

時間平均法によるパルス光のスペクトラム測定技術の開発

甲斐宗一郎 Soichiro Kai, 上野真樹 Maki Ueno, 森本晋司 Shinji Morimoto, 中河原僚介 Ryosuke Nakagawara, 瀬戸伸一 Shinichi Seto

〔要 旨〕 テレワークの定着化、エンターテインメントのオンライン化などを背景にしてネットワークは引き続き高速化が求められている。ネットワークの高速化を支えるため、LD の高ビットレートに伴う高出力化により、LD チップ製造における検査時の発熱が課題となっている。この課題を解決するため、パルス光によるスペクトル測定の要求が顕在化しているが、従来の測定方法では安定した測定結果と短時間での測定を両立できなかった。光スペクトルアナライザ MS9740B で、時間平均法を用いて、高速かつ安定してパルス光のスペクトルを測定できる測定技術を開発した。

1 まえがき

近年、データセンタ向け高ビットレート光トランシーバ、光センシング用光源、LiDAR(Light Detection And Ranging)などに用いるDFB-LD(Distributed FeedBack - Laser Diode)には、更なる高出力化と高信頼性が望まれている。

これらの高出力 DFB-LD は光スペクトルアナライザを用いて評価されるが、LD を発光させた際に、LD チップ内の熱の滞留による温度上昇によって、波長ズレや光レベルの低下などのスペクトル特性の変化を引き起こす(図 1)。

そのため、LD チップの温度上昇の影響を抑えながら、ピーク波長、ピークパワー、SMSR(Side Mode Suppression Ratio)などの発光スペクトルを評価する方法としてパルス光測定が用いられる。

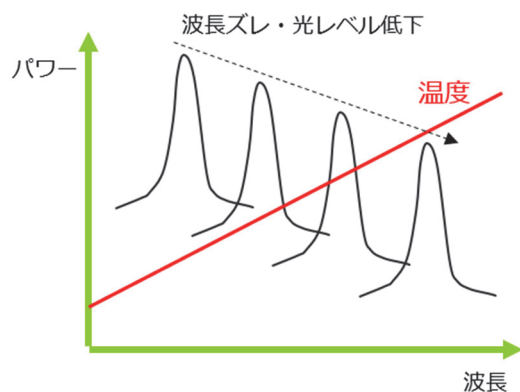


図 1 LD チップの発熱に伴うスペクトル特性の変化

通電させる時間とさせない時間を交互に設けながら周期的な発光を行うことで、CW 発振時と比べて LD チップの温度上昇を抑制することができる(図 2)。

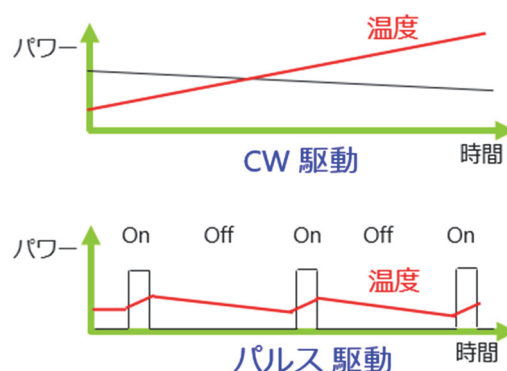


図 2 CW、パルス駆動時の LD チップ温度上昇変化

将来にわたって LD の高出力化が進んでいく中で、光スペクトル特性の測定・検査時に、このパルス発光を行うことが不可欠になると想定される。特に、LD チップ製造検査では生産性の向上が重要視されており、より正確に、より短時間で SMSR を測定することが要求されている状況がある。

2 パルス光測定手法

パルス光測定手法としては、「外部トリガ測定」、「ピークホールド測定」、「時間平均スペクトル測定」の 3 種類の測定法があり、表 1 にメリット、デメリットを記載する。

- ・外部トリガ測定法
パルス光の発光タイミングに同期させて光スペクトルを測定する。
- ・ピークホールド測定法
トリガ信号を必要とせず、一定期間の最大パワーを保持し、光スペクトルを測定する。
- ・時間平均スペクトル測定法
トリガ信号を必要とせず、一定期間取得したデータを平均化して、光スペクトルを測定する。

表 1 パルス光測定手法の比較

測定法	メリット	デメリット
外部トリガ	パルス光に同期させることで、再現性の高い測定を実現可能。 ピークパワーを測定可能。	光スペクトラムアナライザの分光制御部で駆動と制動を繰り返す必要があるため、測定時間が長くなる。
ピークホールド	トリガ信号が不要。 ピークパワーを測定可能。	ピーク信号を保持するため、ノイズレベルが増加する。
時間平均スペクトラム	トリガ信号が不要。 測定制御をパルス光向けに最適化することで、短時間かつ安定して光スペクトラム測定が可能。	加算平均処理を行うため平均パワーが測定され、ピークパワーが測定できない。

3 時間平均スペクトラム法によるスペクトル測定技術の開発

3.1 LD チップ製造検査における光スペクトラムアナライザへの要求

LD チップ製造検査では生産性の向上が重要視され、より正確に、より短時間で SMSR を測定することが要求される。これらの要求に応えるべく、SMSR を短時間かつ安定した測定が可能なる方法としてパルス法によるスペクトル測定を選択した。

3.2 設計の要点

設計の要点を以下に示す。

- ・ SMSR 再現性 2.8 dBp-p, 周波数 5 kHz, duty 比 1%を実現する。
- ・ 非同期測定(トリガレス)を実現する。
- ・ CW 光測定時と同等の測定時間を実現する。
- ・ MS9740Bを用いたシステムに容易に適用できるようにする。

3.3 光スペクトラムアナライザの機能ブロック図

本器の機能ブロック図を図 3 に示す。

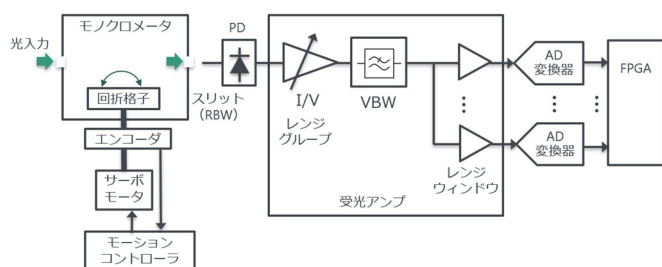


図 3 光スペクトラムアナライザの機能ブロック図

被測定光を回折格子で分散分光し、スリットを通過した光を PD で光電変換し、受光アンプで増幅した信号を AD 変換する。回折

格子を回転させることによって測定波長を選択することができる。

本開発における測定では、測定時間を短縮させるため、波長掃引（波長を連続的可変）しながら、パルス光のスペクトル測定を行う方法を採用した。

したがって、波長掃引のタイミングと非同期のパルス光を測定するタイミングを制御することが重要になる。

また、受光アンプも測定時間を短縮させるため、広いレベル範囲（レンジウィンドウ）を同時に AD 変換できる構成とし、被測定光の強度に応じて信号のゲイン（レンジグループ）を変えられるようにした。

3.4 ソフトウェア処理

パルス信号と平均化の範囲との関係を図 4 に示す。平均化の範囲では、AD 値読み込み周期ごとに、ソフトから指定された平均化ポイント数分取得し平均化する（これを平均化ウィンドウとする）。

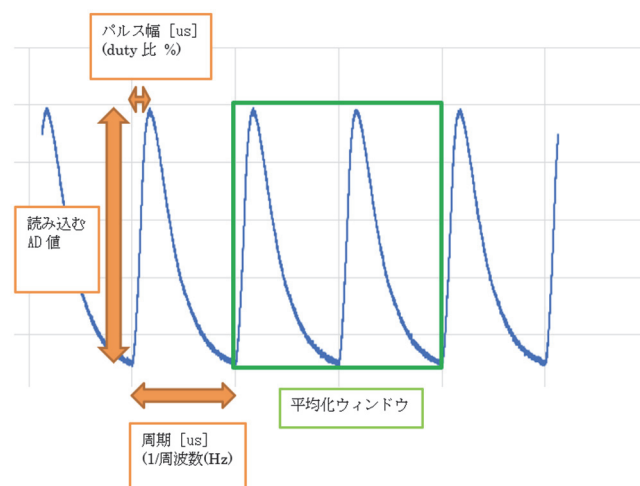


図 4 パルス信号と平均化ウィンドウとの関係

平均化ポイント数は、パルス周期の整数倍の時間を AD 読み込み周期で割った値とする。例えば、被測定パルス光のパルス周期 200 us（パルス周波数 5 kHz）、パルス幅 2 us（duty1%）、VBW 1 kHz の場合、1 ポイント当りのサンプリング処理時間を考慮し、サンプリング間隔を 4 us とした。平均化ポイント数（図 5）に示すように、サンプリング時間が被測定パルス光のパルス周期の整数倍となるような数とし、今回は測定時間短縮のために、サンプリング時間がパルス周期の 2 周期分に相当する平均化ポイント数（=100）になるように設定した。

$$\text{平均化ポイント数} = \frac{\text{パルス周期整数倍の時間}}{\text{AD 読み込み周期}}$$

図 5 平均化ポイント数を算出する式

受光アンプのレンジ切り替えを極力抑え、広いレベル範囲を高速測定できるように、50 dB のレベル範囲を一括測定できるレンジ

ウィンドウと、入力レベルに応じて 10 dB ずつ 6 段階にレンジウィンドウを切り替えることができるレンジグループによって、受光アンプ構成とした。レンジウィンドウとレンジグループの関係を図 6 に示す。これにより、+10〜-90 dBm までの高速測定が可能になる。

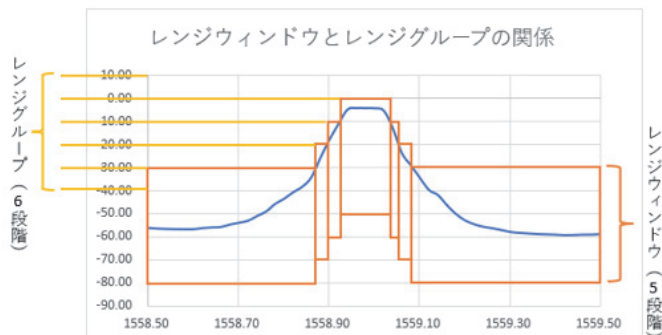


図 6 レンジウィンドウとレンジグループの関係

適切なレンジウィンドウ内で測定データが得られるように、各測定ポイントにおいて多数のサンプリングデータからレベル平均値とレベル最大値を取得できるようにし、レベル最大値を元に最適なレンジグループを設定するようにした。

レベル平均値とレベル最大値を取得する処理は、FPGA(Field Programmable Gate Array)によって高速化を図った。

また、GUI にて Pulse Mode を On/Off できる機能を追加した。オプション有効時の設定画面を図 7 に、波形表示時画面を図 8 に示す。

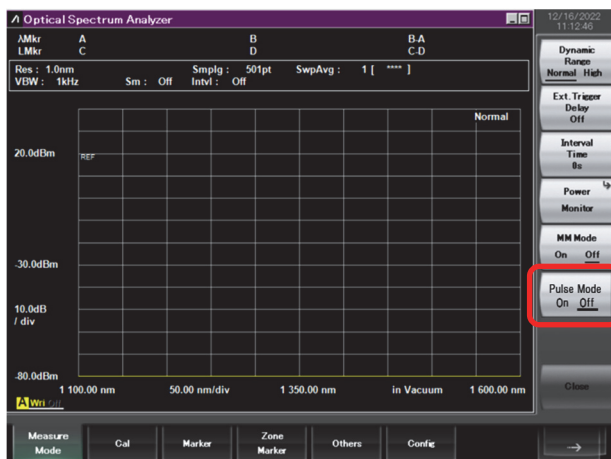


図 7 Pulse Mode 機能追加

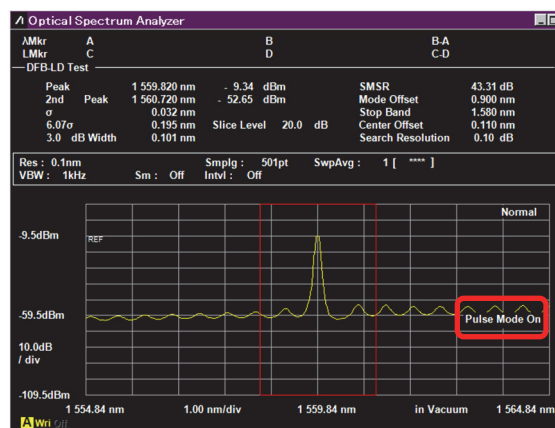


図 8 波形表示画面

以上より、ユーザはバージョンアップとオプションの購入だけで、ハードの追加なしに Pulse Mode を使用できるようになる。

3.5 FPGA による時間平均処理の実現

時間平均の処理は FPGA にて実施している。時間平均のサンプリング点は図 9 のように、波形を構成するサンプリング点に対して、より短周期に取得した複数の AD データ点を平均化して導出される (A/D コンバータから出力された被測定信号光のレベルのデジタルデータを AD データ点と呼称)。

AD データ点は、時間軸で考えたとき対象のサンプリング点を中心として前後の複数点を平均化に使用する。具体的には、3.4 章で述べたとおり、AD データ点の間隔は 4 us、平均化ポイント数は 100 を使用する。3.4 章で挙げた被測定パルス光条件においては、図 9 の平均化ウィンドウ内に図 4 に示す 2 周期分のパルス光が入ることになる。

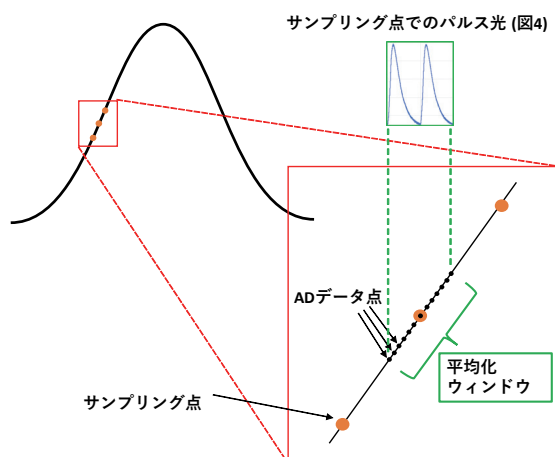


図 9 時間平均の概略図

上記の動作を実現するための FPGA の動作を記述する。

図 10 に示すように、FPGA の内部には AD データ点の値を保管する RAM, RAM Controller, Calculation Process のモジュールを備える。Firmware は平均化処理に対して種々の設定値を与える。

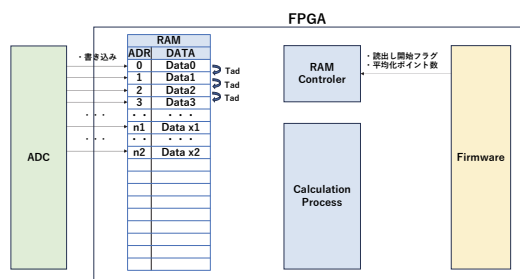


図 10 FPGA 内部動作 1

FPGA は Firmware の動作に関わらず、A/D コンバータから常に一定の周期 T_{ad} で値を読み出し、RAM に格納する。RAM はリングバッファの構造を取り、RAM が埋まったら古いデータから上書きする。Firmware のタイミングではなく、FPGA が独立で A/D コンバータから RAM への書き込みを行うことで、Firmware からサンプリング点のデータの要求が来たときに、すでに過去の点が保存されているため、過去の点を平均化に使用できるメリットがある。

波形のサンプリング点を取得するタイミングになると、Firmware から読み出し開始フラグと平均化ポイント数の情報を受け取る。RAM Controller は、読み出し開始フラグを受け取ったタイミングの RAM の書き込みアドレス $n2$ から平均化ポイント数 $\div 2$ のアドレス分追加で RAM に書き込まれるまで待つ。

図 11 にデータ書き込み待ち後の動作を示す。RAM のアドレス n3 まで書き込み待ちが終わったら RAM の読み出しを開始する。アドレス n1 (= n2 - 平均化ポイント数 ÷ 2) ~ n3 (= n2 + 平均化ポイント数 ÷ 2) のデータを順次読み出し、Calculation Process のモジュールへ渡す。Calculation Process では読み出したデータを加算していき、最後に平均化ポイント数で割り、平均値を導出する。また、RAM から読み出したデータの中から最大値も抽出する。導出した平均値と最大値は Firmware に渡す。最大値は Firmware のレンジング処理に使用する。

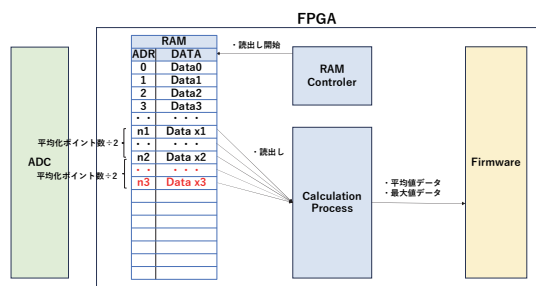


図 11 FPGA 内部動作 2

以上の動作より、サンプリング点を中心として時間軸の前後の複
数点を平均化することができる。

平均化に使用する AD データ点について、サンプリング点の前

後とした理由として処理時間およびサンプリング点の理論値との誤差の観点から考える。

表 2 より平均化に使用する AD データ点がサンプリング点より前のみしかない場合と後ろしかない場合、または前後の場合の 3 つの方式で比較する。

表2 AD データ点の位置関係に応じた利点と欠点

	平均化に使用する AD データ点	処理時間	理論値との誤差
A	サンプリング点の前のみ	○	△
B	サンプリング点の後ろのみ	×	△
C	サンプリング点の前後	△	○

FPGA の動作の観点から、サンプリング点に達して Firmware から平均化の要求が来たときに、サンプリング点より後ろのデータは追加で A/D コンバータから RAM へ書き込む時間待たなければいけない。そのため、サンプリング点の前だけの場合は待ち時間が少ないため一番早い。対して後ろのみは平均化ポイント数だけ待つ必要があるため時間がかかり、前後の場合は平均化ポイント数の半分なので、処理時間的には中間に位置する。図 12 に、サンプリング点が n の場合の各方式の処理時間の比較図を示す。

A: サンプルング点の前のみ B: サンプルング点の後ろのみ C: サンプルング点の前後

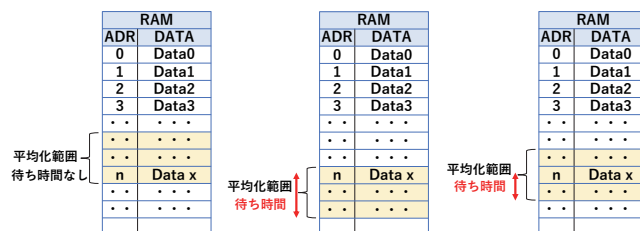


図 12 処理時間の比較

理論値との誤差という観点でいうと、平均化ポイント数にもよるが、元々のサンプリング点を中心としている前後の場合が、対象のサンプリング点の平均パワーの理論値に対して、一番誤差が少ない。前のみあるいは後ろのみの場合は、前後の場合と比較して、平均パワーが理論値と比較して低い、もしくは高くなり、より平均パワーの誤差が大きくなると考えられる。図 13 に、各方式の理論値との比較図を示す。

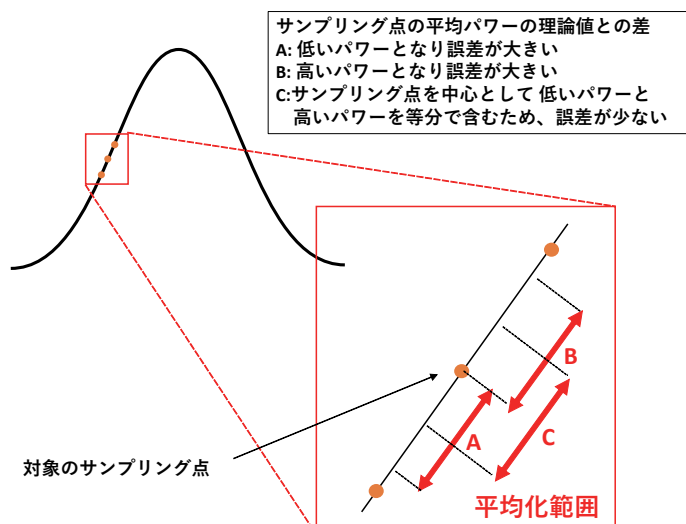


図 13 サンプリング点の平均パワー理論値の誤差比較

以上よりある程度の処理速度を持ち、誤差が少ない、表 2 の C「サンプリング点の前後」を本方式では採用した。

4 結果

時間平均法と、従来の測定手法である外部トリガ、通常掃引の結果を表 3、図 14 に示す。時間平均法により、SMSR の安定性は通常掃引手法より高く、掃引時間は外部トリガ手法より高速となり、結果の安定性と測定時間の改善を確認することができた。

表 3 時間平均法と従来手法との結果の比較

パルス光測定方法	SMSR 値 [dB]	SMSR 安定性 [dBp-p]	測定時間 [sec]
時間平均法	44.00	0.31	0.482
外部トリガ	43.94	0.10	1.172
通常掃引	31.92	46.82	0.450

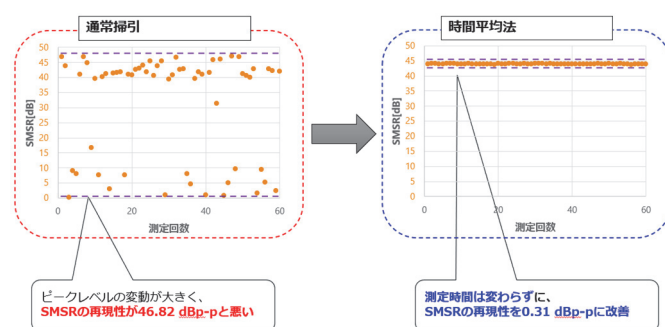


図 14 時間平均法と通常掃引の SMSR 安定性の比較

5 むすび

ネットワークの高速化・大容量化に伴い光トランシーバの高出力化および製造市場におけるパルス光測定の需要が高まる中、課題となる光スペクトラム測定に対して、高速かつ安定した測定が可能な時間平均法によるパルス光測定技術を開発した。

今後、更なるパルス光の測定手法の向上により、光ネットワークの発展へ貢献をしていきたい。

執筆者



甲斐 斐 宗 一 郎

計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



上野 真 樹

計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
ソリューションマーケティング部



森本 晋 司

計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



中河原 僚 介

計測事業グループ計測事業本部
サービスインフラストラクチャーソリューション事業部
商品開発部



瀬戸 伸 一

エンジニアリング本部
エンベデッド技術部

公知