノイズレベル（信号間の波長における）の比で測定され、伝送品質の維持には、30dB以上の値が確保されている必要がある。特に多重数の多いWDM 通信システムではチャンネル間隔が近接しており、ダイナミックレンジが十分確保されていない場合には、正確な測定が出来ない。ダイナミックレンジとしてSNRが十分余裕をもって測定できる50dB程度の値が望ましい。

・波長平坦性

光増幅器のゲインや光学部品、光学素子の損失には波長依存性があり、これが著しいと信号間での特性がばらつき、システムの性能の維持が困難になる。そのためシステムを設計する際には十分考慮し、また製造にあたってはより厳しい管理が必要である。当然測定器には、測定波長によるレベルのばらつきを極力抑える必要があり、±0.1dB程度の値が必要である。

その他、波長関係の特性では波長直線性、レベル関係の特性ではレベル確度、直線性、確度、安定度、感度、偏波依存性などが重要であり、無視できない。

これら基本性能に加え光学部品伝送特性の測定にはシステムの使用波長範囲を十分カバーし、かつ十分高いレベルを持つ光源が必要となる。さらに、微小なレベルを測定する項目では測定器側の不要なノイズ（光の漏れを含む）を十分に低く抑えなければならない。

3 設計方針と目標性能

市場要求をもとに設計方針と目標性能を以下のように定めた。

3.1 設計方針

WDM 通信システムの開発から保守・敷設に対応する。具体的には高性能，小型，多機能・簡易操作を実現し，WDM 通信システムの保守・敷設に必要な多くの性能・機能を一台に集約する。

3.2 目標性能

WDM 通信システムにおける市場要求と MS9720A の目標性能を表1に示す。

4 方式選択

スペクトラム測定における分光方式の特長を表2にまとめた。

WDM 光信号の測定や光学部品の波長損失特性を測定する際，レベル測定が安定でかつ正確に測定できることが絶対条件である。また，WDM 光信号の測定において SNR の測定結果は重要な評価データとなる。そのため測定器にはより広いダイナミックレンジが必要とされる。また，前述のように波長精度，波長安定性，波長分解能が WDM 光信号の測定には

表1 WDM通信システムにおける市場要求と MS9720A の目標性能
Target specification of MS9720A and market demand for WDM optical communication system

項目	市場要求	目標
波長範囲	1,470 ~ 1620nm	1,450 ~ 1650nm
波長精度	± 40pm	± 20pm
波長直線性	± 40pm	± 20pm
測定レベル範囲	- 80 ~ +23dBm	- 87 ~ +23dBm
レベル直線性	± 0.1dB	± 0.05dB
分解能	0.1nm	0.1nm

表2 分光方式の特徴
Features of spectral methods

	レベル安定性	分解能	波長精度	ダイナミックレンジ
回折格子 (シングルパス方式)				
回折格子 (ダブルパス方式)				
マイケルソン干渉計				
ファブリペロー干渉計	x		x	

重要である。これらを満たすため，従来の光スペクトラムアナライザでも使用している回折格子を使ったダブルパス方式を採用した。ダブルパス方式は，回折格子で回折された光を再度それに入射，回折することにより，ビームの広がりを抑える結果，より広いダイナミックレンジを確保することが出来る。

5 設計

5.1 光学部

<概要>

回折格子を使った分光方式で，なおかつ高波長精度，高波長安定度を実現するために分光部を構成する光部品の選定やそれらの配置を最適化する必要がある。

MS9720A WDM ネットワークテスタの光学部は受光部ブロック図を図5に，光学部の構成図を図6に示す。MS9720A WDM ネットワークテスタの光学部は，分光部，波長基準光源部，SLD (Super Luminescence Diode) 光源部，光スイッチ

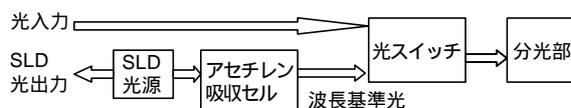


図6 光学部構成図
Optical section configuration

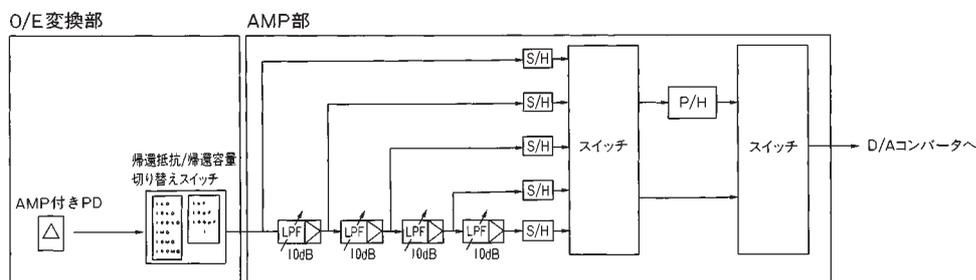


図5 受光部ブロック図
Block diagram of light receive section

部から構成されている

・分光部

MS9720A WDM ネットワークテスタの分光部はMS9710B¹⁾光スペクトラムアナライザと同じリトロ型加分散ダブルパス方式を採用しており、MS9710Bと同様に小型・軽量でありながら、WDMの評価に対応した高性能と高信頼性を実現している。

・波長基準光源部

波長基準光源は、物理的に極めて安定した波長の吸収線を持つアセチレンを利用した光源である。図7に波長基準光のスペクトラム波形を示す。

アセチレンガスは特定波長の光スペクトラムを吸収するという性質がある。そのためSLD光源のようなブロードな光をそれに入射すると、出力光の光スペクトラムには特定波長にDip（吸収）が生じる。その特性を利用して、既知の値であるDip波長（吸収線波長）を測定し、その値を基準値で持つことにより波長軸の補正が可能となり、その結果、波長確度を向上させることができる。

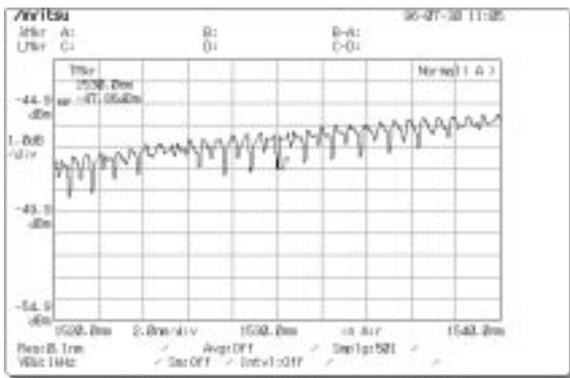


図7 波長基準光のスペクトラム波形
Spectrum waveform of reference light

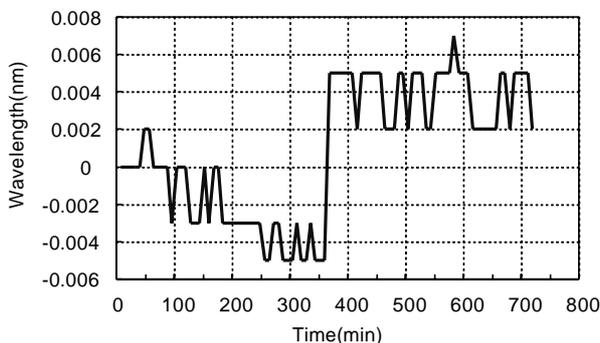


図8 長時間波長安定度測定
Measurement of Long Term wavelength stability

図8はMS9720A WDM ネットワークテスタで周波数安定化光源（波長安定度1pm以下）のピーク波長を長時間測定し続けた結果である。

このアセチレン吸収線を波長基準として波長の校正を行うことにより、 $\pm 20\text{pm}$ の波長確度を実現した。MS9720A WDM ネットワークテスタでは基準光源と光スイッチを内蔵しており、光ファイバの接続を変更せずに波長校正を行える構造にしている。

・SLD光源部

図9にSLD光源の光スペクトラム波形を示す。SLD光源は、 $-40\text{dB}/1\text{nm}$ の高い出力レベルをもつ白色光源であり、従来の白色光源よりも20dB以上も高いダイナミックレンジで光学素子の波長伝送特性を評価できる。

MS9720AではこのSLD光源を標準装備しており、外部に評価用アプリケーションを加えて、光学部品、光学素子の評価を簡易に評価することが可能である。

・光スイッチ部

光スイッチは被測定光と波長基準光を光学部内で切替えるためのもので、これにより波長の自動校正を可能にし、WDMネットワークの長時間監視測定中でも常に高い波長確度で測定が可能となる。

5.2 制御部

MS9720Aの制御部は従来のMS9710B光スペクトラムアナライザにVGA外部出力回路を付加した制御系で構成される。MS9720Aは2つのCPUで構成され、それぞれ制御する対象の名称を冠してCONTROL CPU、MEASURE CPUと名付けた。図10にCONTROL CPU関連回路のブロック図を、図11にMEASURE CPU関連回路のブロック図を示す。

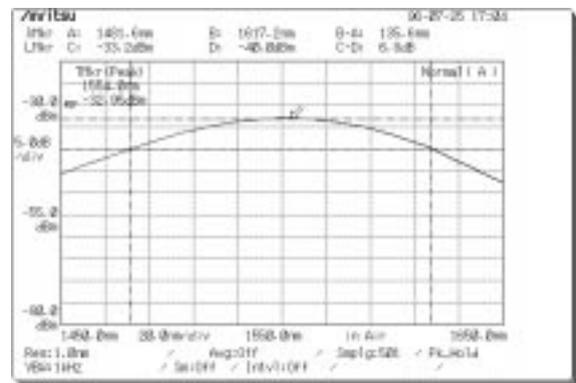


図9 SLD光源スペクトラム波形
Spectrum waveform of SLD Light source

MEASURE CPUは光学部内の光学素子の制御，回折格子を回転させるモータの制御，測定データサンプリングなど測定関連の制御を行っている。

一方，CONTROL CPUはMEASURE CPUが取り込んだデータを受け取り，波形処理，解析処理を行い，さらに画面表示制御，インタフェースなどの外部機器とのデータ交換処理を実現している。

6 機能

MS9720Aは従来の光スペクトラムアナライザに比べて，WDM通信でのニーズに応える数多くの機能を追加した。また，製造や敷設現場での使用を考慮し操作を簡略化している。例えば，4種の伝送特性の測定においては，同一の手順で操作を行えるようにしている。また，従来1画面で行っていた測定を2画面で表示できるようにし比較を容易にした。さらに，WDM信号波長での特性を測定波形から都度読み取る必要が

ないように，自動的にその波長における測定結果を表にする機能を設けた。

表3に主な機能を示す。

挿入損失測定では，内蔵SLD光源または外部光源を使用した，光カプラなど光デバイスの挿入損失の測定が可能である。図12は，バンドパスフィルタの波長伝送特性の測定例である。アイソレーション，ダイレクティビティ，反射減衰量の測定でも同様の2画面3トレースによる特性評価が可能である。また，WDMの各チャンネル波長を指定し，測定結果を一覧表示する機能も備えている（図13）。

偏波モード分散は光ファイバアンプ系の伝送ビットレートの上限を決める重要なファクタである。MS9720Aは波長領域での測定法の一つである固定アナライザ法による偏波モード

表3 MS9720Aの主な機能

Main function MS9720A

波形解析	スレショルド，SMSR，スペクトラムパワー積分
応用測定	挿入損失，アイソレーション，ダイレクティビティ，反射減衰量，偏波モード分散，NF，WDM波形解析，長時間測定

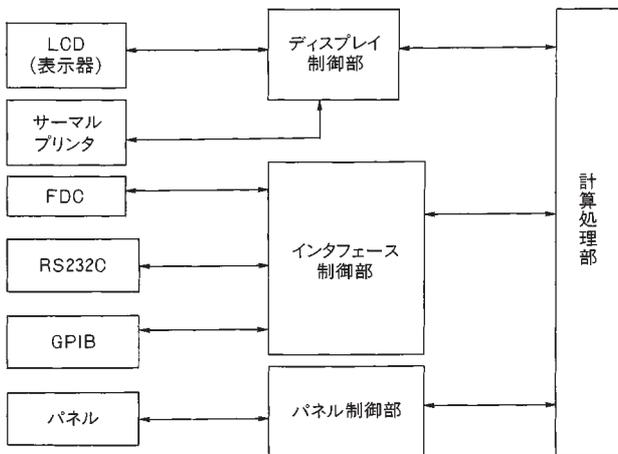


図10 CONTROL CPU ブロック図
Block diagram of CONTROL CPU

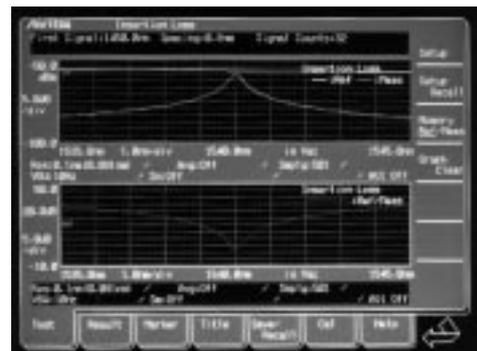


図12 挿入損失測定
Insertion loss measurement

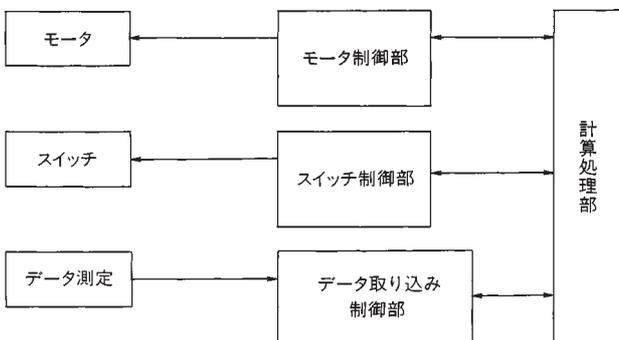


図11 MEASURE CPU ブロック図
Block diagram of MEASURE CPU



図13 挿入損失測定結果の一覧表示
List of Insertion Loss measurement results

分散測定（注1）の計算機能を装備している。図15のような測定系を利用して、容易に偏波モード分散の測定を行うことが可能である（図14）。

注1）固定アナライザ法による偏波モード分散測定

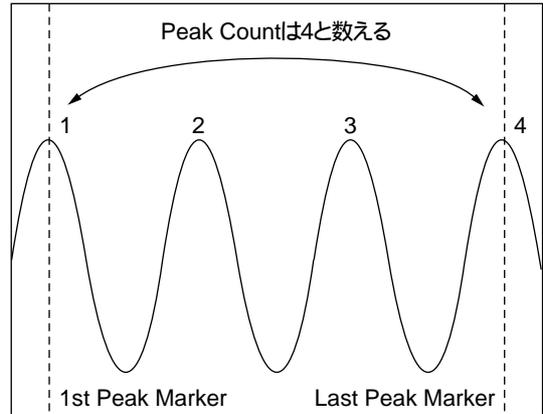
図15のように固定アナライザ（偏光子）を配置し、偏波を分離した光を被測定物に入射する。それぞれの方向に偏向された光は、異なる伝送速度を持つため、出力側での位相が異なる。出力においてこの2つの光を再度合成し波長の掃引を行うと、位相が変化し強弱を繰り返す信号が得られる。この間隔は偏光方向の速度差により一義的に決まり、波長間隔を読むことにより速度差が得られる。

MS9720Aの偏波モード分散測定では、測定波形のピークにマーカーをあわせ、ピーク数をカウントして入力するだけで、微分群遅延時間の算出が行える。MS9720AのWDM波形解析では、WDM伝送システムにおいて大きな問題となる各信号チャンネルのSNR（信号対ノイズ比）を最大128チャンネルまで評価可能であり、WDM波形の各チャンネルの波長、レベル、SNRを解析、表示する。

図16に16チャンネルWDM信号波形を示す。MS9720AのWDM波形解析では、各チャンネルの波長とレベルを求める解析、波長・レベルに加えSNRを求める解析、さらに波長・レ

ベルと各チャンネル間の波長間隔を求める解析の3種類の解析モードが用意されている。

SNRの算出においてはノイズの検出方法が重要となるが、MS9720Aではノイズ位置を自動検出する、あるいはピークからの波長差で選択する等といった柔軟な設定を可能としている。



Diff. Group Delay（微分群遅延時間）

$$= \frac{k(n-1) \times \lambda_1 \times \lambda_2}{c(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

ここで、

- k : Mode Cpl Factor
- c : 光速 (2.9979 × 10⁸m/s)
- n : Peak Count
- λ₁ : 1st Peakの波長
- λ₂ : Last Peakの波長

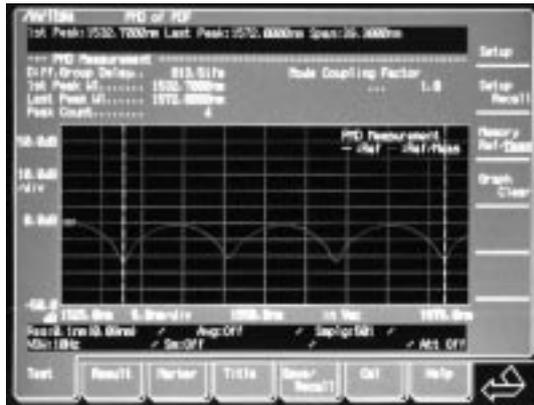


図14 偏波モード分散測定例
PMD measurement

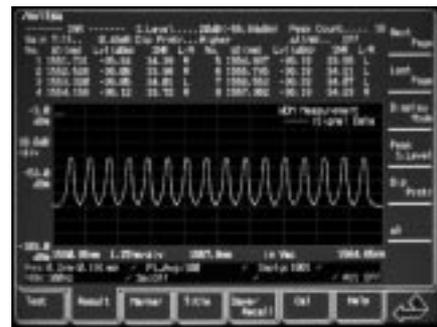


図16 WDM波形解析
Analysis of WDM waveform

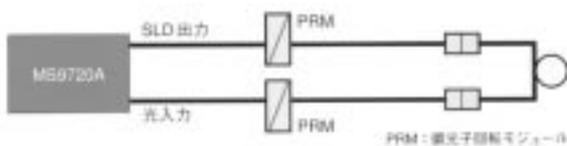


図15 偏波モード分散の測定系
Measurement system of PMD

7 データ出力、外部制御

内蔵のFDDは測定条件データ保存に用いるほか、テキストファイルおよびビットマップ画像ファイル出力を行うことが可能である。その他、入出力インターフェースとしては、GPIBとRS-232Cポートを標準装備しており、外部リモート制御の実現も容易である。

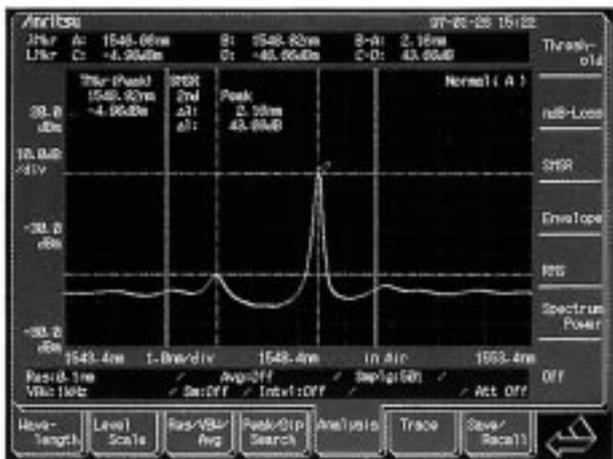


図17 LDのスペクトル
LD spectrum

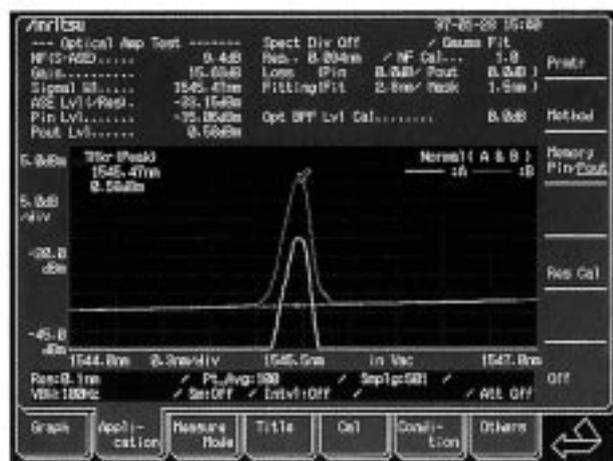


図18 光増幅器のNF測定
NF measurement of optical fiber amplifier

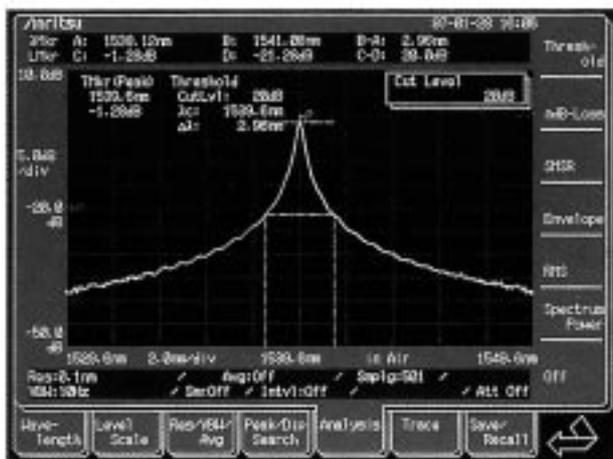


図19 SLD光源によるフィルタの測定
Optical filter measurement using SLD light source

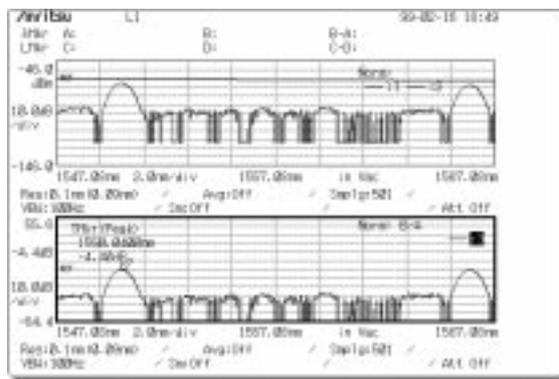


図20 AWGの挿入損失測定
Insertion Loss measurement of AWG

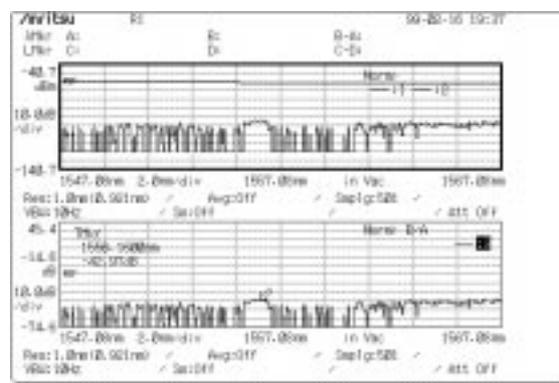


図21 AWGの挿入損失測定
Insertion Loss measurement of AWG

8 測定例および主な規格

図17に半導体レーザのスペクトル例を、図18に光増幅器のNF測定例を、図19にSLD光源によるフィルタの測定例を、図20、21にAWGの挿入損失および反射減衰量の測定例を示す。

また、主な規格を表4に示す。

9 終わりに

最近のWDM通信システムの動向について説明するとともに、この市場で要求されている精度、信頼性に十分応えられるよう開発したMS9720A WDMネットワークスタについて説明した。今後とも光測定器の発展に努力する所存である。

参考文献

- 1) 太田垣, 柿本, 津田, 山口, 石綿, : "ポータブル光スペクトラムアナライザMS9710B/WDMテストMS9715A", アンリツテクニカル, 74号(1997.10)

表4 主な規格
Main specification

MS9720A	
波 長	範 囲：1,450 ~ 1,650nm 確 度：± 20pm (1,530 ~ 1,570nm, 分解能0.1 ~ 0.2nm, 常温基準光で波長校正後) ± 50pm (1,520 ~ 1,600nm, 分解能0.1 ~ 0.2nm, 0 ~ 50 基準光で波長校正後) ± 0.3nm (1,450 ~ 1,650nm, 0 ~ 50 , 基準光で波長校正後) 安定性：± 5pm (スムージング：11pt, 1分間, 半値幅の中心波長で) 直線性：± 20pm (1,530 ~ 1,570nm) 読み取り分解能：5pm (表示分解能：1pm) 設定分解能 (フィルタ：3dB帯域幅)：0.1, 0.2, 0.5, 1.0nm 分解能確度：(± 10% (1,550 ± 20nm), ± 30% (1,550 ± 100nm, 0 ~ 30))
レ ベ ル	測定範囲： 減衰器がoff, 0 ~ 30 の時 - 87 ~ + 10dBm (1,450 ~ 1,600nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) - 72 ~ + 10dBm (1,600 ~ 1,650nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) 減衰器がoff, 30 ~ 50 の時 - 82 ~ + 10dBm (1,450 ~ 1,600nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) - 67 ~ + 10dBm (1,600 ~ 1,650nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) 減衰器がon, 0 ~ 30 の時 - 68 ~ + 23dBm (1,450 ~ 1,600nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) 減衰器がon, 30 ~ 50 の時 - 65 ~ + 23dBm (1,450 ~ 1,600nm, VBW：10Hz, スイープアベレージング：10回) 確 度：± 0.4dB (- 23dBm, 分解能： 0.1nm) 安定度：± 0.02dB (- 23dBm, 分解能： 0.1nm, 1分間, 一定温度, 偏波の変動がないこと) 直線性：± 0.05dB (1,550nm, - 50 ~ +0dBm) 平坦度：± 0.1dB (1,530 ~ 1,570nm) ± 0.3dB (1,520 ~ 1,600nm)
偏光依存性	± 0.15dB (1.55um帯, 分解能：0.1nm, 0 ~ 50) ± 0.07dB (1.55um帯, 分解能：0.5nm, 0 ~ 50)
ダイナミックレンジ	58dB (ピークから1nm離れた点で) 53dB (ピークから0.5nm離れた点で)
反射減衰量	35dB (1.55um帯)
掃 引	掃引幅：0.2 ~ 200nm, 0nm 掃引速度 (代表値)：0.8s (掃引幅：200nm, VBW：10kHz, 光出力なし, サンプリグポイント 501ポイント)
ディスプレイ	6.4インチカラー TFT-LCD, モニタ出力 (VGA) 端子付
メ モ リ	3メモリ測定, 3トレース表示
プ リ ン タ	内 蔵 (熱転写式)
インタフェース	GPIOB, RS-232C
記 憶 媒 体	3.5インチフロッピーディスクドライブ
環 境 条 件	動作温度：0 ~ + 50 (FDDは5 ~ 50) 保存温度：- 20 ~ + 60 相対湿度： 90% (結露しないこと。FDD動作時は20 ~ 80%)
寸法・質量	32(W) × 177(H) × 35(D)mm (突起部含まず), 16.5kg