

ホワイトペーパー

プラグブルコヒーレント光 トランシーバーのテスト

DWDM トランスポート用のコヒーレントトランスポンダーは長らく使用されてきていますが、これらは通常、ベンダー固有の閉鎖されたエンジニアリングシステムです。最近、MSA やその他の規格に準拠して設計されたプラグブルコヒーレントトランシーバーが、コヒーレントプラグブル光エコシステムの出現につながりました。IEEE 802.3¹ は、DWDM を使用した100G および 400G リンク(80 km リンクバジェット)で動作するZR PMDを搭載した、プラグブルコヒーレントトランシーバーの開発と展開への関心が高まっています。

この VIAVI ホワイトペーパーでは、プラグブルコヒーレントトランシーバーの概要と、100G 以上のプラグブルコヒーレントトランシーバーの開発、検証、および導入に必要なテストおよび検証の課題と方法論について説明します。

今日の光インターフェイス (2020年現在)

現在、プラグブルインターフェイスの柔軟性は、イーサネットの成功に大きく貢献しており、ユーザーは適切なコストスケールリングを使用して、[必要に応じて]帯域幅拡張と伝送距離延長ができます。400G イーサネットの場合、エンドユーザーはさまざまな種類のインターフェイスを使用して、潜在的なアプリケーションをサポートできます。

PMD	到達距離	アプリケーション	テクノロジー
DAC	2~3 m	ラック内およびサーバー	パッシブメタル線ケーブル、50G PAM-4 電気
SR8	100 m	エンタープライズ	パラレルマルチモード。50G/λ - PAM-4
DR4	500 m	データセンターとエンタープライズ	並列シングルモード、100G/λ - PAM-4 は、100G ごとに異なるファイバーがあるため、4 x 100G ブレークアウトもサポートできます。
FR4	2 km	大規模データセンター	シングルモード、100G/λ、PAM-4
LR8	10 km	通信範囲	シングルモード、50G/λ、PAM-4
ZR	80 km	メトロと DCI	シングルモード/コヒーレント、PAM-4

表1: 標準化された 400G イーサネットインターフェイスの PMD、距離、アプリケーションおよびテクノロジー

1. <http://www.ieee802.org/3/>

従来、プラガブルトランシーバーのほとんどのアプリケーションは、10 km 以下の伝送距離で、直接接続メタル線、マルチモード VCSEL ベース、またはシングルモードの直接検出光テクノロジーによって効果的に対処できます。データレートが増加し、400G で高次変調(NRZ => PAM-4)に移行と共に、シグナリングレートは着実に増加しています。しかし、アプリケーションの大部分は、従来の「直接検出」技術でカバーされていました。

従来、長距離伝送は、カスタマイズされたフォトニクスや ASIC をベースにした高性能でベンダー固有のコヒーレントラインカードモジュールで対応されてきましたが、最近では IC 或いはトランシーバーベンダーが、クライアントトランシーバー「スロット」と互換性のある高性能なプラガブルトランシーバーを開発しています(ただし、出力、冷却、管理の要件はより厳しい)。当初は、通信アプリケーションに重点が置かれていましたが、データセンター相互接続(DCI)などの分野では、ハイパースケール・データセンターのようなより広範かつ大規模な市場が登場してきました。この到達範囲はコヒーレント光インターフェースが対処し、市場の潜在的な高密度フォームファクター(電力および冷却を含む)に到達するために最適であり、市場の期待に合わせるために、積極的な価格の期待に応える必要があります。

現在のクライアントトランシーバー (2020年)

現在、さまざまなフォームファクターが導入されていますが、クライアントインターフェイスで最も人気のある 2 つのフォームファクターは、2 つのファミリー(SFPとQSFP)のいずれかです。SFP ファミリーは通常、1つの光レーンに一致する電気レーンを 1 つ備えており、サーバーや携帯電話基地局などの「エンドデバイス」でよく使用されます(ビットレート: 25Gb/s以下)。QSFP ファミリーは、平行光レーンと電気レーンを使用します(従来は 4 つの電気レーンを使用しており、ほとんどの場合、4 つの光レーンを平行光信号として、または CWDM/DWDM 光グリッド上の信号を持つ単一のファイバーとして使用しています)。ここでは QSFP-DD² に焦点を当てて、大部分の帯域幅を処理するスイッチ、ルータ、トランスポート機器などに一般的に見られるクライアントトランシーバーについて詳しく説明します。

現在、クライアントインターフェイスの最先端の 400G プラガブルトランシーバーとしてQSFP-DD トランシーバーが主流です。このトランシーバーの技術的に素晴らしい点は、高速デジタル電子回路、広帯域および低ノイズアナログ電気信号、DSP ファームウェア、マイクロコントローラ、統合された光サブアセンブリ、および機械的な統合が、厳しい価格要件と性能期待値を満たして、すべて組み込まれているところです。

次のような、いくつかの主要な構成要素に対処する必要があります。

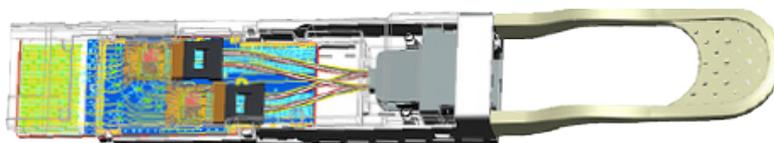


図1- 400G QSFP-DDトランシーバーの内部図例

プラガブル光トランシーバー(QSFP-DDの場合はダブルサイドのデュアルスタックコネクタ使用)は高速平行信号にてHOSTとの接続を行います。400G イーサネットでは、通常、ホストとトランシーバー間のインターフェイスとしてイコライゼーションをサポートする高性能デジタル SERDES を使う PAM-4 電気変調信号を使用した 8 平行レーン(各レーンは差動信号)です。また、コネクタを通してコマンド/コントロールインターフェイスを提供する必要があります。通常、これらは、プロトコルを使用する I²C のような インターフェイスが使用されます。最新の 400G QSFP-DD は、通常、400G トランシーバーのニーズとアプリケーションに合わせて設計された高度なステートフルプロトコルである CMIS 4.0 (Common Management Interface)を使用します。また、コネクタには電源(通常は 3.3V、4A 以上)が供給されており、トランシーバー内の電子回路および光部品に必要な電力を供給します。

2. <http://www.qsfp-dd.com/>

PAM-4信号を採用したトランシーバー内の高度に統合された IC(PAM-4 DSP) には、SERDES が含まれています。現在では、ホストとトランシーバー間のイコライゼーションをサポートし、28 Gbd PAM-4 の 8 レーンから光インターフェイス (DR4 や LR4 など) で使用される 4 レーンの100G/ラムダ (56 Gbd PAM-4) までの多重化と多重分離を合わせて提供します。IC には複雑なファームウェア、特に DSP コードが必要で、モジュールの管理と制御はマイクロコントローラを介してオーケストレーションされ、モジュール管理用のプロトコルスタック (つまり CMIS 4.0)、冷却および電力管理、DSP のファームウェアロードおよび管理などの通常のすべてのハウスキーピングおよび管理、そしてもちろん光信号のすべての要件を1つにまとめます。この光信号発生と受光要素には、高度に統合されたレーザーとレシーバーで構成され、すべてIEEE802.3などの規格に準拠しています。トランスミッターとレシーバーの両方が、電力および熱要件に対して、広い帯域幅、低ノイズ、および優れたリニアリティを示す必要があります。

各構成要素は、信号のインテグリティの問題を管理する必要のある小さなPCBにマウントされ、すべてがQSFP-DDフォームファクター要件に収まり統合されます。QSFP-DD は、多岐に渡る技術の粋を14cm3サイズに統合した(電気/光/メカ/電力消費/発熱等)産物です!

現在のコヒーレントトランシーバー(2020年)

コヒーレントトランシーバーは、2010年以降現代の長距離光ファイバー通信リンクにおいて重要な役割を果たしてきました。これらは、通常、最高のパフォーマンスに焦点を当て、大規模な固定モジュールでカスタムフォトリクス(機器固有の)とASICを使用しました。



- ・ DWDM トランスポートに重点
- ・ リンク技術確立

- ・ カスタム ASIC および オプティクス
- ・ 単一ベンダーの統合



- ・ オープンなエコシステム
- ・ 汎用 DSP および 光トランシーバー



図2-コヒーレントトランシーバーの進化-ラインカードからプラグブルまで

上の図に示すように、特別設計された高性能のラインカードから、相互運用可能なオープンエコシステムへの進化には、多数の部品を組み合わせる必要があります。テスト、検証、および生産には様々な課題が発生します。トランシーバーベンダーは既に 100G および 200G (CFP および CFP 2 フォームファクター) 用のプラグブルコヒーレントトランシーバーを製造しましたが、このエコシステムが最も効果を発揮するのは 400GE で、DCI、メトロ、および 2 つの異なるマーケットで使われる従来型の DWDM でのアプリケーションを使用する場合です。

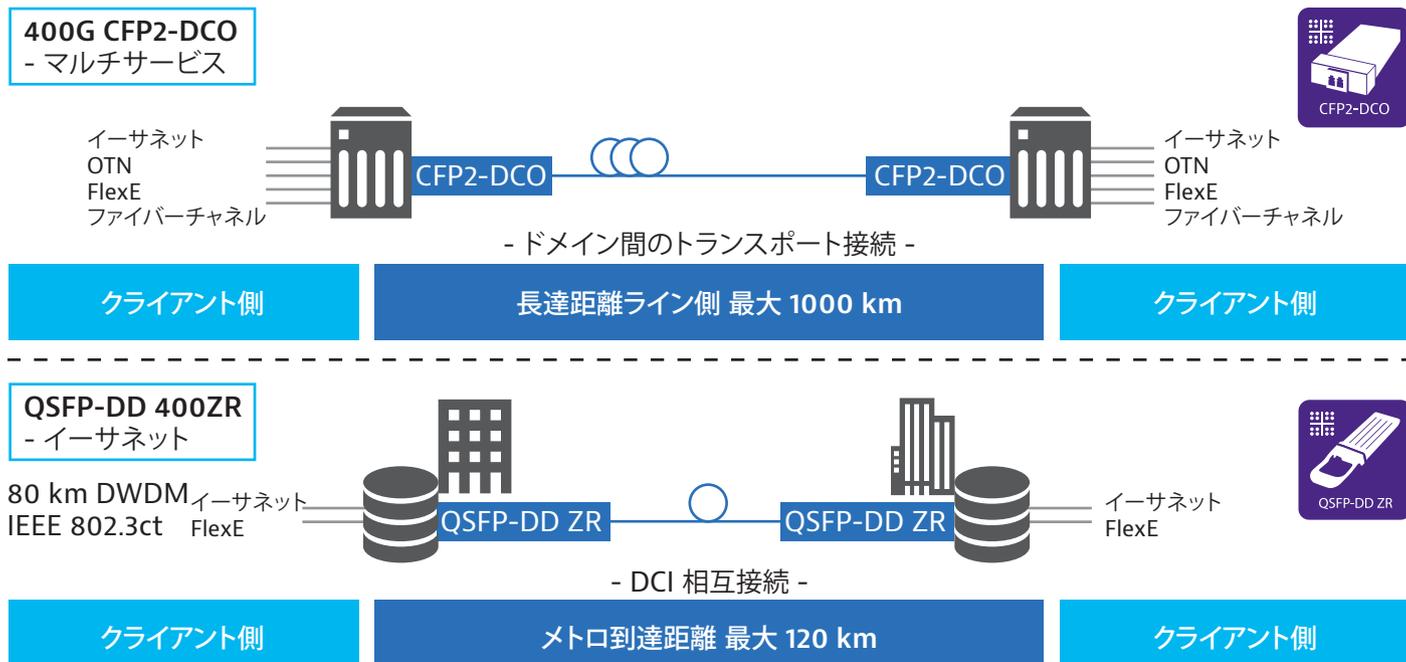


図3 - 400Gが最も効果を発揮する2つの異なるDCOマーケット

DCI/メトロ 分野は、ZR、ZR+、および OpenROADM³ のアプリケーションでさらにセグメント化される可能性があります。但し、これらのアプリケーション (QSFP-DDやOSFPなどのよりコンパクトなフォームファクタに基づく) がソフトウェアとファームウェアによってユーザーが選択可能な動作モードを有効にして、1 つのタイプのトランシーバーで対応されるというのは中期的なものとなる可能性が高いです。

クライアントトランシーバーは、通常、シンプルな強度変調(従来の NRZ - オン/オフキーイング - OOK)を使用しますが、400G の登場により、レーンごとに 50G 以上のすべてのレートで PAM-4 変調が一般的になっています。コヒーレント変調では、光の位相と偏波の両方を利用して、より高度な変調機能を提供します。また、レシーバーは位相と偏波の状態のセンシング機能を備えているため、分散補償も電氣的に実行できます。従来の変調では、40 km を超える到達距離の場合、リンク分散の補正が必要です。従来のクライアントトランシーバーで使用されている単純な強度変調は直感的で簡単です。レーザー(直接-直接変調レーザー(DML)、または外部デバイス経由-外部変調レーザー(EML)のいずれか)は、その光強度がデータに合わせて変調されます。これは、オンオフキーイング(OOK)と呼ばれることもあります。現在のところ、実用上の上限は約 50 GHz であるため、市販量産(妥当コスト実現)のデバイスでは 28 Gbd および 56 Gbd(100G/レーン)が実用的です。200 Gb/レーンのより広い帯域幅は実証されていますが、まだ一般的ではありません。

コヒーレント変調では、光、偏波、位相の高度な特性を利用して、トランスミッターとレシーバーの複雑さを犠牲にして、はるかに高いデータレートを実現できます。

3. <http://openroadm.org/>

4 プラガブルコヒーレント光トランシーバーのテスト

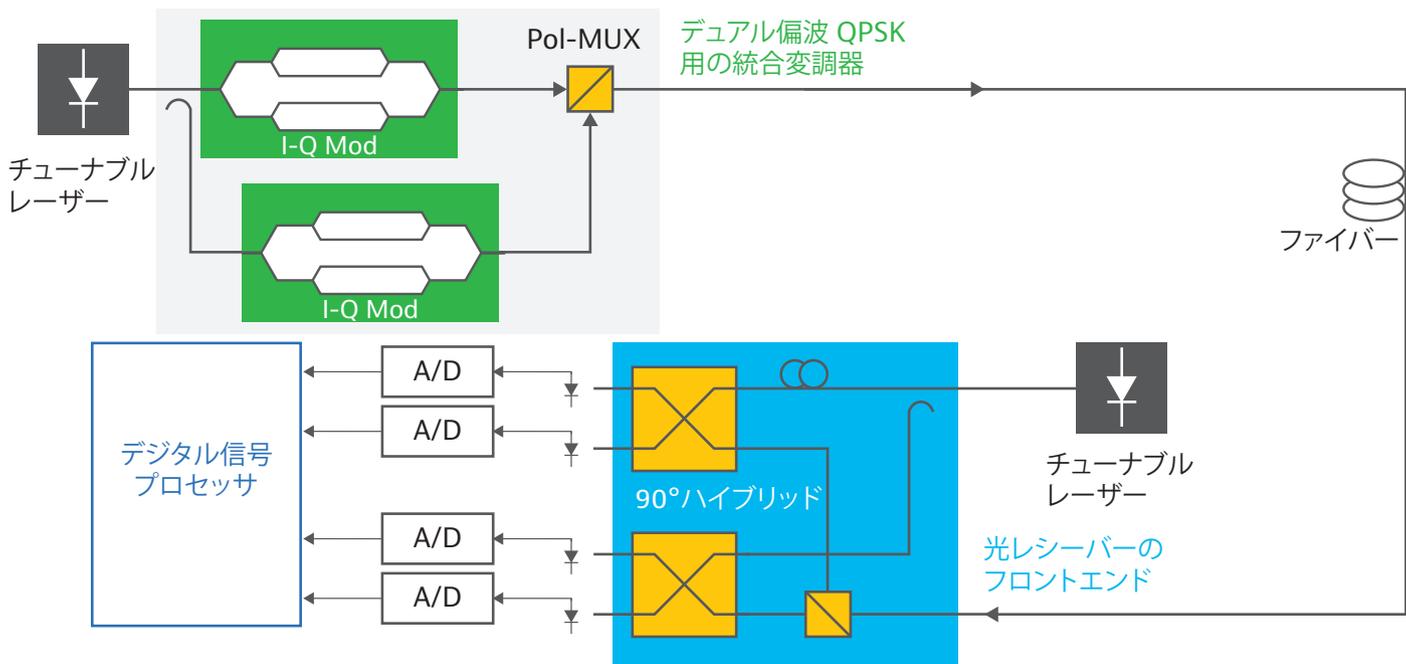


図4-コヒーレント伝送システムの概要図。

一般的なコヒーレント DWDM システムでは 1550 nm の帯域を使用しています。これは最小損失領域であり、長距離通信に有効です。トランスミッターレーザーからの光(チューナブルであり、統合されたチューナブルレーザーアセンブリ (ITLA) の一部)は 2 つのパスに分割され、各パスは位相変調 (I-Q 変調) され、2 つのパスが 2 つの垂直偏波状態として再結合されます。この光入出力部は、高度に統合されていることが多く、シリコンフォトリソグラフィを利用すれば、プラグブルオプティカルフォームファクターの集積度、性能、および価格要件に応えることができると期待されています。ほとんどの場合、4 つの I/Q モジュレータは、DSP に統合された高速/高分解能 DAC (Digital Analog Converter) によって駆動されます。また DSP の主要機能である、フレーマー、FEC、シンボルマッパーなどのさまざまなエンコーディング機能(信号処理)は、コヒーレントトランシーバーに搭載されるコヒーレント DSP の一部です。

コヒーレント変調光信号は、位相、偏波、振幅変調(単純なクライアントインターフェイスでの単純な振幅のみの変調とは異なる)であり、ファイバーリンクにて伝送される際には、減衰(損失)、波長分散や偏波分散、信号対雑音比(光 SNR = OSNR)を低下等様々影響(信号品質低下)を受けます。

レーザでは、入力光信号は垂直方向の偏波状態に分離され、インフェーズおよびクワドラチャ (I&Q) コンポーネントに分割されます。ここで、入力光信号は別の (チューナブル) レーザーとヘテロ接合され、光検出するためのベースバンド信号を生成します。その結果生成される信号はデジタル化され、DSP のレーザ部分によって処理されます。この詳細については、以下で説明します。

プラグブルコヒーレント光トランシーバー

プラグブルトランシーバースロットを搭載した大量のネットワーク機器がネットワーク機器市場で導入/展開されています。CFP2ファミリはテレコムアプリケーションで、QSFPファミリはエンタープライズアプリケーションで広く展開されています。OSFP (QSFP-DDよりやや大きいサイズ) は、QSFP-DDに対するアドバンテージがある(サイズ、冷却等)ため、一部の地域では支持を集めています。



図5-DCO QSFP-DD、OSFP、CFP2用のプラグブルフォームファクター – Acacia⁴の提供による

ライン側伝送用のコヒーレントプラグブルトランシーバーは、一般的なプラグブルクライアントトランシーバーよりもはるかに柔軟性があります。ライン側伝送用のコヒーレントプラグブルトランシーバーは、一般的なプラグブルクライアントトランシーバーよりもはるかに柔軟性があります。フレーミングとエンコーディングは、電気(ホスト)インターフェイスと光(クライアント)インターフェイスで一貫しています。一方、コヒーレントトランスポンダは、ホスト側では同じ構造をサポートしますが、出力信号構造は非常に異なります(例えば、ZR インターフェイスで C-FEC (連結 FEC) を使用するシングルキャリアコヒーレント DP-16 QAM 変調信号)。

クライアントとライン側のコーディングの大きな違いは、テストカバレッジ要件に影響を与えます。コヒーレントCFP2-DCOトランスポンダでは、複雑さがさらに増すことがあります。通信アプリケーションでは、CFP2-DCO トランシーバーは、イーサネットとマルチサービスベースのクライアントの両方をサポートできます。400GE、4x100GEは、イーサネットアプリケーションに幅広く適していますが、OTNとFlexOは、通信事業者にとって重要なアプリケーションであるマルチサービスニーズに対応する強力な機能を提供します。

帯域幅は、クライアントからの動的な帯域幅要件に合わせて拡張することもできます。例えば、n x 100G イーサネットは、1~4のクライアントを400Gを満たすまで拡張できます。OTNホスト信号には、多数の選択肢があります。400Gに於ける異なったサービス機能として、1または 2 * OTL4.4 (NRZコード)、または 4 * OTL4 或いは4 * OTL4.2 (PAM-4 コード)など。前述のインターフェイスは、古い構造または以前の400G構造からの移行パスを反映しています。

4. <https://acacia-inc.com/products/>

将来の OTN インターフェイスは、FOIC (FlexO インターフェイス) テクノロジーに基づく可能性があり、それらは100G、200G、または 400G に対応します。ホスト FOIC インターフェイスは KP4 FECによって保護されています。

FOIC 規格	説明
FOIC 1.4	25G NRZの 4 つ電気レーンで伝送される 100G OTN
FOIC 1.2	28Gbd PAM-4 の 2 つの電気レーンで伝送される100G OTN
FOIC 2.4	28Gbd PAM-4 の 4 つの電気レーンで伝送される200G OTN
FOIC 4.8	28Gbd PAM-4 の 8 つの電気レーンで伝送される400G OTN

ライン側の構造は 100G、200G、400G エンティティに基づいていますが、ホスト側で見られるように構造が混在することはありません。リンクパラメータ (損失、光信号対雑音比、分散など) に応じて、必要なコーディング利得やパフォーマンスなどに合わせて異なる FEC を使用できます。例としては、CFEC (連結 FEC)、OFEC (オープン FEC)、および独自の FEC があります。

プラグブルデジタルコヒーレント光トランシーバー (DCO) は、大規模なコヒーレントラインカードの機能の多くをコンパクトなプラグブルトランシーバーに統合する必要があります。これには、高度に統合された光コヒーレントレシーバーと、チューナブルレーザーを使用したトランスミッタが含まれています。これらの多くの要素には、シリコンフォトニクスのような高度な技術が必要です。コヒーレントオプティクスは、デジタルコヒーレントレシーバーのすべての機能を提供するために、高度に統合された DSP も必要とします。受信部分のブロック図を以下に示します。

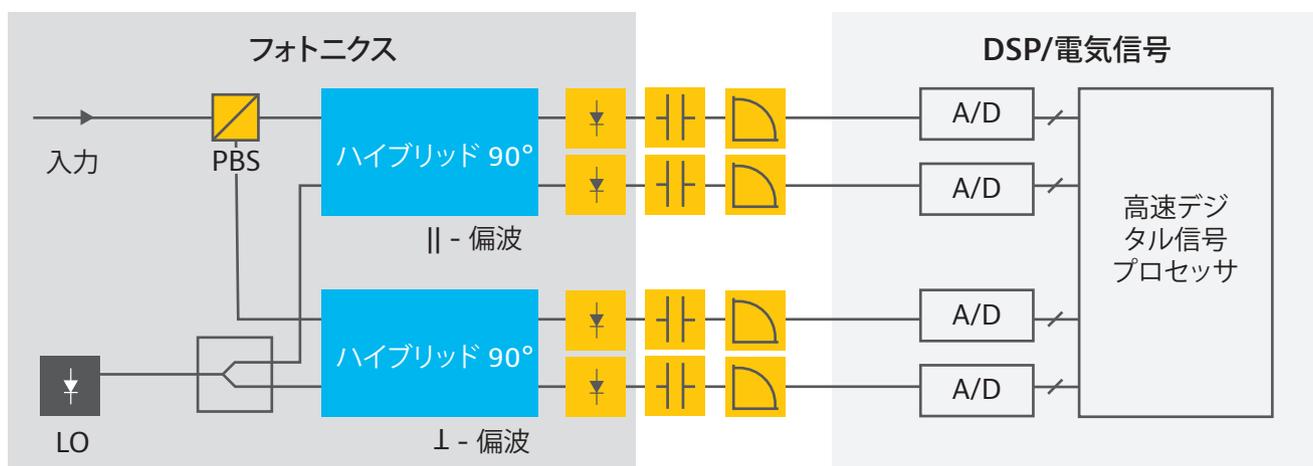


図6-DCOの受信セクションのブロック図

アナログからデジタルへの変換

レシーバーからの入力はナイキスト周波数以上でデジタル化する必要があり、一般的なコヒーレントシステムは位相および偏波を使用するため、少なくとも4つの高速ADCが必要です。適切な分解能とリニアリティが必要で、その出力はフォトダイオードとトランスインピーダンスアンプ (TIA) によって処理されますが、広いダイナミックレンジが必要になる場合があります。

DSP 機能ブロック

DSP コヒーレントレシーバーには、以下を含む機能ブロックが必要です。

機能	説明
クロックリカバリー	受信ポーレートでトラックするデジタル CDR
波長分散	光ファイバーの波長分散補償と、予想されるリンク長に比例した高速バッファサイズ
偏波ダイバーシチ	急速に変化する偏波変化のトラック (多 krad/秒)
キャリア位相トラッキング	入力シンボルの位相をトラックし、エラーベクトル振幅 (EVM) を生成
シンボルの復元	元のシンボルに復元
FEC	エラーシンボルを訂正するために、複数のタイプの FEC を使用できます。
フレーマーおよびデマッパー	フレーマーおよびデマッパーは、OTN、FlexO、FlexE、イーサネットなどのフレーム化された信号を処理
SERDES	SERDES は、高速プラガブルインターフェイスを介してホストに接続します。また、電気リンクイコライゼーションも実行する必要があります。

表2-レシーバー側に必要なデジタルコヒーレントトランシーバー DSP 機能

もちろん、すべての機能をリアルタイムで制御およびオーケストレーションし、トラックする必要があります。そのため、DSP は複雑な DSP ファームウェアと頻繁に絡み合った大規模で複雑な制御構造を持っています。DSP は、ZR や ZR+ などの標準規格とベンダー独自の特別なモードを組み合わせた、さまざまなオペレーティングモードとレートをサポートする必要があります。信号損失 (LOS) や光パワーなどのいくつかの単純なリンクパラメータを時々報告する単純なクライアントトランシーバーとは異なり、DCO の DSP は、複数の複雑なパラメータをリアルタイムで報告し、ホストがリンクの状態とステータスを管理およびトラックできるようにする必要があります。パラメータの一部を以下に示します。

パラメータ	説明
信号損失 (LOS)	トランシーバーは、マルチキャリア DWDM システムで動作する可能性が高いため、単純な光パワー検出器を LOS に使用不可。選択したキャリア波長を解読して確認する必要あり
光パワー	DWDM システムでは、選択したキャリア波長を解読して測定する必要あり
動作波長	DWDM システムは、チューナブル RX/TX を使って動作
波長分散	波長分散測定 - 通常、リンク長に比例
偏波トラッキング	機械的影響により、偏波状態が急速に (krad/sec) 変化する場合があります
光信号対雑音比 (OSNR)	リンク状態の性能指数
エラーベクトル振幅 (EVM)	IEEE および OIF では、EVM を性能指数として使用
プレ FEC BER	プレ FEC BER のトラック - リンク劣化アラームのトリガーに使用
SERDES の状態	イコライザ、ロック状態 (およびアイダイアグラムトラックも可能) を含む SERDES の状態を監視

表3-DSP が報告できるトランシーバーパラメータの選択

その他の一般的なパラメータには、トランシーバーの状態、動作温度、レーザーパラメータなどがあります。これらのパラメータの管理、制御、およびレポート (多くのパラメータは、製造時に波長と温度に対して校正される必要があります) には、DSP、トランシーバーマイクロコントローラ、ファームウェア、およびホストインターフェイス間の密接な結合が必要です。

トランシーバー管理と制御

DCO トランシーバーは、プラグブル光フォームファクターに統合された完全な DWDM ラインカードです。如何なる機能でも重要な側面は、管理インターフェイスです。シンプルなメモリマッププロトコル(SFF 8636⁵は、QSFP 28 などの 4 レーン トランシーバーで広く使用中)に基づいた 2 線式インターフェイス (I²C など)を使用した、クライアントトランシーバーは、長年にわたって進化してきました。しかし、400G クラスのクライアントトランシーバーが登場したことで、従来ソリューションが最新のアプリケーションの要件を満たすことが出来ないことがよりいっそう明らかになりました。業界が提携した結果、QSFP-DD などの 400G クライアントトランシーバーの管理インターフェイスとして CMIS 4.0⁶ の出現につながりました。DCO の管理は、クライアントトランシーバーよりもかなり複雑であり、業界ではコヒーレントトランシーバー管理のためのさまざまな方策を検討しています。OIF⁷ が採用したアプローチ C-CMIS のは、CMIS 4.0 のフレームワークをベースにし、コヒーレントアプリケーション用の拡張機能を追加するものです。これは、QSFP-DD および OSFP トランシーバー用の方法となりそうです。それらは QSFP-DD および OSFP クライアントが使用するものであるため、CMIS 4.0 スタックをサポートするために必要なホストで使用される可能性があります。もう 1 つの方法は、CFP MDIO の概念に基づいていますが、DCO⁸ 用に大幅に機能追加されています。DCO は、100G および 200G アプリケーションに使用される第 1 世代および第 2 世代の CFP および CFP 2 DCO トランシーバーで使用されるアプローチに基づいています。

製品ライフサイクル全体でのテスト要件

製品のライフサイクル全体にわたり、その範囲、その詳細、その複雑さが異なるさまざまなテストおよび測定要件があります。VIAVI ONT 製品ラインは、製品開発、検証、製造、および展開/導入のライフサイクルの各段階のニーズに合わせて拡張できるように設計されています。

トランシーバーのライフサイクルステージ	アプリケーションと例
技術とコンポーネントの評価	DSP、ROSA、TOSA の評価
トランシーバーハードウェア開発	ハードウェアの統合、信号インテグリティ、データパス接続
ファームウェアおよびソフトウェア開発	トランシーバーハードウェアとソフトウェアの統合、DSP 機能の検証、トランシーバーコマンドインターフェイス
標準の検証	ホストインターフェイス、光信号およびコマンドインターフェイス、標準規格、MSA への準拠を検証
製造	ファンクションテストと校正、スループットとテストスタンド実装密度要件
トランシーバーとベンダーの選択	ネットワーク機器メーカーは、ベンダー選択のために標準および見積依頼書を基準にトランシーバーを評価およびテスト実施
トランシーバーの統合	トランシーバーハードウェアおよびファームウェアとホストの統合 (コマンドインターフェイスなどを含む)

表4-トランシーバーライフサイクルテスト要件の概要

5. <https://www.snia.org/technology-communities/sff/specifications>

6. <http://www.qsfp-dd.com/wp-content/uploads/2019/05/QSFP-DD-CMIS-rev4p0.pdf>

7. <https://www.oiforum.com/technical-work/hot-topics-coherent-common-management-interface-specification-c-cmis/>

8. <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-CFP2-DCO-01.0.pdf>

コンポーネントおよび DSP 評価

高性能で信頼性の高い製品を開発し、市場投入までの期間を短縮するための重要な側面の1つは、コンポーネントを慎重に選択することです。トランシーバー PCB レイアウトが開始される前でも、DSP 評価ボードと適切な電気アダプタで接続された ONT テストセットを組み合わせて、DSP の機能を評価する貴重な作業を行うことができます。このようなセットアップでは、DSP 機能とトラフィックスループット、フレーマーと SERDES ハードウェア、およびファームウェアの開発およびデバッグを、PCB 設計とモジュールの機械的なフロアプランニングと並行して行うことができます。このアプローチにより、開発サイクルを数か月削減し、シミュレーションでは達成できないより包括的なデザインおよび DSP 評価を実現できます。また、光部分と DSP の互換性を評価し、テストファイバー全体で実際の測定を行い、OSNR や EVM などのシステム性能パラメータの一部をベースライン化することも可能です。

研究開発

この段階では、コンポーネントが選択され、設計コンセプトがレビューされています。レイアウトの検証は、信号インテグリティと熱的観点の両面で重要です。DSPを起動し、モードと信号パスを設定するには、トランシーバーファームウェアをターンアップする必要があります。研究開発段階への VIAVI ONT光ネットワークテスターのアプローチは、独自のもので包括的です。電気イコライゼーションのような下位レイヤーの「プロトコル」を含む高速/広帯域「phy」レイヤーのテスト、ストレス、および検証が可能です。ONT は、信号のインテグリティと SERDES をチェックするためのアンフレーム信号から、完全な信号パス検証を可能にする完全フレーム化されたイーサネットおよび OTN 信号まで、あらゆるトラフィックニーズをサポートします。これらはすべて、電力と冷却要件を満たす「テストスロット」にてサポートされます。さらに、物理インターフェースとプロトコルイベント、コマンドと応答の間の緊密な同期とトラックを管理インターフェースを介して行う、モジュールコマンドインターフェースを介した包括的なテストと検証機能を提供します。

研究開発フェーズでは、主に次の4つのテーマを開発、デバッグ、検証する必要があります。

テーマ	テスト内容
ホストインターフェイス - 物理レイヤー	SERDESおよびイコライザーの検証と機能評価(シグナルインテグリティ、ダイナミックおよびクロックイング、スキュー許容値)。4 x 100G などの異なるクロックドメインを持つPHYの検証を実現する高度 phy モードテストサポート機能。ホストインターフェイスの不具合付加と復元。ONT アプリケーションには、高度なエラー解析 (PAM-4 レベルおよび遷移およびバースト解析)、ダイナミックスキュー挿入、ビットスリップ解析、およびクロックダイナミック可変が含まれます。
ホストインターフェイス - プロトコル	データパスのインテグリティ、フレーマーの正しい機能、FEC などアラームとエラーの動作の訂正。イーサネットおよびマルチサービス (OTN、FlexO など)との互換性。ONT アプリケーションには、アライメントマーカーと FEC 分析、包括的なイーサネット、OTN、および FlexO テストが含まれます。
コマンドインターフェイス	トランシーバー管理インターフェイスの正常な機能、DSP 動作モードおよびトラフィックモードの設定 (プロトコルとともに検証)。主要なパフォーマンスと光信号指標を読み取る機能。障害およびアラーム状態 (LOS、周波数範囲、FEC など)の正しくタイムリーに表示。ONT は、トランスポンダ制御環境などの革新的なトランシーバーデバッグツールを提供します。
光信号の性能	OSNR、光帯域幅シェーピング、LOS、偏波状態などの障害下でのリンクの動作。リニアリティ、周波数トラック、レーザーチューニング範囲、レシーバー AGC。VIAVI MAP-300 は、この分野の光信号テスト/特性評価ツールの包括的なセットを提供します。

以下の DCO 機能ブロック図を参照すると便利です。研究開発においてテストが必要な主要な要素を明確に把握できます。完全な End-to-End のテストフレームワークを使用する必要があります。基本的なアンフレーム信号を使うテスター (BERT)は、SERDES の基本的な接続しか検証できません。DSP 内部を調べて、FEC、フレーマー、バッファなどの複雑な機能を検証することはできません。フレーム化された信号 (必要に応じて OTNおよび FlexO を含む)を使用した完全なデータパスカバレッジが必須です。

SERDESブロックは、周波数、位相、スキューの正常値を超えるストレスが重要な要素の1つです。SERDES のようなトランシーバー機能エレメントは、信号およびデータ周波数のジャンプやトランジェント（クロックソースのスイッチングにより発生）、スキュー（時間と温度により発生）などの中断イベントから復元する必要があります。標準の制限を超えた場合、ハードウェアとそれに関連するソフトウェアは、単に不具合を発生するのではなく、物理的な状況（周波数またはスキューが範囲外）を正しく報告することが重要です。また、クロック周波数を正しい範囲に戻すと、トランシーバーが「自己復元」し、コマンドインターフェイスを介して信号を送信できることも重要です。

周波数変動やダイナミックスキューなどのストレスを与えることにより、ファンクションブロックが故障したときのエラープロファイルを決定することもできます。この良い例は、SERDES ブロックでビットスリップを引き起こす過度のダイナミックスキューです。エラーバーストとビットスリップを区別できるテストセットを用意することで、ストレス状態での正確な故障モードを把握できます。

FEC やフレーマーなどの大きな IP ブロックは、トラフィックのフレーミングに依存しています。フレーム化されたトラフィックを操作してエラーを発生させる機能は、これらの IP ブロックを検証するために重要です。

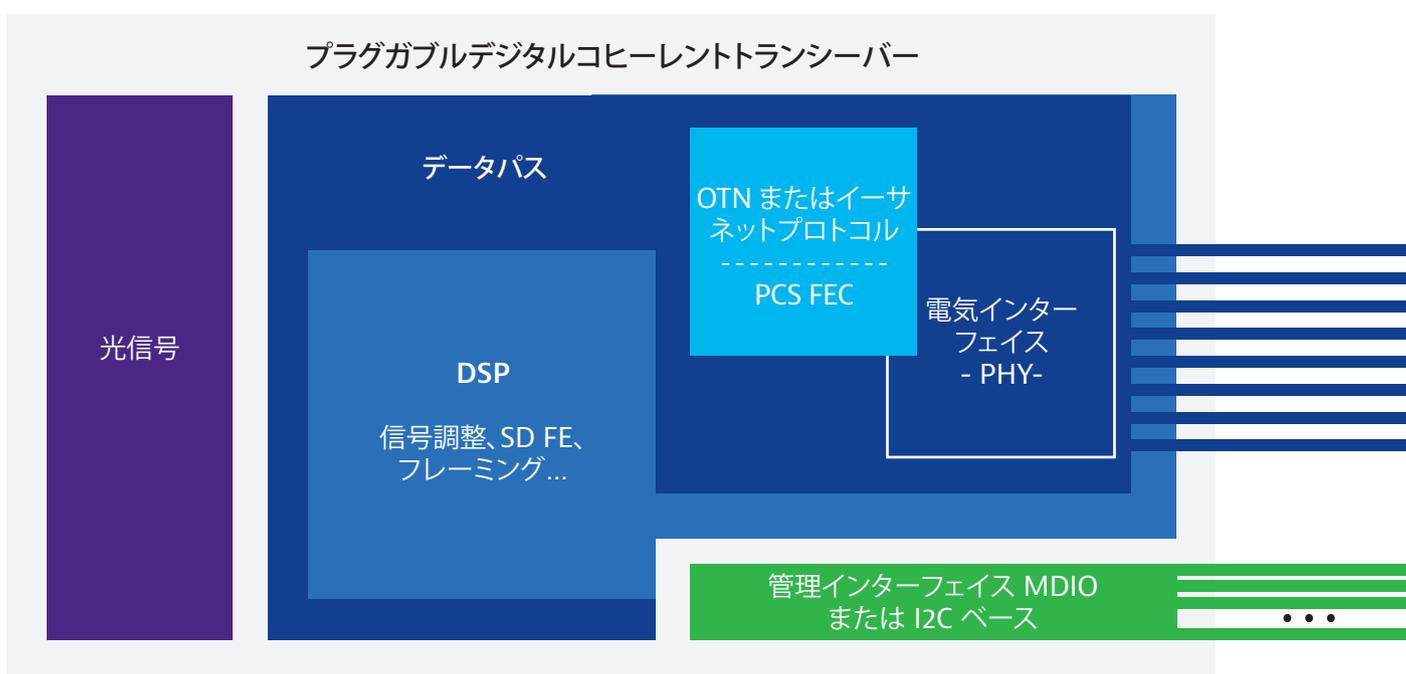


図7-DCO 機能ブロック

物理レイヤーと SERDES のテスト例

SERDES は DCO トランシーバーの重要な部分です。標準に準拠した高速データインターフェイスがなければ、何も機能しません。ここでは DCO ホストインターフェイス上で実行して SERDES を検証するテスト例をいくつか紹介します。

ダイナミックスキュー

トランシーバーデータインターフェイスは、PAM-4電気変調信号を使用して28Gbpsで動作するパラレル高速インターフェイス (RX および TX の 8 レーン) です。他のパラレルインターフェイスと同様に、レーン間には、時間の経過とともに変化する可能性があるスキューが発生することがあります。IEEE では、このインターフェイスのスキュー耐性を規定しているため、スキューバリエーションにはこの規格検証のためのアプリケーションが含まれています。また、シグナルインテグリティの検証にも使用できます。レーン間スキューを変更すると、レベル間のクロストークが変化するため、スキューによるエラーレートの変化はクロストークマージンの問題を示している可能性があります。ダイナミックスキューのもう 1 つの主な用途は、過度のスキューを受けたときの SERDES の不具合モードを決定することです。

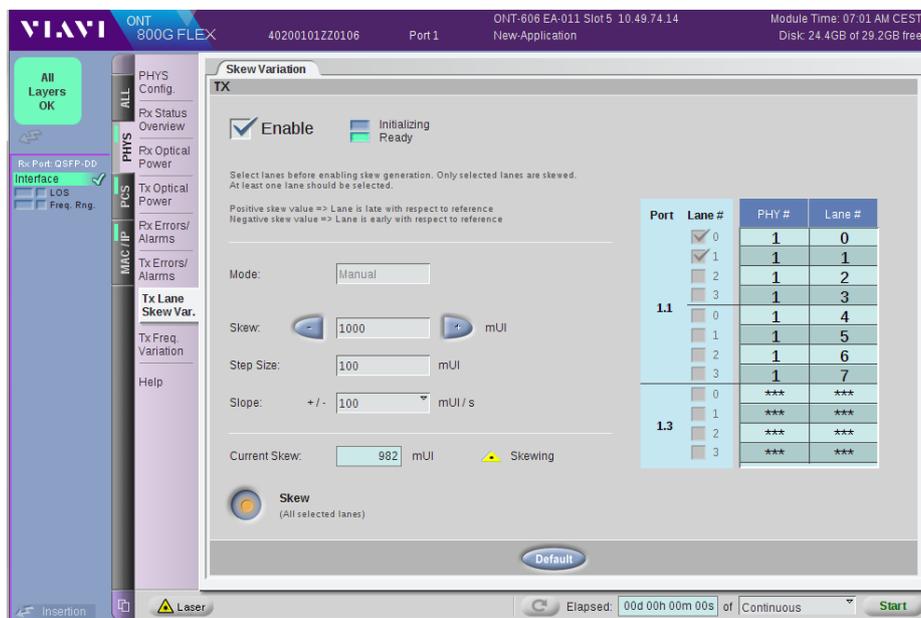


図 8 – ONT GUI (PHYレイヤー)でのダイナミックスキューの設定

過度のスキューで発生する可能性があり、正しいアプリケーションがないとトラブルシューティングが非常に難しい問題の1つは、SERDESバッファのビットスリップです。ほとんどのテストセットでは、スリップを識別できないため、エラーバーストとして報告されます。ONTを使用して、フレーム化されたトラフィックで動的スキューテストを実行し、SERDES出力に表示されるエラープロファイルを追跡できます。ONTは、ライブイーサネットトラフィックのビットスリップを検出できます。SERDES (トランシーバー入力) の入口でスキュー制限を超えているため、障害モードが確認できます。

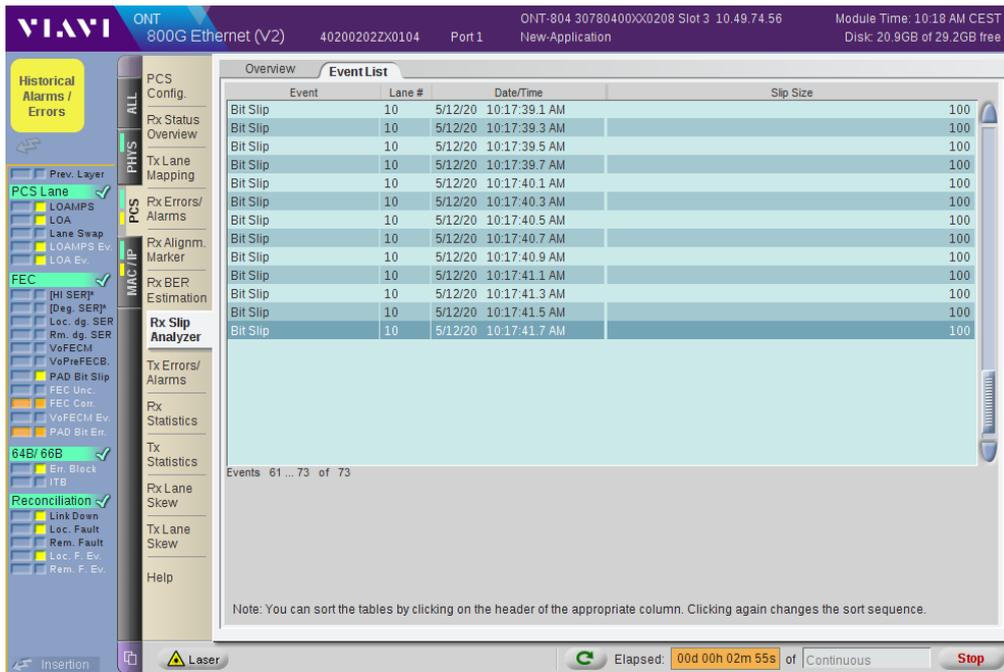


図9 - ONT ビットスリップ検出アプリケーション

ビットスリップなどの大きな破壊的エラーを追跡するだけでなく、ONT はレーンアライメントマーカや FEC などの主要な要素を含む PCS レイヤーへの影響も追跡できます。障害状態では、イーサネットアラームとエラーを正確かつ一貫して追跡することが重要です。

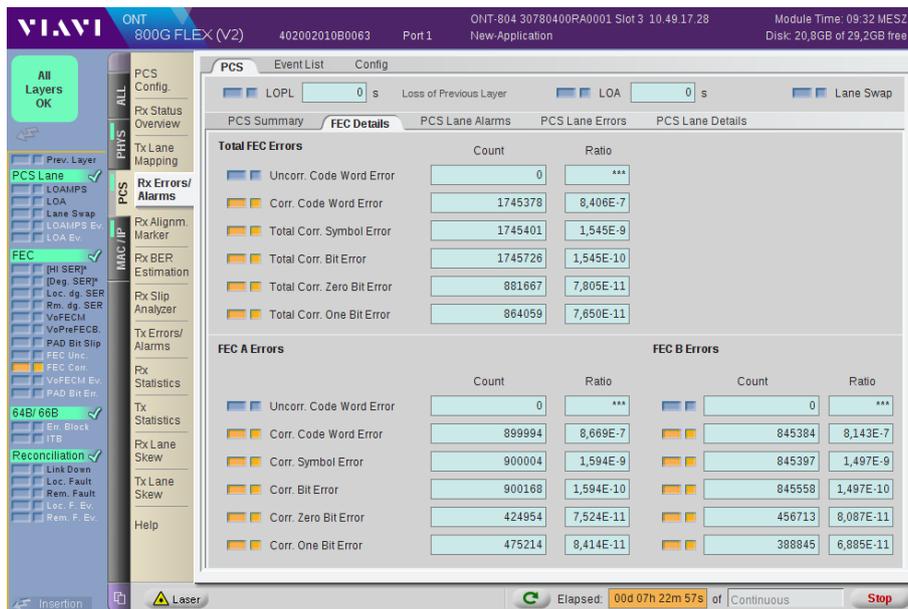


図10 - 包括的な FEC の概要は、リンクエラーの動作を理解する上で重要です。

トランシーバー管理

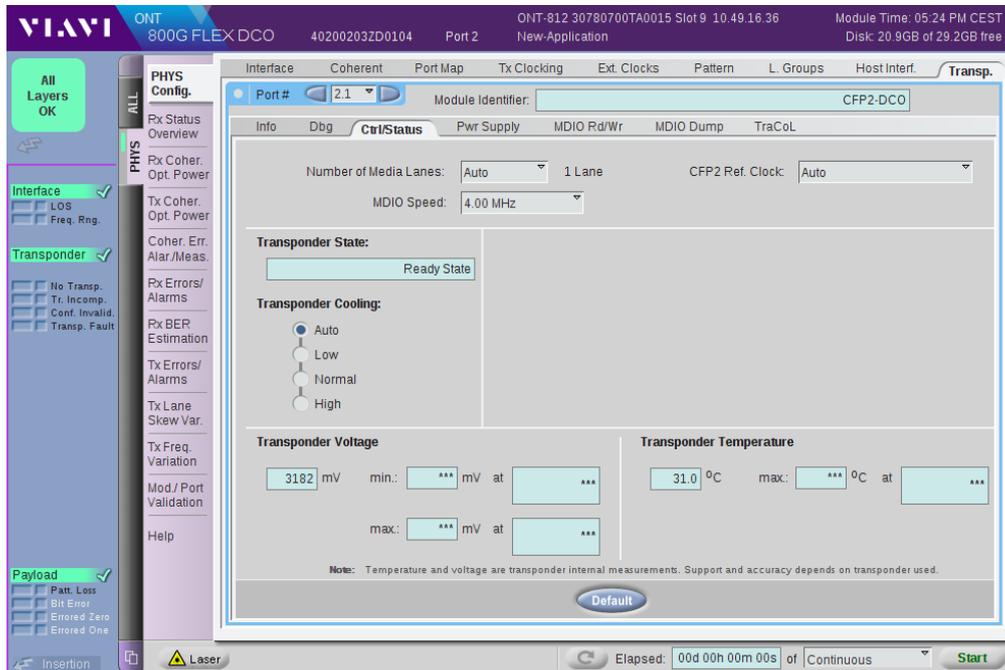


図 11- ONTトランスポンダ(トランシーバー)ステータスの概要ページ

コヒーレントプラガブルトランシーバーの管理は非常に複雑です。ホストモジュールを含むシステム全体のデバッグ、検証、および実行には、管理インターフェイスの完全な知見と制御が不可欠です。トランシーバーインターフェイスを調査する際には、いくつかの要素を考慮する必要があります。また、すべての要素を他のインターフェイス、ホスト電気インターフェイス、および光信号インターフェイスと密接に結合させる必要があります。

エリア	例	けん引要素
標準ハウスキーピング処理	トランシーバーの初期化を訂正し、ベンダーとモデルIDを報告し、標準のパラメトリック測定実行。	トランシーバーを「使用」し、ホストがトランシーバーとその機能を正しく識別できるように、トランシーバーをホストで正しく初期化するための標準要件。
測定値、アラーム、およびエラー	信号損失、OSNR (およびプレ FEC の BER) の変化、分散、偏波、ホストインターフェイスの問題などのイベントへの応答。	光信号関連イベントはアラームとエラーを引き起こす可能性があり、コマンドインターフェイスを介して迅速かつ明確に報告する必要あり。光パワーなどのパラメータは、妥当性があり、一貫性がある必要あり。
インターフェイスの速度、スループット、および安定性	2 線式インターフェイス (TWI) 上でさまざまな速度で動作する機能、反復する高速な読み取り/書き込みアクセスのためのトランシーバーファームウェアの安定性。	トランシーバー内のマイクロコントローラは安定している必要があり、TWI でのトラフィック負荷が「ビジー」であることにより障害が発生することのないようにする必要あり。また、管理インターフェイスの負荷が高い場合でも、他のハウスキーピングタスクを安定して続行する必要あり。
イベントに関するインターフェイス時間	アラームおよびホストの電気インターフェイスの状態に関する正しい LOS 応答の検証。LOS イベントからの復元 - 復元時間、安定性、自動的に復元するかホストの介入が必要か。	サービスの中断と自律的な復元機能は、ラインサイドトランシーバーとクライアントトランシーバーの両方にとって重要な課題。また、光およびホスト電気インターフェイスのステータスに関して、インターフェイスメッセージとタイミングの特性を表示することも重要。

トランシーバーの安定性の最初のテストとして広く使用されている非常に単純なアプリケーションの1つに、ONTの反復読み取り/書き込みアクセスがあります。ユーザー定義の読み取り/書き込みイベントを使用してコマンドインターフェイスをロードし、通常のトラフィックやストレステスト(スキューなど)などの他のテストを実行して、コマンドバスとトランシーバーマイクロコントローラに繰り返し大量の負荷がかかってトランシーバーの動作と安定性に影響があるかどうかを確認できます。

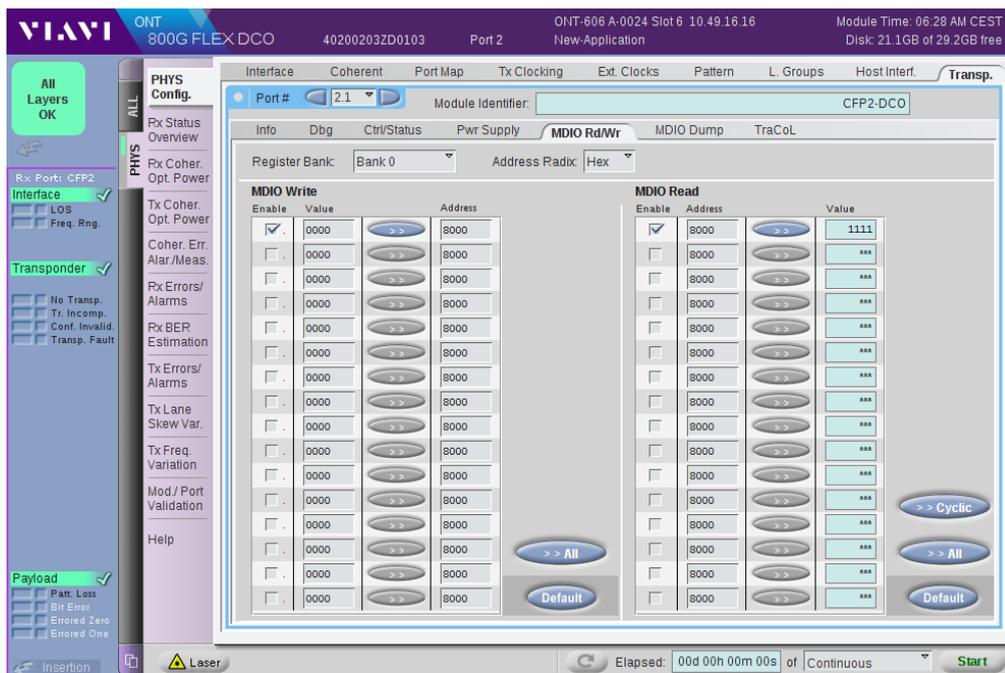


図 12 - CFP 2 DCO モジュールで使用される MDIO コマンドインターフェイスの ONT テストモジュールによる読み取り/書き込み

ONT は、コヒーレントトランシーバー (QSFP-DD とフル機能 DWDM CFP 2 の両方) の拡張管理要件をネイティブにサポートし、主要なパラメータとステータスを GUI で明確かつ一貫した方法で表示します。動作波長などの主要なパラメータは、GUI で直接、また、高度な システム検証テスト (SVT) 要件の自動スクリプトを使用して簡単に設定および追跡できます。

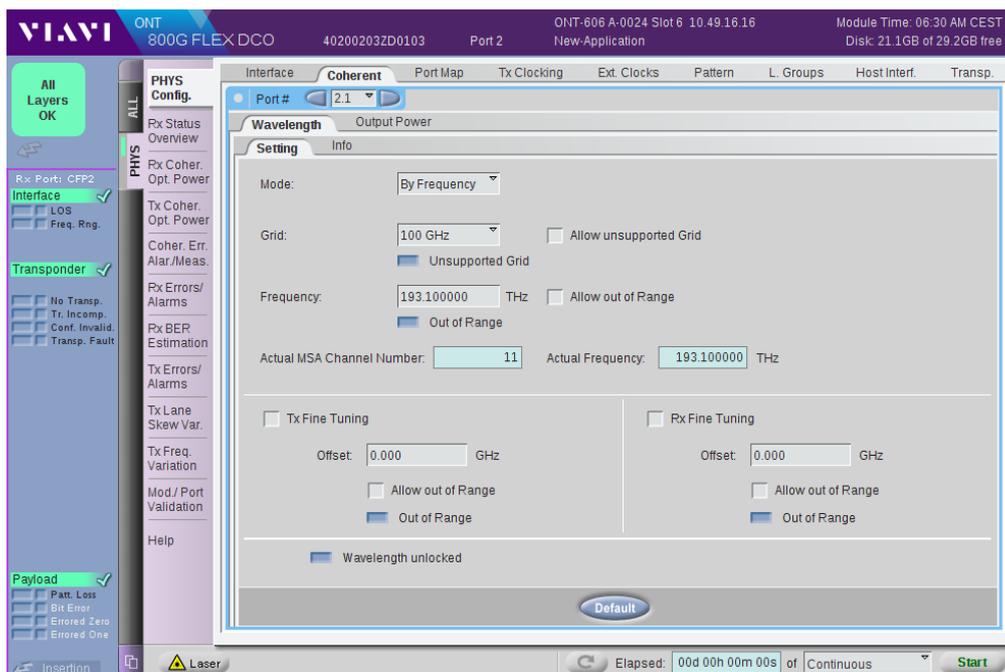


図 13 - 主要なコヒーレントトランシーバーを設定する ONT の GUI

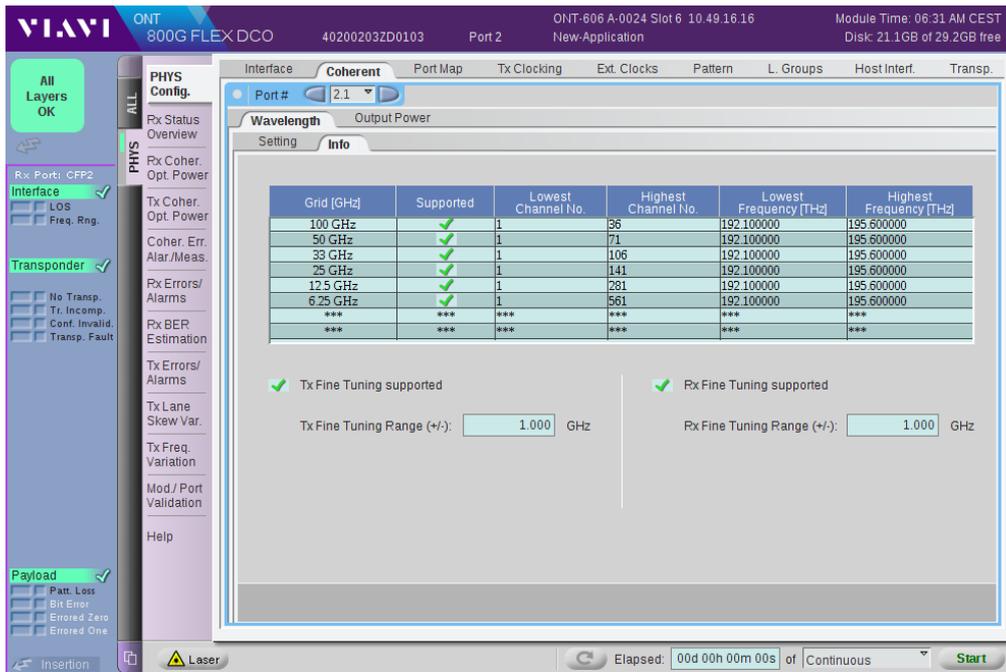


図 14 - ONT GUI のコヒーレントトランスポンダ報告機能。

コマンドインターフェイスと関連するトランシーバーファームウェアは、クライアントトランシーバーの単純なパワー測定よりもはるかに複雑で、入り組んだ光パラメータを正しく報告する必要があります。OSNR、CD、EVM、PD、および DGD を含むさまざまなダイナミックパラメータを正しく報告および追跡する必要があります（ユーザーがプログラムできる範囲がある場合もあります）。ONTは、VIAVIMAP-300製品ファミリーと併用することで、光パラメータの生成と操作が可能になり、ONTのテスト中の光トランシーバーで追跡および検証が可能になります。これは、DSP ファームウェアの開発と検証をサポートするためにも使用できます。

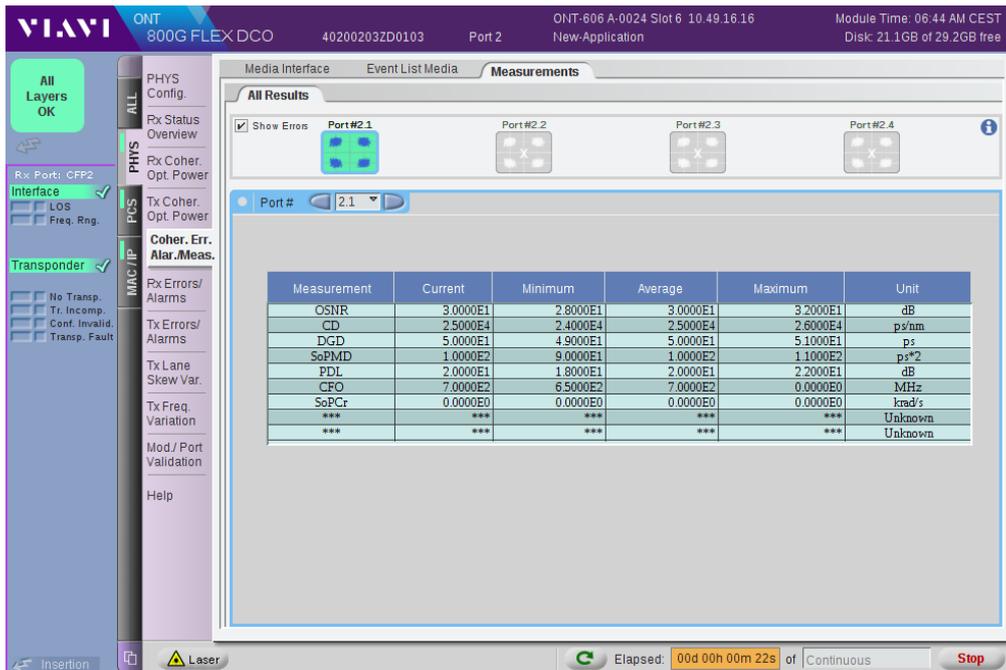


図 15 - モジュールにより報告されたコヒーレントモジュールの光パラメータを示す ONT の GUI。

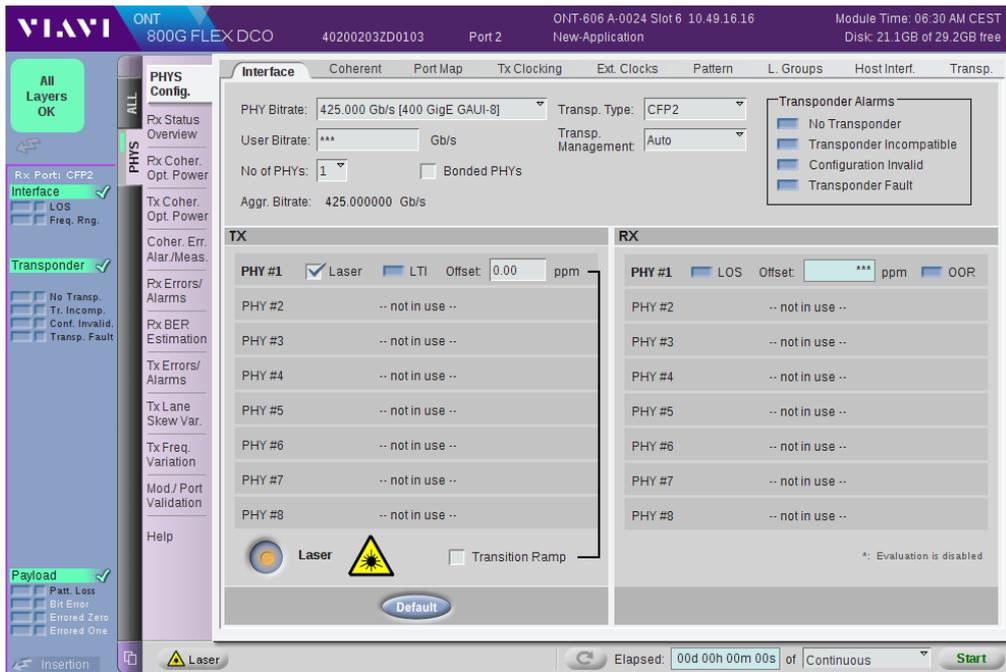
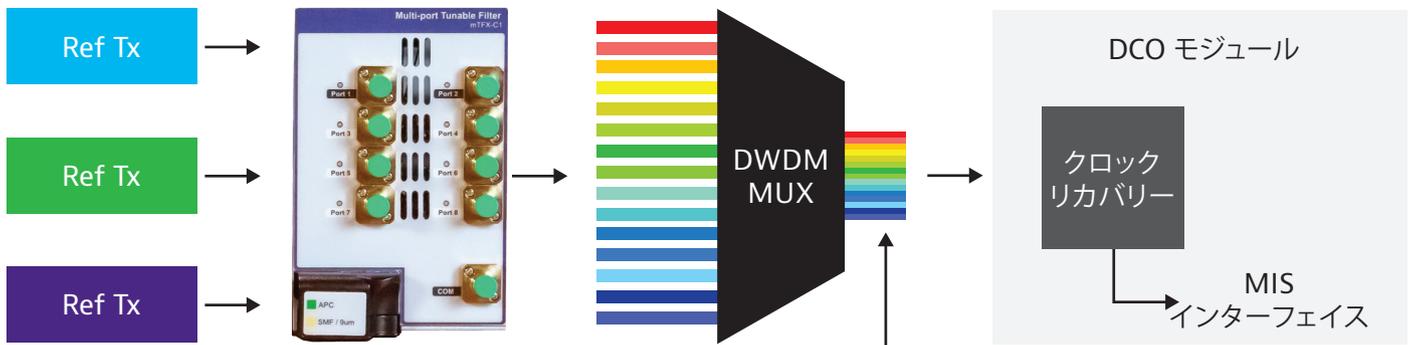


図 16 – コヒーレントトランシーバーの物理レイヤーインターフェイスの状態概要表示ONT GUI

システム検証

システムの検証には、トランシーバーの広範かつ詳細なテストが含まれ、物理ハードウェアとトランシーバーファームウェアの両方をテストする必要があります。テストは、マルチドメインで自動化されていることが多く、トランシーバーとホスト間の相互作用が重要なシステムレベル機能であるため、トランシーバーとネットワークが統合されている場合では、重要な段階でもあります。この段階は、トランシーバーの開発段階で使用される多くのアプリケーションに基づいています。ソフトウェアとパフォーマンスの側面に重点が置かれています。スタック全体でのアラームおよびエラーの重大かつタイムリーな報告、および光信号の状態とホストにトランシーバー MIS が報告している内容との照合が中心的な役割です。リンクパラメータ (OSNRやプレFECBERなど) が設定されている場合、リファレンス/テスト光リンクは劣化する可能性があります (VIAMAP-300 製品ファミリーを使用)。リンクが劣化レベルを通過すると、トランシーバーとホストの組み合わせが正しいアラームを発生させ、適切な処置を取る必要があります (別のリンクへの切り替えやシステムレベルのアラームの発生など)。リンクが復元すると、システムは正しい復元手順に従うはずですが。

このフェーズで最も要求の厳しいテストの 1 つに、サービス中断テストがあります。基本的には、光信号が完全に中断されてから復元するまでのシステム応答をテストします。復元プロセスとタイミングは特に重要です。クライアントシステムでは、シャッターによって単一の光信号が遮断され、トランシーバー応答 (トランシーバー MIS メッセージを含む) が監視される比較的単純なテストです。光信号が再接続され、復元時間を含む応答と MIS メッセージが記録されます。単純な直接検出トランシーバーであっても、トランシーバーのロックやMIS経由での誤解を招くメッセージの送信に関する問題が発生します。最悪の場合、トランシーバーは自己復元を正しく実行できず、ホスト経由で手動で介入する必要があります。最悪の場合、トランシーバーは自己復元を正しく実行できず、ホスト経由で手動で介入する必要があります。



チューナブルフィルターおよび1つの信号パスないし完全ブロッキングの減衰制御を組み合わせた 8 ポートのプログラマブル光マルチプレクサ。変更によって他の信号の状態が中断されることはありません。

注意：
他の波長は引き続きアクティブであるため、DCO の入力にはまだ光パワーがある場合があります。

図 17: MAP-300 チューナブルフィルター (mTFX) を使用した DWDM 環境でのサービスの中断

システムは、選択された 1 つのキャリアを正しく追跡し、その光パワーレベルを監視するトランシーバーに依存しているため、サービスの中断、信号損失 (LOS) レベルに達すると、トランシーバーはこれを MIS インターフェイス経由で正しく表示します。このテスト中に、ホストインターフェイスをミュートして MIS 経由で信号を送信する必要がある場合もあります。トランシーバーは、再アサートされた光キャリアを正しく再取得し、コヒーレント RX 信号チェーンを起動し、リンクが復元している旨をホストに信号を送信し、またホストとトランシーバー間の電気インターフェイスを正しく設定する必要があるため、復元プロセスは要求の厳しいテストです。これらのイベントの順序とタイミングは、このプロセスの安定性と同様に重要です。VIAVI ONT は、このテストの DCO トランシーバーの側面を検証およびデバッグするための理想的なテスト環境を提供します。

また、システム検証では、リンクおよびトランシーバー全体に伝送されるライブトラフィックの詳細なテストも必要です。多くの場合、これは OTN やイーサネットなどのマルチサービストラフィックです。OTN の機能は、エンドユーザーに優れた柔軟性を提供しますが、より厳しいテスト要件も課します。VIAVI ONT は、FlexO、400G クラスの OTN サービスにとって重要な FOIC 1.2、FOIC 2.4 および FOIC 4.8 を含む完全な OTN 機能をサポートします。

VIAVI ONT 800G

業界標準である ONT ファミリーの最新テストモジュール 800G DCO は、コヒーレントトランシーバーエコシステムのニーズに最適化されています。冷却および電力要件をサポートし、トランシーバーのライフサイクル全体にわたって完全なテストおよび測定範囲を提供する多数のアプリケーションを接続した QSFP-DD および CFP 2 DCO 400G フォームファクターの両方をサポートします。VIAVI ONT 800G DCO は、研究開発に必要なより詳細なテスト要件実現からシステム検証テスト (SVT) 及びと統合に至る、開発とデバッグのあらゆる側面を加速するのに役立ちます。

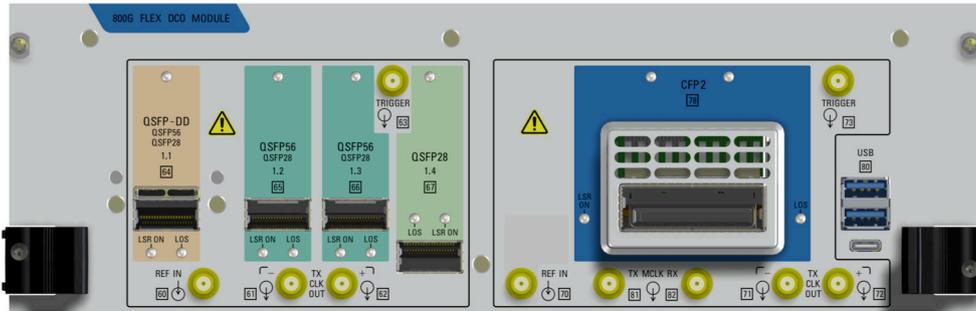


図 18 – ONT 800G DCO モジュール

VIAVI MAP-300

まとめ

プラグブルコヒーレントオプティックスは、メトロ、DCI、DWDM/トランスポートなどのまったく新しいアプリケーションにプラグブルクライアントトランシーバーの利点をもたらすことを約束します。コヒーレントトランシーバーの複雑さが増すと、初期のコンポーネント検証から各要素開発、ソフトウェアおよびファームウェア開発、モジュール検証、システム統合、および生産に至るまで、テストおよび検証のすべての段階で厳しい要求が生じます。これらはすべて、市場価格期待と市場導入時期までに達成する必要があります。これは、トランシーバーコマンドおよび管理インターフェイスの複雑さが増すことでさらに複雑になります。

VIAVI は、最高パフォーマンスの DWDM で使用されるフル機能のラインカードから、現在 100G および 200G で使用されている新しい DCO トランシーバーまで、コヒーレントシステムの開発と検証のサポートで長年の経験を有しています。400G クラスの DCO と PAM -4 の電気ホストシグナリング、より高度な新しいトランシーバー管理プロトコル、および新しい OTN サービスのを組み合わせるには、包括的で統合されたテストおよび検証アプローチが必要です。トランシーバー DSP、ホストインターフェイス、光ドメイン、および管理インターフェイス間の緊密なオーケストレーションには、この点で完全に統合され、各ドメインのイベントを追跡できるアプリケーションとテストツールが必要です。

ONT DCO は、製品ライフサイクルを通じてテストと検証のニーズに合わせて最適化されています。ONT DCOはトランシーバー管理およびコマンドインターフェイス上での相互作用をサポートする独自のツールを使用して、スタックからマルチサービスイーサネットおよび OTN に至るまで、物理レイヤー (PAM-4) のニーズに対応するアプリケーションと統合されたコヒーレントトランシーバーの厳しい環境要件と冷却要件をサポートします。

ポール・ブルック (Paul Brooks, VIAVI Solutions) 著