

Application Note:

HFAN-02.6.0

Rev. 4; 12/08

低速(<622Mbps)光トランスミッタの
ノイズとワンダの低減

低速光トランスミッタのノイズとワンドの低減

1 はじめに

マルチギガビットのデータレート(2.7Gbps)で動作する光モジュールを設計するときには、困難な課題が発生しやすくなります。適正な高速動作を得るためには、インダクタンス、インピーダンス、および寄生容量について十分な配慮が必要です。一方、低データレート(<622Mbps)で動作するときには、出力バイアス、ドループ、およびワンドによる、別の課題が生じます。これらの影響は特に、連続同一ビット(CID)が長時間にわたって続く SONET アプリケーションで大きくなる可能性があります。

このアプリケーションノートでは、低速(<622Mbps)光トランスミッタにおいて垂直アイクロージャが生じる一般的な原因について取り上げます。また、トランスミッタの診断に役立つ、設計に関する提案とテストを提示し、性能向上のための方法も提示します。

このアプリケーションノートでは、主として MAX3735A と MAX3646 に焦点を当てます。これらのデバイスは一般に、マルチレート(155Mbps~2.7Gbps)と低データレート(≤622Mbps)のアプリケーションで使用されているからです。

2 テストシステムの検証

光モジュールに関する問題をデバッグする前に、システムそのものが認識された問題の原因でないことを検証することが重要です。多くの場合、性能の低下は、テストのセットアップやテストのセットアップへの接続部によるものです。テストシステムによって引き起こされるアイダイアグラムの垂直アイクロージャの一般的な原因としては、以下が考えられます。

1. O/E コンバータのノイズ/過剰な帯域幅
2. O/E コンバータまたはスコープの不十分な帯域幅
3. O/E コンバータの入力パワー/利得
4. ファイバ接続部の汚れ

2.1 O/E コンバータのノイズ/過剰な帯域幅

テストシステムを準備するときには、使用する光-電気(O/E)コンバータのノイズ出力が測定しようとするノイズレベルより必ず低くなるようにしてください。多くの場合、適切な帯域幅を備えたコンバータを選択することで、このレベルを達成することができます。帯域幅が非常に高い(>10 倍の データレート)場合、コンバータの内部ノイズのためにコンバータの出力端で過剰ノイズが発生する場合があります。ただし、適切な帯域幅を備えたコンバータであっても、その設計によっては、過剰ノイズを生じる場合があります。コンバータのノイズが十分に低いことを確認する簡単な方法は、光入力切り離し、入力信号のない状態でノイズ出力を測定することです。

2.2 O/E コンバータまたはスコープの不十分な帯域幅

O/E コンバータまたはこれに接続するスコープチャネルの帯域幅が不十分なことも、垂直アイクロージャの原因になる可能性があります。システムを連結する場合、O/E 帯域幅が少なくとも 0.75 倍のデータレート(たとえば 155Mbps で動作する場合は 117MHz)であること、またスコープおよび電気的な相互接続部の帯域幅が少なくとも 1~2 倍のデータレートであることを確認してください。

2.3 O/E コンバータの入力パワー/利得

適切な帯域幅を備えた低ノイズ O/E コンバータを選択したと仮定すれば、引き続きコンバータに加えらる光入力パワーが適切な動作範囲内にあることを確認する必要があります。過剰なパワーが加えられた状態でコンバータが動作すると、アイクロージャや歪みが生じ、場合によってはコンバータが損傷するおそれがあります。逆に、入力信号が極めて小さい状態で動作すると、オシロスコープで見たとき、コンバータ/システムのノイズに対する信号の相対的な振幅によってアイダイアグラムにノイズが生じます。

同様に、光-電気コンバータの出力がオシロスコープのヘッドの入力範囲に対応している必要があります。また、オシロスコープの入力端で適切な信号レベルを得るためには、コンバータの利得に応じて、低ノイズアンプ(利得が不十分な場合)またはアッテネータ(利得が過剰な場合)を必要とする場合があります。

2.4 ファイバ接続部

いずれの光システムでも同様ですが、測定を行う前に、ファイバおよびコネクタを清掃しておく必要があります。接続部には、ほこり、かす、湿り気がないようにしてください。適正なタイプのファイバ(マルチモードまたはシングルモード)を使用していることを確認してください。シングルモードファイバの代わりにマルチモードファイバを使用すると、余分な光モード歪み/ノイズが発生する場合があります。またマルチモードファイバを使用すべき箇所にシングルモードファイバを使用すると、O/E コンバータでの光信号が予想よりはるかに小さくなり、前述のような「ノイズ」がアイに生じる場合があります。

3 ベースラインワンダ

ベースラインワンダは、SONET パターンで動作するマルチレートまたは低データレートの光モジュールでアイクロージャが生じる最も一般的な原因です。SONET パターンでは、連続同一ビット(CID)が長時間にわたって続きます。また、データの遷移密度が時間とともに変化します。これら 2 つの要因によって、データパターンが極めて低周波の成分で占められることとなります。システムが正しく動作するためには、この低周波成分を通過させることが必要となります。

システムで減衰を最小限に抑えてパターンの低周波成分を通過させることができるようになるには、トランスミッタの低周波カットオフがパターンの低周波成分より低くなくてはなりません。ベースラインワンダの詳細については、参考資料 [1](#)および [2](#)を参照してください。

トランスミッタの低周波カットオフは、入力端や自動パワー制御ループで使われるコンデンサ、およびレーザドライバとレーザ間のインタフェースで使われる AC 結合コンデンサ(使われている場合)の値に影響を受けます。MAX3735A と MAX3646 のレーザドライバの高利得と制限特性を考慮すれば、通常、SONET タイプのパターンを使用するときの 155Mbps の動作については、0.22 μ F~0.47 μ F のコンデンサで十分で

す。ただし、出力構成や APC ループの選択によっては低周波カットオフが生成される可能性があり、これによって適切に設定することがより困難になるおそれがあります。

3.1 ベースラインワンダ(出力構成)

MAX3735A³とMAX3646⁴のレーザドライバが提供する出力は、+3.3Vの電源⁵を使用してレーザにDC結合することが可能です。このタイプの出力は低周波カットオフポイントを取り入れていないため、SONETパターンを使用して 155Mbpsで動作するような低周波アプリケーションに理想的です。ただし、システムによっては、DC結合のインタフェースで得られるよりも大きな変調電流を必要とする場合があります。この場合には、AC結合が必要です。

マルチレートのトランスミッタモジュールもAC結合出力をよく使用しますが、これは、マルチギガビットの動作で最大限の性能が得られるように差動でレーザを駆動することができるようにしています。ただし、ほとんどの場合、これら出力の低周波カットオフは、低データレートで適正な動作を行うには高すぎるものです。カットオフポイントを低くすることはできますが、たいいてい、値の大きな(および物理サイズの大きな)コンデンサとインダクタが必要となるため、スペースの限られたSFPモジュール⁶に配置することは困難とされます。

ベースラインワンダによって出力が影響を受けるかどうかを確認するための簡単なテストは、多くの低周波成分を含んだパターンから、低周波成分の少ないパターンにテストパターンを変更して出力の変化を調べることです。たとえば、2²³-1 PRBS は、SONET パターンに似た多くの低周波成分を含んでいるため、このタイプの光モジュールをテストするのに適したパターンです。逆に、2⁷-1 PRBS パターンには低周波成分がほとんど含まれていません。

例として、2²³-1 PRBS パターンを用いて 155Mbps で動作させた AC 結合出力の光モジュールを図 1 に示します。このモジュールの設計は、大きなインダクタまたはコンデンサを使用していません。したがって、出力ネットワークの低周波カットオフはかなり高くなっています。結果としてダイアグラムにはかなりの量のアイクロージャが存在します。

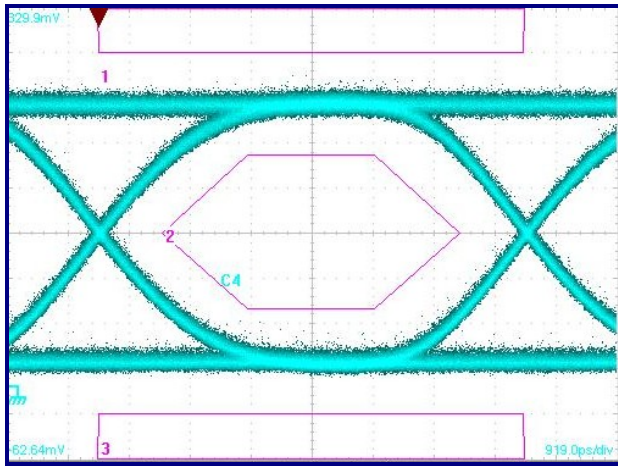


図 1. OC3 (フィルタ処理済み)、 $2^{23}-1$ PRBS

パターンを 2^7-1 PRBS に変更することで、アイダイアグラムがかなり改善されていることがわかります (図 2)。図 1 のダイアグラムにおけるアイクロージャの振幅は、1 および 0 のレベルで類似していることに留意してください。またアイダイアグラムでのジッタのレベルも増大しています。これらの影響は、アイクロージャに関連するベースラインワンダを有するモジュールに一般的なものです。ただし、PRBS のピークワンダは正と負の方向で同じでないため、PRBS シーケンスの極性に応じて、アイダイアグラムに見られるスペクルパターンに違いが生じる可能性があります。

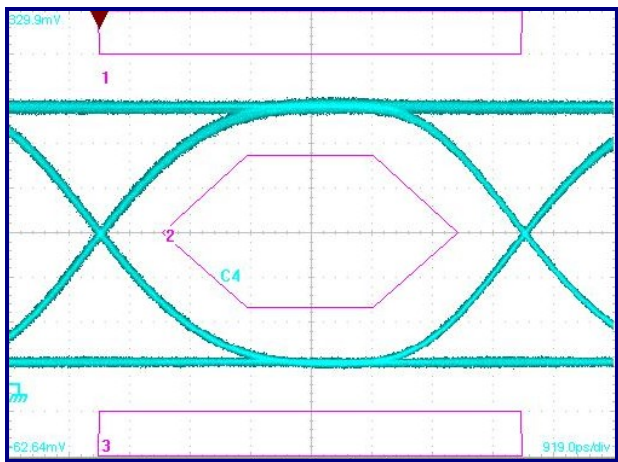


図 2. OC3 (フィルタ処理済み)、 2^7-1 PRBS

ほとんどの場合、ワンダの原因が APC ループによるものか、出力構成の低周波カットオフによるものか、あるいはこの両方によるものかを判断することは困難です。AC 結合出力が使われているケースでは、簡易回路シミュレータを使用して、低周波カットオフを決定し、また性能を向上する(低周波カットオフポイントを

低くする)のに使用すべき値を必要に応じて決定する必要があります。一般的な経験則として、カットオフポイントは、155Mbps で動作する SONET タイプのモジュールで、10kHz 未満にする必要があります。

3.2 ベースラインワンダ(APC ループ)

レーザドライバの自動パワー制御ループ(APCループ)は、データ信号の経路に低周波カットオフを取り入れています。ループコンデンサ(CapcおよびCmd)が低データレートアプリケーション用に正しく選択されていない場合、ベースラインワンダのためアイクロージャが増大することがあります。この影響は、AC結合出力の影響と非常によく似ています。これらの影響の詳細については、参考資料 7を参照してください。

また、APCループのカットオフポイントが応答に影響している場合には、パターンを変更してアイクロージャとジッタの変化を観察することによって容易にその影響を確認することができます。さらに、起こりうる原因としてこれをさらに分離するには、簡単な実験によってアイクロージャを測定し(図 3)、次にCapcコンデンサを 4 倍または 10 倍に増やして再測定します(図 4)。図 3 および図 4 によく似た、著しい応答の変化があった場合、適切な動作を得るためにループコンデンサの値を調整する必要があります。この実験を実施して著しい違いが見られない場合でも、参考資料 7 (MAX3735AとAMAX3646 の場合)をガイドとして使用してコンデンサの値を検証し、ターンオン時間や安定性などのAPCループ関連のその他のパラメータが正しく設定されていることを確認するようにしてください。

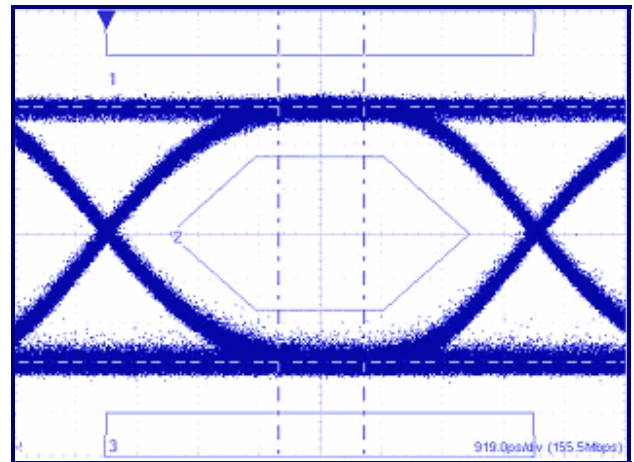


図 3. Optical eye – OC3, $2^{23}-1$ PRBS, $C_{APC} = 0.01\mu F$

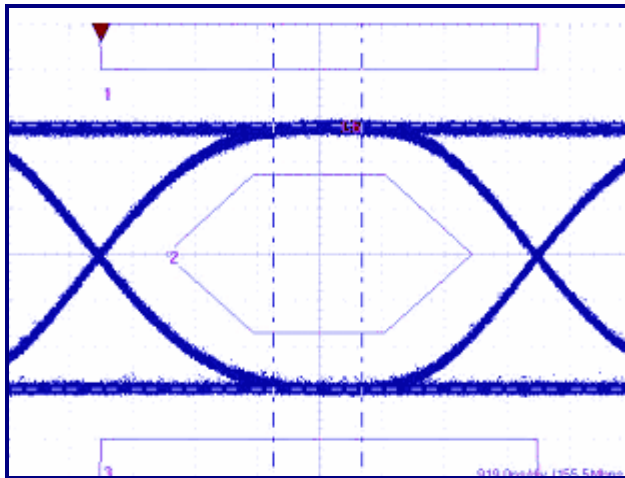


図 4. 光アイダイアグラム – OC3、 $2^{23}-1$ PRBS、 $C_{APC} = 0.1\mu F$

4 レーザドライバ差動出力の不整合

低速トランスミッタの垂直アイクロージャのもうひとつのとらえにくい原因として、レーザドライバ出力の不整合が考えられます。MAX3735A と MAX3646 は、レーザの駆動に差動ペアを使用します。レーザをドライバに接続するには、数種類の方法があります。一般に、DC 結合出力ネットワークには、AC 結合出力ネットワークよりも多くの不整合があります。出力が AC 結合のときには、VCC の近くで各出力にバイアスがかけられているからです。

従来のシングルエンドの DC 結合ドライブネットワークを例として使用すると(図 5)、レーザのカソードは直列抵抗を通じてドライバの OUT+ピンに接続されています。ドライバの OUT-ピンは抵抗を通じて VCC に接続されています。

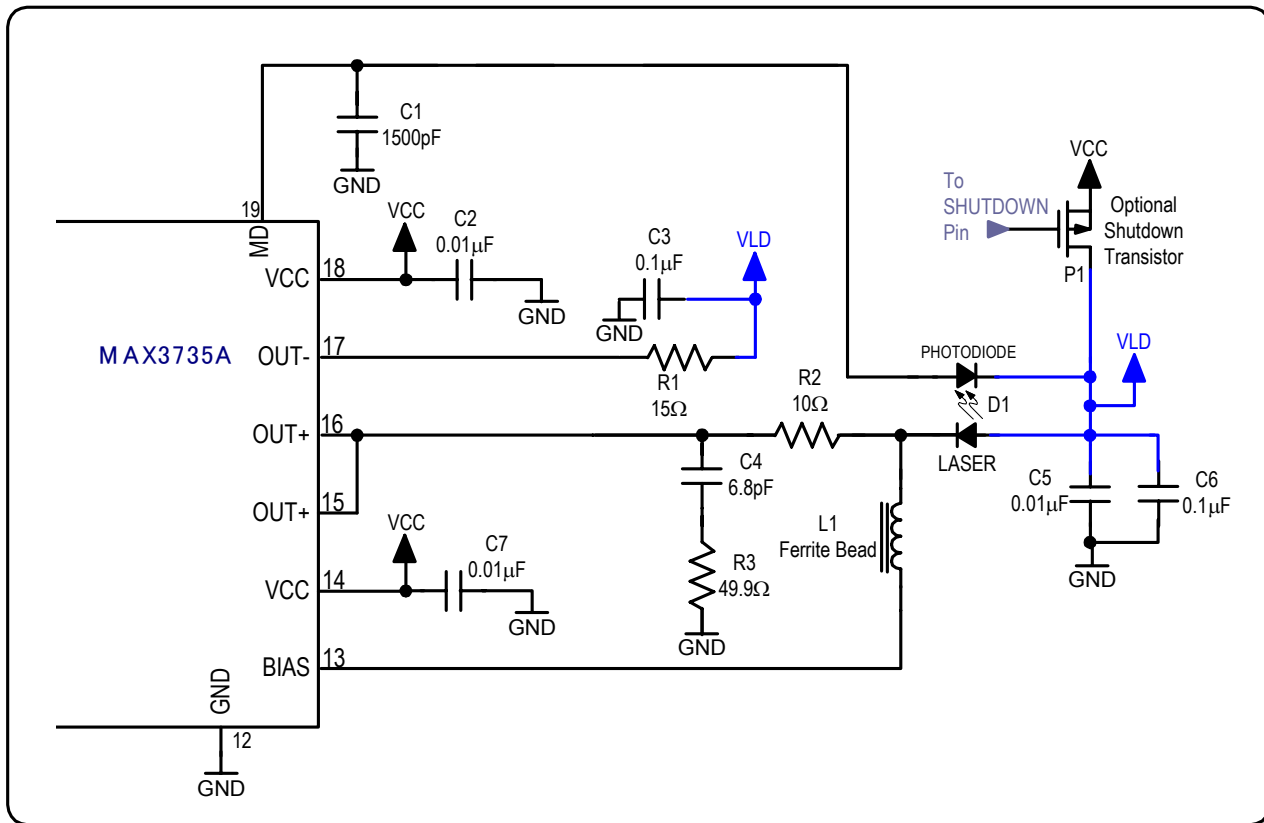


図 5. 標準的な DC 結合のレーザインタフェース

インダクタンスの影響を無視すると、シンク電流のときの OUT+ の電圧は、次のようになります。

$$V_{OUT+} (V) = VCC (V) - VF_{LD} (V) - 10(\Omega) \cdot I_{MOD} (A)$$

(ここで、 VF_{LD} は I_{MOD} の電流におけるレーザの順方向電圧降下です)。

OUT- がシンク電流のとき、電圧は次のようになります。

$$V_{OUT-} (V) = VCC (V) - 15(\Omega) \cdot I_{MOD} (A)$$

$I_{MOD} = 30\text{mA}$ 、 $VCC = 3.3\text{V}$ 、および $VF_{LD} = 1.4\text{V}$ の標準値をこれらの式に代入すると OUT+ 端での電圧は約 1.6V で、OUT- 端での電圧は約 2.85V となります。主としてレーザの順方向電圧降下によって生じるこの電圧の差が、ドライバ出力の不整合をもたらし、結果として CID の長い低データレートで動作するとき垂直アイクロージャをもたらします。この不整合が低データレートでアイクロージャをもたらす理由は、このアプリケーションノートで取り扱う範囲から外れますが、その影響については、図 6 に示したアイダイアグラムに示されています。

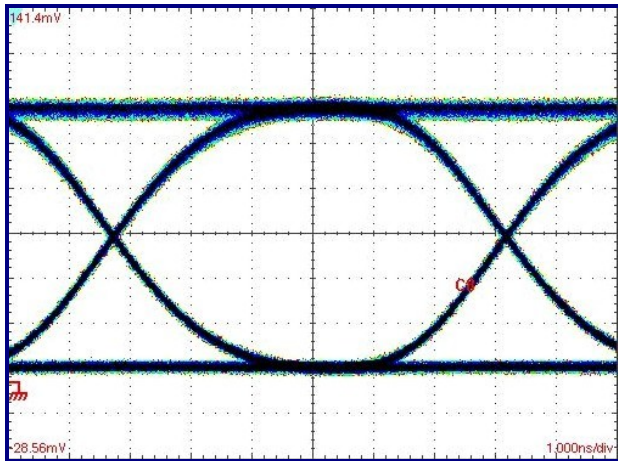


図 6. OC3 (フィルタ処理済み)、 $2^{23}-1$ PRBS、標準構成

ベースラインワンダによるアイクロージャの場合と同様 (低周波カットオフポイントの設定が高すぎる)、 $2^{23}-1$ などの長い PRBS シーケンスにパターンを変更すると、アイクロージャが増大することになります。不整合で生じるアイクロージャの特徴 (ワンダの問題と区別するのに役立つ) は、0 レベルよりも 1 レベルについてわずかに多くの「ノイズ」がアイに生じるということです。このケースの「ノイズ」は実際には、長時間にわたって変調電流がゆっくりと増大することが原因であり、1010 パターンを繰り返した非常に低い周波数を使用して確認す

ることができます (図 7、20ns/div)。PRBS テストパターンを使用してアイダイアグラムとして表示した場合、このゆっくりとした上昇はノイズのように見えます (図 6)。

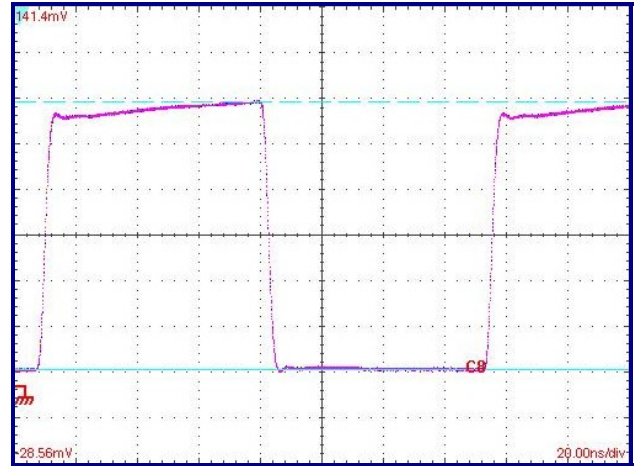


図 7. 1010 の繰り返しパターン、20ns/div、標準構成

アイクロージャがこのような不整合によって生じたものかどうかを判断することができるようにするためのもうひとつの簡単なテストは、VCC のレベルを 3.0V ~ 3.6V の間でゆっくり変化させながら出力を観察することです。ドライバが電圧ヘッドルーム ($V_{OUT+} > 0.6\text{V}$) を切らないと仮定すると、アイ品質は VCC 電圧が減少するにつれて向上します (図 8)。言い換えると、VCC が増加するにつれて 1 レベルの「ノイズ」が増大するということです。

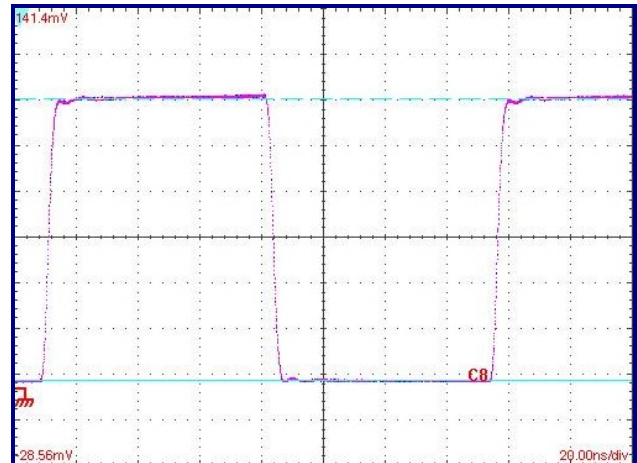


図 8. 1010 の繰り返しパターン、20ns/div、VCC の電圧が低減されています。

OUT- および OUT+ がそれぞれシンク電流のとき、OUT- の電圧を低減させる、あるいは OUT+ の電圧を増大さ

せるという方法はいずれもアイ品質を向上します。例を挙げると、1)抵抗ネットワークを使用して VCC より低い電圧に OUT-を末端処理する。2)大きな抵抗値を OUT-ピンで使用し、小さな抵抗値を OUT+ピンで使用する。あるいは、3) OUT-と VCC 間に接続された抵抗と直列に、小型で高速のスイッチングダイオードを配置する。これらのケースのいずれにおいても、OUT-と OUT+の瞬間電圧が、これらのピンに対するデバイスの制限値(MAX3735A および MAX3646 では約 0.6V)よりも低下しないようにすることが重要です。OUT-と直列にダイオードを使用すると、図 9 のように結果を向上させることができます。

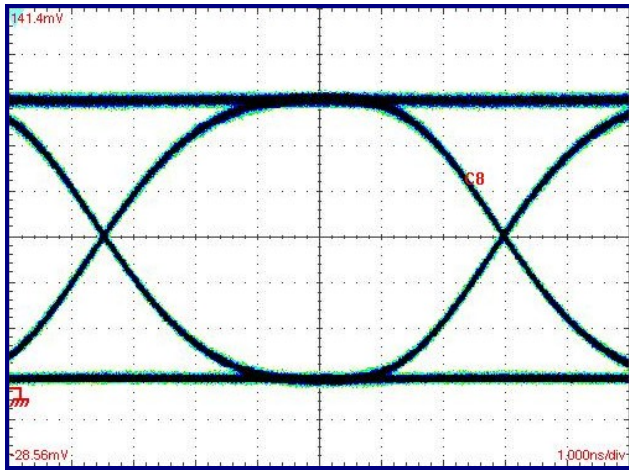


図 9. OC3 (フィルタ処理済み)、 2^{23} -1 PRBS、ダイオードを使用して OUT- の電圧を低減

5 不十分なデカップリング

MAX3735A と MAX3646 のレーザドライバは、コモンアノードのレーザを駆動するように設計されています。標準構成では、直列抵抗を通じてレーザドライバ内の差動ペアのコレクタ(OUT+)にレーザのカソードを接続します。次にレーザのアノードを VCC に接続します。大電流(最大 85mA)をスイッチング可能で、スイッチング電流の遷移レートが極めて高速であると想定した場合、許容可能な高速と低速の動作を得るためには、レーザアノードに十分なデカップリングを供給することが不可欠になります。レーザアノードのノードに過度の電圧ドループがある場合、アイオープニングは減少し、また OUT+ピンの瞬間電圧が 0.6V 以下に低下した場合にはジッタが増大する可能性もあります。

レーザドライバの出力が差動出力であるとする、OUT-も、十分にバイパスされたノードに(可能ならばレーザアノードと同じノードに)末端する必要があるま

す(VLD、図 5)。これによって VCC 上のノイズが低減され、ノイズの少ない光出力信号が得られます。

低周波アプリケーションを設計するときには、レーザドライバのスイッチングレートが、動作データレートや入力遷移時間に関係なく非常に高速であることを覚えておくことが重要です。したがって、上述のドライバについては、約 50ps (20%~80%)の標準遷移時間を念頭に置いてデカップリングを決定する必要があります。低周波アプリケーションでは、SONET アプリケーションで生じる可能性のある長い CID シーケンスの間の電圧ドループをデカップリングキャパシタンスによって最小限に抑えることも重要です。

6 後方反射発振

後方反射発振は、低データレートアプリケーションにのみ関連するものではありませんが、垂直アイクロージャに影響を及ぼす可能性があります。レーザダイオードの光出力は、反射がレージングキャビティに入った場合に、発振状態に移行する可能性があります。この発振を引き起こすメカニズムは、このアプリケーションノートで取り扱う範囲から外れるものであり、ここでの目的としては、発振が存在すること、およびそれが光反射によって引き起こされることを述べるだけで十分でしょう。一般に、DFB レーザは他のタイプのレーザに比べて後方反射の影響を受けやすいレーザですが、発振は FP レーザでも同様に発生する可能性があります。

多くのケースにおいて、1 つまたは複数の光アイソレータがレーザアセンブリに組み込まれており、反射がレージングキャビティに入らないようにしています。発振の周波数は、形状、構造、バイアスレベル、およびレーザの温度に関係しますが、ファイバ通信で使われるエッジ発光のレーザダイオードの場合、一般に > 1GHz になります。これらの発振が起こると、フィルタ処理した出力アイダイアグラムにノイズが見られます。このノイズは、レーザとそのパラメータ/動作条件に応じて、1 レベル、0 レベル、または 1 と 0 の間の安定したレベルで多く見られるようになります。

O/E の帯域幅が発振を取り込むほど十分高くない場合、アイダイアグラムは、O/E 帯域幅の制限によって発振が減衰されるため、わずかなノイズしか生成されません。例として図 10 に示したアイダイアグラムは OC48 の光アイダイアグラムです。図 10 に見られるように、垂直アイオープニングは、ノイズによって減少しています。このケースでの O/E コンバータの帯域幅は 2.3GHz です。

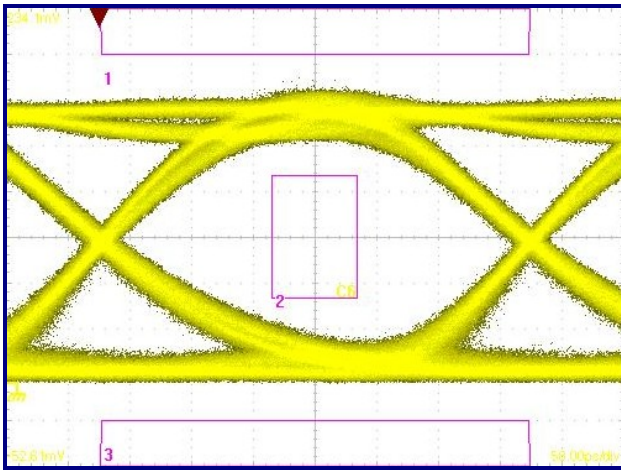


図 10. OC48 (フィルタ処理済み)、 $2^{23}-1$ PRBS

帯域幅が 11GHz の O/E コンバータを用いて表示したときの、同じアイダイアグラムを図 11 に示します。1010 パターンを使用すると、図 12 に示すように発振をよりはっきりと確認することができます(これは、発振がデータに相関付けられている場合にのみ見られることに留意してください。常に当てはまるわけではありません)。

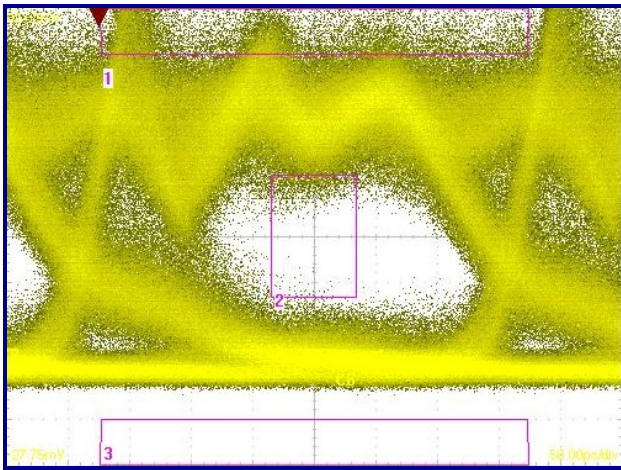


図 11. OC48 (フィルタ処理なし)、 $2^{23}-1$ PRBS、光の発振が見られます。

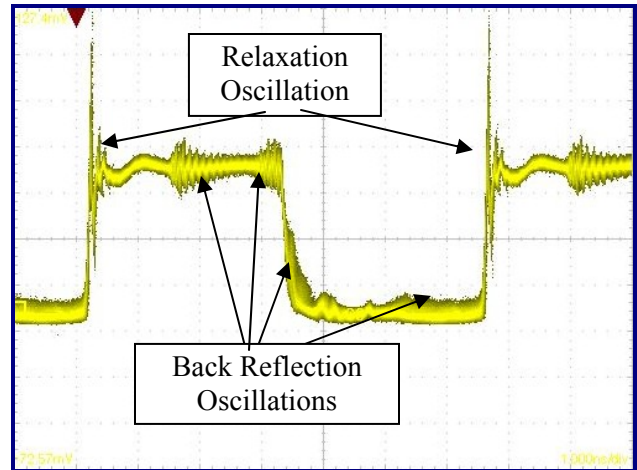


図 12. 緩和発振の 1010 パターンの図(1ns/div)

以下のパラメータを変更することで、後方反射発振の有無をチェックすることができます。

1. 高帯域幅の O/E コンバータの出力を確認し、過剰なノイズがないかどうかをチェックします。
2. レーザのバイアスレベルと温度を変更します。後方反射発振の特性はレーザのバイアスレベルと温度で変化します。
3. ファイバとレーザの間隔を調整します。ファイバをレーザから引き離すと、信号レベルを基準として発振が減少します。これは、図 13 で確認することができます。

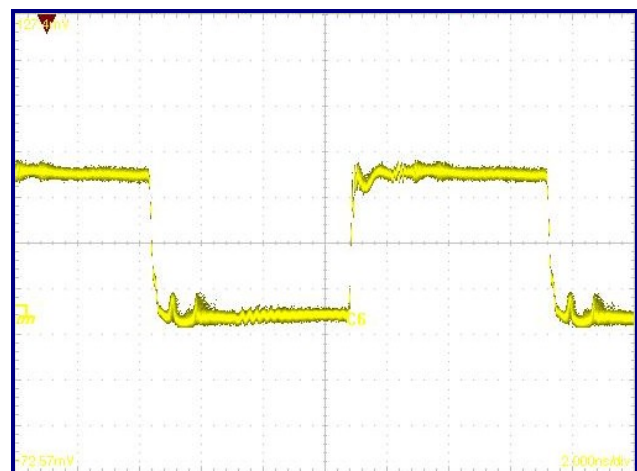


図 13. ファイバのアライメント/位置の変更

このタイプの垂直アイクロージャを修正するには、以下の操作を行います。

1. すべての光接続部に汚れや湿り気がないことを確認します。

2. 適切なファイバが使用されていること、また APC ファイバ端面が使用されていること(システムで必要な場合)を確認します。
3. 内蔵の光アイソレータまたは外付けの光アイソレータ(レーザと光の反射が起こる場所との間)とともにレーザを使用してください。

7 その他のリソース/最後に

光トランスミッタにおける垂直アイクロージャについては多くの原因が考えられます。このアプリケーションノートでは、いくつかの一般的な原因、たとえばシステムの構成、ベースラインワンダ、差動ペアの不整合、不十分なデカップリング、および後方反射発振などについて説明しました。垂直アイクロージャの原因の特定や性能の向上の詳細については、マキシムファイバアプリケーショングループに <https://support.maxim-ic.com/>にてお問い合わせください(英語のみの対応となります)。

参考資料

1. Application Note: “[NRZ Bandwidth - LF Cutoff and Baseline Wander](#)” – AN-09.0.4, Maxim Integrated Products, September 2002.
2. Technical Article: “[Spectral Content of NRZ Test Patterns](#)” – HFTA-11.0, Maxim Integrated Products, January 2005.
3. データシート:「[MAX3735/MAX3735A : 2.7Gbps、低電力SFPレーザドライバ](#)」 - Maxim Integrated Products, May 2003.
4. データシート:「[MAX3646: 消光比制御付き、155Mbps~622Mbps SFF/SFPレーザドライバ](#)」 - Maxim Integrated Products, July 2004.
5. Application Note: “[MAX3735A Laser Driver Output Configurations, Part 1: DC-Coupled Optimization Techniques](#)” – HFDN-26.0, Maxim Integrated Products, June 2003.
6. Application Note: “[MAX3735A Laser Driver Output Configurations, Part 3: Differential Drive](#)” – HFDN-26.2, Maxim Integrated Products, September 2003.
7. Application Note: “[Choosing the APC Loop Capacitors Used with MAX3735/MAX3735A SFP Module Designs](#)” – HFDN-23.0, Maxim Integrated Products, September 2002.