

まとめ

近年、電気通信システムにおけるチャンネル数が増加傾向にあり、それに伴い波長特性を評価する測定効率が重要な課題となっています。広帯域光源とOSAを使用する手法は高速ですが、複雑なデバイスの特性を決定するために求められる分解能には達していません。レーザーを“ステップ”させてから測定させる技術では、ダイナミックレンジと分解能の両方を提供できますが、速度が非常に遅くなります。しかし、波長掃引測定手法では、OSA手法よりも高速で、レーザーの分解能を有します。この手法は最終実験における用途がありますが、DWDMコンポーネントのアセンブリにも大きな利点があり、デバイスが複雑さを増すほど、費用を大幅に低減できます。

参考文献

1. Nyman, Bruce, "DWDM Component Characterization," **NIST Symposium on Optical Fiber Measurements**, (Sept. 1998), p.1.
2. Nyman, Bruce, "Four measurement methods characterize WDM components," **OptoElectronics World**, (Sept. 1998), p. S2

アプリケーションノート10：波長掃引実験：時間短縮および生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現

スイープ波長チューナブルレーザー P32参照  
高ダイナミックレンジパワーセンサ P183参照

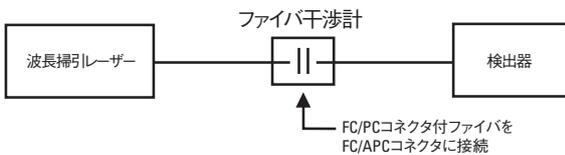


ニューフォーカス アプリケーションノート #11

# 波長掃引実験：パッシブ型ファイバ光学コンポーネントにおける波長掃引特性評価の理解

## Swept-Wavelength Testing: Insights into Swept-Wavelength Characterization of Passive Fiber-Optic Components

チューニングリアリティ — 光学



波長掃引システムの構築には、チューナブルレーザー光源、実験対象のデバイス、パワーセンサ、データ取得システムが必要です。

パッシブ型ファイバ光学コンポーネントで高分解能波長特性評価を行うための波長掃引手法では、従来手法よりも迅速にコンポーネントの特性を評価することができます。以前は数分から数時間かかった測定が、今では数秒で行えるようになりました。この波長掃引手法は、製造工程でのその場測定にも使用できますので、デバイスの整備や調整をリアルタイムで行えます。このアプリケーションノートでは、次の項目についてご説明します。

1. 波長依存測定の定義
2. 波長掃引システムの構築
3. 測定を行う
4. データの解釈

この手法の概要と、従来手法との比較については、アプリケーションノート10：波長掃引実験：時間短縮と生産環境でのリアルタイムプロセス制御の実現 をご覧ください。

### 1. 波長依存測定の定義

WDMおよびDWDMネットワークシステムの複雑さが増し、チャンネル数が増え、チャンネル間隔が狭くなり、波長帯が広がるにつれ、広帯域ネットワークコンポーネント（カプラ、コンバイナ、スプリッタ、アッテネータ、アイソレータ、サーキュレータなど）および狭帯域ネットワークコンポーネント（マルチプレクサ、デマルチプレクサ、インターリーバ、波長フィルタなど）の両方について、波長依存光学特性を完全に特徴付ける重要性が高まっています。

波長平坦度や偏光依存損失などの特性は、ネットワークシステムの性能全体に悪影響を与える可能性があります。狭帯域デバイスの場合、中心波長、クロストーク、場合によってはチャンネル間隔を測定することが、システム性能を最適化するために特に重要になります。狭帯域デバイスと広帯域デバイスは全波長帯で使用されるため、対象チャンネルのみに限らず、全波長帯における光学特性を測定することが重要です。さまざまな特性を測定するために採用できる手法が幾つかあります。

波長の関数としてスループット強度を測定することで、次の仕様を決定できます。

- 中心波長
- チャンネル間隔
- 波長平坦度
- フィルタの伝達関数
- クロストーク

光源の一部をリファレンス光として分割するさまざまな手法を活用することで、挿入損失のフィルタ除去率を測定できます。

偏光状態のコントローラと併用すると、次の特性を評価できます。

偏光効果  
偏光依存損失

それでは、測定ポイントは何ヶ所必要で、代表的な測定の所要時間はどの程度なのでしょう。80チャンネル（チャンネル間隔は0.4 nm）の50-GHzのDWDMシステムを考えてみましょう。このシステムでは、35 nmを超える波長スパンにおけるデバイスの性能を特徴付ける必要があります。チャンネル間のアイソレーションが30dB以上必要なので（線中心から0.4 nm離れた場所におけるデバイスの損失が30 dB以上）、測定には少なくとも30 dBのダイナミックレンジと、0.01 nm（10 pm）の分解能が必要です。これはつまり、代表的な測定では3500ヶ所の測定ポイントがあるということです。

一例として、100-GHzのインターリーバのスループットの測定を考えてみましょう。インターリーバは奇数と偶数のチャンネルを分け、2つの個別の出力にします。インターリーバはDWDMチャンネルの多重化と逆多重化に使用されますので、デバイスの性能を確保するため、両方の出力からの波長の関数として、スループットを測定することが重要です。チューナブルレーザー、実験対象のデバイス、パワーメータから成る従来型のステップ測定システムを図1に示しています。このシステムを使い、ステップを0.01-nmとし、波長1525 nm～1565 nmで両方の出力からデータを測定した結果、波長ポイントは4000ヶ所となり、データの収集には2時間以上かかりました。

しかし、このアプリケーションノートでご説明した波長掃引システムを使用することで、同じ測定を1秒未満で行うことができます。測定時間が大幅に短縮されるため、狭線幅デバイス（波長フィルタ、インターリーバ、マルチプレクサ、デマルチプレクサなど。偏光カプラのような偏光感度を有するデバイスも同様。）の時間のかかる測定に最適です。比較のため、図2は波長掃引技術を使用した測定方法を示しています。この測定には、3-pmの分解能で1秒かかりました。

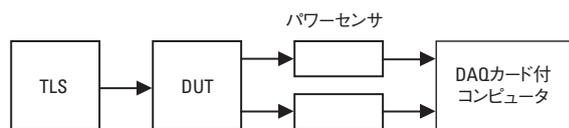


図1：チューナブルレーザー光源（TLS）、パワーセンサ、データ取得システムを使用した従来型ステップ測定システム。

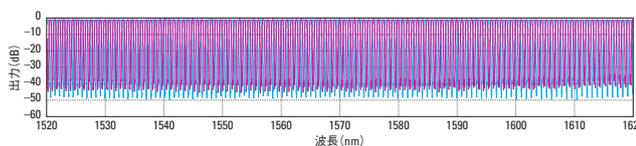


図2：New Focus™ TLB-6600波長掃引チューナブルレーザーは、製造工程における実験配置に最適です。この測定では、ニューフォーカスの100-GHzインターリーバからの両方の出力を示しています。弊社の波長掃引チューナブルレーザーを使用して、3-pmの分解能で測定しましたが、測定時間は1秒間でした。従来型のステップ測定システムでは、3分の1の分解能でも、この半分の波長帯を測定するのに何時間もかかりました。

## 2. 波長掃引システムの構築

波長掃引システムの構築はシンプルです。ステップ測定システムとほぼ同じ装置、つまりチューナブルレーザー光源、実験対象のデバイス（DUT）、パワーセンサ、データ取得システムが必要です。ステップ測定システムとは、光源と検出器に関する特定の要件のみが異なります。波長掃引システムでは、レーザー光源の波長が常に一定の速度で掃引され、その間に出力が記録されます。そのため、コンポーネントの調整時の変化を観察するのに十分な速度であるOSAの速度で、高分解能のスペクトル図を得ることができます。デバイスの透過率、反射率、偏光効果を波長の関数として測定するための代表的なシステムセットアップを図3に示します。（単純化するため、データ取得システムは描かれていません。）

**チューナブルレーザー光源**：波長掃引システムの最初に配置する、最も重要なコンポーネントはチューナブルレーザー光源です。この光源は、非常に直線性の高い、反復可能なモードホップのない走査が可能である必要があります。New Focus™ TLB-6600チューナブルレーザーはそれに該当する光源です。波長掃引測定専用設計されており、駆動設計を組み込んでいますので、CバンドとLバンドを超えるモードホップフリー波長領域全体で、高いリニアリティと再現性を有する走査を行えます。線形性からのピーク波長の偏差は、±20 pmが代表値です。

その他の重要なチューナブル光源の特徴は、トリガー信号です。スイープ時に、トリガー電気信号がデータ取得システム（コンピュータまたはオシロスコープ）にアラートを出し、データの取り込みを開始します。トリガー精度とジッターが、レーザーのリニアリティからの偏差とともにシステムの波長精度を決定します。

リアルタイムで観察している場合、各走査間の波長再現性も重要な要素です。精度が低いと、走査ごとに波長データがシフトし、スプリアスシフトからリアルタイムの変化を判断することが困難になります。TLB-6600の各走査間の波長再現性の代表値は±2.5 pmであり、最大でも±15 pm未満です。

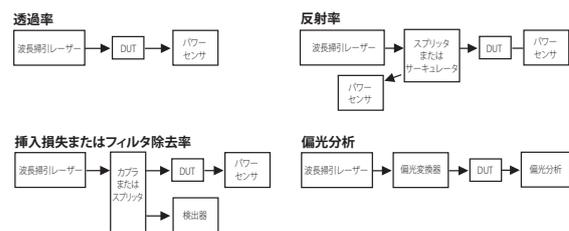


図3：代表的な波長掃引測定のセットアップ。デバイスの透過率の測定（例：フィルタ形状、中心波長、チャンネル間隔の測定）、挿入損失またはフィルタ除去率の測定、デバイスからの反射率またはその戻り光の測定、さらには偏光効果の分析に使用できます。挿入損失またはフィルタの除去率を測定するためのセットアップでは、リファレンス検出器の出力を使用して、レーザーからの強度変動と、検出器の波長依存感度変化を標準化します。

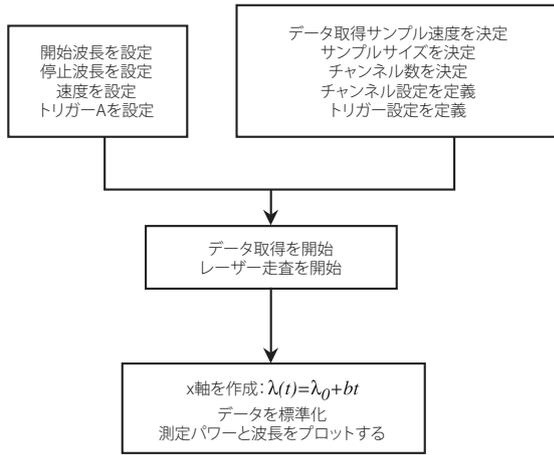


図4：代表的な測定スキームのセットアップ。レーザーの前面管理パネルから手動で設定することも、LabVIEW™などのソフトウェアを介して行うこともできます。

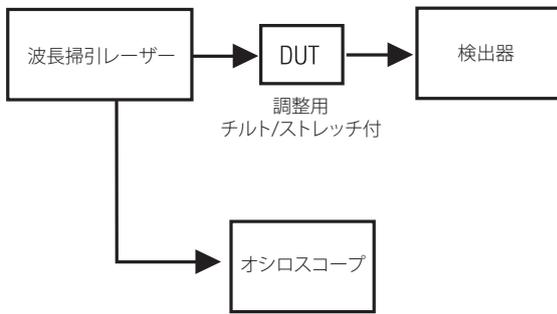


図5：波長掃引システムでは、レーザーは目的の波長帯域でスイープし、電気的な波長トリガーを提供するようにプログラムされます。

アプリケーションノート 11: 波長掃引実験：パッシブ型ファイバ光学コンポーネントにおける波長掃引特性評価の理解

波長掃引システムでは、レーザーは時間に対して波長をスイープしますので、オシロスコープのx軸は波長を表します。

チューナブル光源の最後の検討事項は、出力パワーの安定性です。走査時のパワー平坦度と、各走査間のパワー再現性という2つの観点があります。走査時のパワーの平坦度とは、単一波長を読み取る間の出力パワーの一定度であり、一回の走査を対象としている場合に重要な仕様です。各走査間のパワー再現性とは、レーザーが何度も波長を読み取る時の出力パワーの安定度を指します。これはリアルタイムの実験を行う場合は特に重要です。なぜなら、各走査間のパワー変化は、レーザーパワーの変動ではなく、デバイスの変化のように見えるからです。

**パワーセンサ**：実験対象のデバイスを除き、波長掃引システムに必要な2番目のコンポーネントは、パワーセンサです。複数のチャンネルをモニタリングする場合、複数のパワーセンサが必要になります。

New Focus™の高ダイナミックレンジ (HDR) パワーセンサは、波長掃引測定に理想的です。ほとんどの従来型のパワーセンサは、今日の波長掃引レーザーの100-nm/sのスイープ速度には遅すぎるか、低ノイズシステムに必要な十分な感度がありません。モデル210Xは、弊社

のTLB-6600などの波長掃引レーザー用に特別に設計されていますので、応答速度が速く、広範な波長帯と光出力範囲に対応する感度を有しています。

**データ取得システム**：データの記録と保管を行うのに最適な方法は、データ取得 (DAQ) ボードの後にコンピュータを接続したデータ取得システムを使用することです。弊社が推奨するDAQボードのひとつは、National Instruments™のAT-MIO-16XE-10です。最大100-kS/sの16ビットの分解能を持ち、シングルエンドのアナログ入力を16または64から選択できます。

3. 測定を行う

**オシロスコープの使用**：相対測定では、図5に示す装置を使用して、リアルタイムの高分解能のデータを観察します。この例では、レーザーは対象となる波長帯でスイープするようにプログラムされています。光学出力は実験対象のデバイス (DUT) に送られ、次に検出器に送られます。検出器からの出力が、レーザーの波長トリガー出力によりトリガーされたオシロスコープで表示されます。波長トリガーの安定性とレーザー走査の再現性により、オシロスコープに表示される動きがDUTのスペクトル変化によるものであることを確実にします。

**コンピュータの使用**：データの保管または標準化、あるいはその両方を行う場合、コンピュータを使用してレーザーが目的の波長帯でスイープするときのデータを収集する必要があります。この場合、電気トリガーを使用して、コンピュータによるデータの読み取りを開始します。

4. データの解釈

時間を波長に変換：波長掃引手法では、レーザーは時間に対して波長をスイープするので、オシロスコープのx軸が波長を表します。次の式を使用して、時間を波長に変換できます。

$$\text{波長} = \text{開始波長} + \text{走査速度} \cdot \text{走査開始からの経過時間}$$

波長精度の決定：

高い波長精度が必要なアプリケーションでは、支給される電気トリガーではなく、光学リファレンスをトリガー光源として使用します。たとえば、図7に示すようにアセチレンガスの光吸収線を使用することで、絶対トリガー精度は±20 pmから10 pm未満にまで向上できます。このセットアップでは、レーザーの出力強度の一部を迂回させ、アセチレン吸収セルを通過させた後で検出します。波長リファレンスセルは、NIST (特に#SRM2517)、Ophos (ph:301-926-0589) および波長リファレンス (ph:503-632-5240) などの多様な光源から取得できます。出力光はデータ取得システムの入力側のひとつに送られます。

代表的な最小検出アルゴリズムを使用することで、電気トリガーではなく最小吸収量のひとつをリファレンストリガーとして使用できます。これにより、全体的なトリガーのジッターが、10 pm未満に向上します。このセットアップでは、全体的な波長精度は±20 pmの範囲内であり、主にスイープの直線性とRWA曲線により制限されます。

さらに性能を向上させるための鍵は、スイープ直線性を検出することです。スイープ直線性は、最適時の平均速度と、平均速度からの瞬間的な偏差の2つの要素から成ります。両者は、DUTで波長を測定しながらエタロンを通過する光の透過率を測定することで測定できます。効果的でシンプルなエタロンは、角度を付けていない短いファイバ（0.1~1 m長のFC/PCコネクタ付ファイバ）を、2本のAPCコネクタ付ファイバ（1本はレーザー光源のコネクタであり、もう1本は検出器に接続するコネクタ）の間に置いたものです。レーザー波長がスイープするにつれ、エタロンを通過する透過率は、波長の関数として次の式で求めることができます。

ここで、

**R**は端面の反射率であり、**n**は屈折率であり、**l**はファイバ長、**λ**は波長です。

図9は、ファイバ長0.1mのときに、波長の関数として透過率がどのように変化するかを示しています。透過率は、 $2nl/\lambda$ が整数のときに最大となります。従って、ピークを検出し、ピーク間の間隔を測定することで、ピーク間の平均速度を決定できます。さらに、実際のピークは周波数マーカースです。瞬間的な相対波長変化を決定します。この安価なエタロンを使用することで、平均速度と相対波長変化の両方を測定することができ、その結果直線性からの偏差を測定できます。

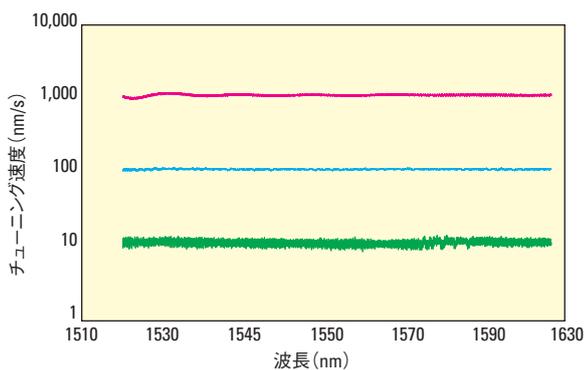


図6：1,000 nm/s、100 nm/s、10 nm/sでのチューニングリニアリティ。この出力は弊社の波長掃引チューナブルレーザーからの出力であり、走査する長さに対して、チューニング速度がその設定値からどのように変化するかを示しています。

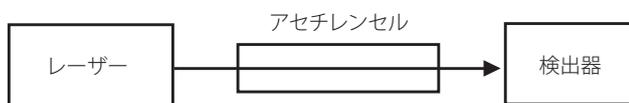


図7:アセチレンセルのような光学リファレンスを使用して、トリガー精度を改善できます。

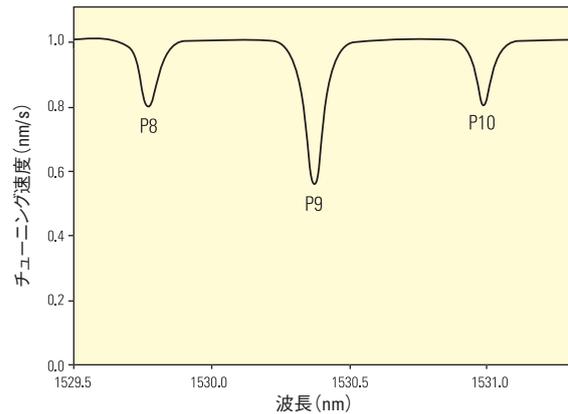


図8：図7で示したセットアップを使用したときのアセチレンの吸収線

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)}$$

$$\delta = \frac{4\pi n l}{\lambda}$$

アプリケーションノート 11: 波長掃引実験：  
パッシブ型ファイバ光学コンポーネントにおける波長掃引特性評価の理解

### チューニングリニアリティ—光学

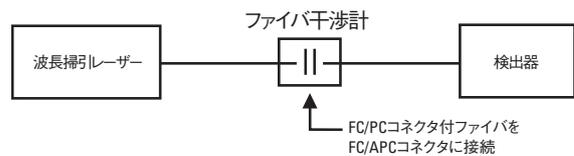


図9：FC/PCコネクタ付の長さ0.01~1 mのファイバを使用した、レーザーのスイープ直線性の測定。

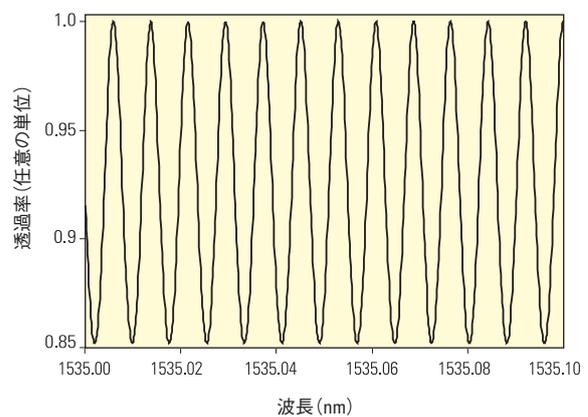


図10：0.1 mのエタロンを使用した場合の波長の関数としての透過率。R=0.04、n=1.5、l=0.1mとし、上記の式により求めた。

### チューニングリニアリティ分析



図11:平均チューニング速度を決定する方法を示すブロック図。