

高速コヒーレント伝送を支える チューナブル外部共振器レーザ

マイク・デスモンド

コヒーレント伝送が開始されてから、チューナブルレーザ技術には厳格な性能要件が課されるようになってきている。ますます多くの研究者らがそれらの要件の中に、幅広い種類の有効な属性を見出している。

チューナブルレーザは、高密度波長分割多重 (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) システムが1990年代終盤に登場して以来、光ファイバ通信において利用されている。当初は、最大で96個もの異なるDWDMチャネルのそれぞれに対して、異なる部品番号のレーザを調達するための物流を簡素化することが、チューナビリティのニーズを促す要因だった。10年前にコヒーレント伝送技術が出現し、より最近では小型フォームファクタでプラグラブルな400Gのコヒーレントモジュールが登場したことで、チューナブルレーザには、これまで以上に厳しい性能要件が課されるようになってきている。例えば、非常に狭い線幅、

非常に低い位相ノイズ、低い消費電力、小さなサイズ、さらに広いチューニング範囲などである。

リン化インジウムのゲインチップと、マイクロ光学素子またはシリコンフォトリクスを使用した外部レーザ共振器をベースとするチューナブルレーザは、そうした幅広い要件集合を満たし、最高速度を達成するコヒーレントシステムを支える主要な技術として、浮上している。

コヒーレント伝送

コヒーレント伝送は、情報が光信号の振幅だけでなく位相にも符号化される点が、従来の「直接検波」方式とは異なる。位相情報は、信号を局部発振

器レーザと比較してから、デジタル信号処理を施すことによって復元される。その処理は、無線やマイクロ波伝送で何十年も前から使用されているヘテロダイン検波方式に似ている。

コヒーレント伝送には、直接検波方式に勝る多くのメリットがある。例えば、信号対雑音比 (S/N比) は大幅に改善され (ノイズ耐性が高い)、1シンボルに複数ビットを詰め込むことができ (オンオフキーイング : OOK)、両方の極性で伝送が可能で、ファイバ障害のデジタル補償によって長い伝送距離に対応し、より柔軟な再構成が可能である。このようなメリットによってコヒーレント伝送は、海底ケーブルシステムに至るまでの80kmもの伝送距離にわたる高速データ転送に対して、主流の伝送方式となっている。最先端の商用システムは現在、1波長あたり800Gbit/sの伝送速度を達成し、1本のファイバ上に32個以上もの波長チャネルを提供する。

光周波数におけるコヒーレント伝送を可能にする技術進歩としては、先進的なデジタルシグナルプロセッサ (DSP)、ASIC、コヒーレントな変調器と受信器のフォトリック集積、超狭線幅のチューナブルレーザなどがある。直接検波システムでは、光の強度のみが測定される。ビットは、光子が存在するか否かによって1か0かが判断され、位相には依存しない。線幅は、レーザの位相の安定性を表す。直接検波システムでは、信号の位相は使用されないため、線幅は重要なパラメータで

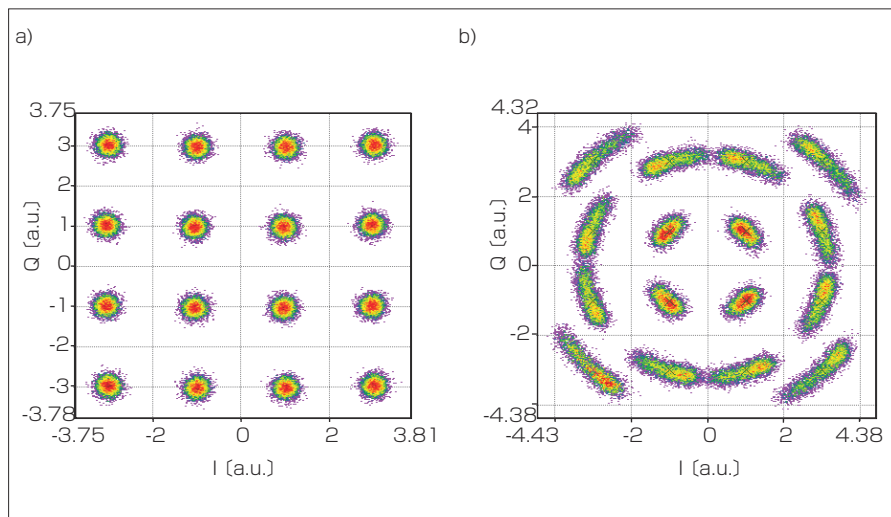


図1 16QAM方式のコンステレーション。(a)は位相ノイズなし、(b)は位相ノイズありで受信したもの。

はなく、一般的には10MHz以上の線幅が使用されていた。

一方、コヒーレント伝送では、情報が光信号の位相に符号化されるため、位相ノイズが重要となり、線幅が広いと、信号が劣化する可能性がある。

図1は、16QAM(Quadrature Amplitude Modulation: 直角位相振幅変調)方式のコヒーレント信号のコンステレーションを示したもので、(a)は位相ノイズなし、(b)は位相ノイズありで受信した場合である。図1(b)では、レーザ位相ノイズによって、16QAMコンステレーション内の3つの一定半径に沿って、コンステレーションポイントの位相が回転している。その悪影響として、いくつかの隣接するコンステレーションポイントが明確に区別できない状態になっており、それはシステムのビットエラー率の増加につながる。

高次変調方式で動作するシステムは、コンステレーションポイントのレイ密度が高く、ひずみの影響を受けやすいため、レーザ位相ノイズを低減する必要がある。また、高いボーレートで動作するシステムや伝送距離が長いシステムは、後述のイコライザで増幅された位相ノイズの影響を受けやすい。これにより、局部発振器(Local Oscillator: LO、コヒーレント受信器内で、信号を比較するリファレンスとして使用されるレーザ)の位相ノイズには、厳しい要件が課される。従って、「純度の高い」周波数を備える(線幅が狭く位相ノイズが低い)レーザしか、最高性能のコヒーレントシステムには使用できない。

外部共振器レーザ

コヒーレント伝送に用いられるレーザの種類としては、分布帰還型(distributed feedback: DFB)アレイ、分布



図2 マイクロ光学素子とシリコンフォトニクスをベースとした外部共振器レーザ。

ブラッグ反射型(Distributed Bragg Reflector: DBR)レーザ、外部共振器レーザ(External Cavity Laser: ECL)などがある。最初の2つは、ゲイン媒体を含む半導体チップに反射器を集積するもので、共振器の長さに制約があるために、線幅が限られる。ECLは、半導体ゲインチップとは独立した光共振器を使用する。この共振器は、マイクロ光学素子で構成するか、マイクロリング共振器(microring resonator: MRR、図2参照)を使用するシリコンフォトニクス集積素子で構成することができる。これにより、半導体導波路内での過剰な損失を回避しつつ、共振

器を延長することができる。レーザ共振器の基本理論によると、共振器が長いほどレーザの線幅は狭くなる。しかし、コヒーレントシステム内のレーザ性能はそれよりも複雑で、線幅の数値だけで表すことはできない。

レーザの線幅と位相ノイズ

線幅と位相ノイズがコヒーレント伝送に与える影響を理解するには、位相ノイズが基本レーザ周波数に隣接する周波数領域に、どのように分布するかを理解する必要がある。レーザ位相ノイズのパワースペクトル密度(Power Spectral Density: PSD)である $S_p(f)$

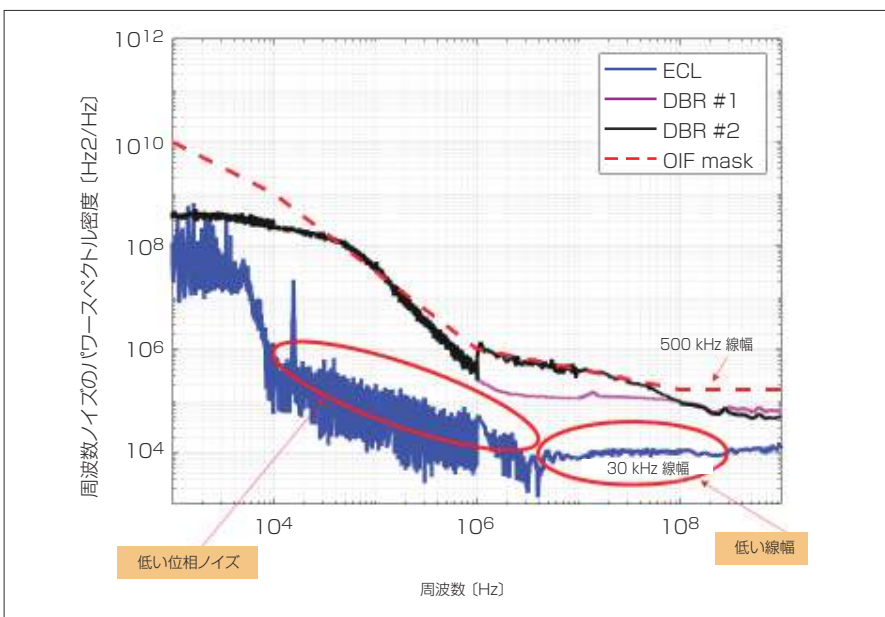


図3 非変調のコヒーレント受信器からのレーザ周波数ノイズの例。



図4 コヒーレント時代(2011~2021年)のチューナブルレーザのフォームファクタの進化と、400ZRのコヒーレントトランシーバ。

は、レーザ位相ノイズのパワー分布を周波数の関数として定量化するものである。重要なのは、位相が変化すると周波数に変化することである。従って、根底にあるノイズは、レーザ周波数ノイズのPSDである $SF(f)$ によって、等価的に表すことができる。チューナブルレーザのメーカーは、 $SF(f)$ と $Sp(f)$ には $SF(f) = f^2 \times Sp(f)$ という関係があることを理解した上で、 $SF(f)$ を測定してレーザ周波数の純度を確認するのが、より一般的である。

図3は、非変調のプラガブルコヒーレントトランシーバから測定された、レーザ周波数ノイズのPSD($SF(f)$)の例である。図3には3つの主要な周波数成分が示されている。1つめは、約10MHzよりも上の白色ノイズ領域、2つめは、200KHz~10MHzのフラットではない $1/f$ ノイズ(フリッカーノイズ)領域、3つめは、10MHzよりも下の周波数範囲全体に広がる複数の干渉トーンである。白色周波数ノイズのPSDは、自然放出ノイズに起因し、図3に示されているように、従来のレーザ線幅と直接的に関連する。言い換えると、レーザ線幅が狭いほど、白色周波数ノイズレベルは低下する。

$1/f$ 周波数ノイズの起源は明らかではないが、DBRチューナブルレーザにおいて特に高く、位相領域が波長のチューニングに用いられる場合に特に高い。位相チューニングの代わりに温度チューニングを使用する場合でも、DBRチューナブルレーザの $1/f$ ノイズはECLよりもはるかに高い。複数の干渉トーンは、プラガブルなコヒーレントモジュール内のスイッチング電源とさまざまな回路に起因するものである。

レーザ周波数または位相ノイズがコヒーレント伝送システムに与える最も重要な影響は、EEP(Enhanced Phase Noise: イコライザで増幅された位相ノイズ)と呼ばれる現象である。この現象は、光ファイバの伝送距離上で累積された波長分散(Chromatic Dispersion: CD)によって、送信パルス幅が大きく広げられる場合に生じる。一方、局部発振器(LO)の位相ノイズが、この広げられたパルス期間に大きく変動する場合は、受信パルスとLOの間のビート積には、受信器のデジタルCDイコライザにおける位相から振幅への変換による、大きな振幅ノイズが生じる。その結果、局部発振器レーザにおける3種類のすべての

周波数ノイズの組み合わせによって、システム性能に大きな影響が生じる可能性がある。

多くの最近の実験により、1波長あたり600Gbit/s、800Gbit/s、1Tbit/s、1.2Tbit/sのコヒーレントシステムに、狭いレーザ線幅と低い $1/f$ レーザ周波数ノイズが必須であることが実証されている。例えば、800Gの場合で、OSNR(光信号対雑音比)は400kmを超える伝送で2dB近く低下し、600Gの場合は、400kmの伝送で2dB以上低下する。2dBのOSNRの低下は、40%の距離の減少に相当するため、この低下幅は深刻である。ポーレートと変調次数は、どちらもしばらくは増加が見込まれるため、レーザの線幅と $1/f$ 周波数ノイズレベルに対する要件は、ますます厳しくなるばかりである。

サイズ、フォームファクタ、消費電力

サイズと消費電力は、レーザやそれ以外のどのようなコンポーネントにおいても必ず重要な属性だが、光学部品とDSPの両方の最近の進歩により、コヒーレントラインカードと等価なものを、小型フォームファクタのプラガ

ブルトランシーバに装備できるようになっている。ラインカードやその他の組み込みシステムは、電力が高くサイズが大きいほど耐性が高くなるが、DD-QSFPやOSFPなどの新しい小型フォームファクタのプラグブル装置は、物理的なスペースが非常にタイトで、それよりもさらに厳しいのは、放熱能力が非常に限られていることである。

幸い、チューナブルレーザのパッケージング技術は、そうした要件に歩調を合わせて進歩してきた。2011年には、ほとんどのチューナブルレーザが、**図4**の一番左に示されている、その当時の標準だったOIF (Optical Networking Forum)のITLAのフォームファクタで出荷されていた。長さは約74mm、幅は30.5mmだった。2015年になると、刷新されてフットプリントがほぼ半分に縮小された、OIFのMicro-ITLAのフォームファクタで、ほとんどのチューナブルレーザが、出荷されるようになった。

2021年になった現在、新世代フォームファクタであるNano-ITLAは、サイズがさらにほぼ半分に縮小されている。Nano-ITLAは、プラグブルな400ZRのQSFP-DDやOSFPモジュールの内部に収まるように設計されている(図4右端)。QSFP-DDまたはOSFPは、120kmの距離にわたって400Gbit/sのデータ伝送が可能な、フルコヒーレントトランシーバで(400ZR+はそれ以上の伝送距離に対応)、長さ78mm、幅20mmの標準的なクライアントサイドのフォームファクタに収容されている。そのサイズは、2011年のレーザだけのサイズよりもさらに小さい。しかもそのサイズ縮小は、レーザ線幅と位相ノイズ性能に影響を与えずに達成されている。

小型フォームファクタのコヒーレン

トプラグブルモジュールにおいて、サイズと同等に重要なのが、レーザの消費電力である。消費電力は、そうしたモジュールの性能の制約要因であることが非常に多い。DSPは、モジュールの中で最も消費電力が高いが、ほとんどの場合において、伝送性能を高めるにはDSPにより多くの処理を実行させる必要があり、それによって消費電力は増加し、より多くの熱が生成される。その電力を供給するには、他のすべてのコンポーネントの消費電力をできる限り低く抑える必要がある。レーザは、モジュールの中で2番目に消費電力が高い。しかし、光出力を低下させずに、消費電力を抑えることはできない。高いレーザ出力は、シリコンフォトニクス部品の挿入損失と高次変調に伴う変調損失を補償するために必要である。ECLは、共振器光学部品の損失が低いため、電気から光出力への変換効率が高い。また一般的に、さまざまな種類のチューナブルレーザの中で、最も消費電力が低い。

スペクトルチューニング範囲

ファイバの合計データ容量は、1本のチャンネルのデータレートだけでなく、伝送可能なDWDMチャンネル数にも依存する。チャンネル数は従来、EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier: エルビウム添加ファイバ増幅器)のスペクトルウィンドウによって制約されてきた。そのスペクトルウィンドウは、1528nmから1565.5nmのCバンドで、約4.8THzの帯域をカバーする。50GHzのDWDMグリッドで10Mbit/sで動作する従来の直接検波システムの

場合、これによって、チャンネル数は96、合計ファイバ容量は960Gbit/sとなる。

しかし現在は、Cバンドを高波長側と低波長側の両方に拡張してC++バンド(スーパーCバンドとも呼ばれる)を形成する、レーザ、変調器、受信器、EDFA増幅器が開発されている。C++バンドは1524nmから1572nmで、6THzの光帯域が利用可能である。ECLは、外部共振器がこの拡張範囲において良好な性能を示すため、性能をほとんど落とすことなく、この拡張範囲で動作することができる。

75GHzのDWDMグリッドで動作する400ZR QSFP-DDのプラグブルモジュールを使用する場合、C++バンドは80本のチャンネルと32Tbit/sの合計ファイバ容量をサポートする。従来のCバンドの容量は、Lバンド(1565.5nmから1611.8nm、5.8THzの帯域をカバー)も使用することによって、さらに2倍に増加させることができる。ただしそのためには、2つめの増幅器列を光伝送システムの中で使用することが必要になる。

ECLは、最も純度の高い(線幅が狭く位相ノイズが低い)光信号を達成するため、最高速度のコヒーレント接続に対して最適なレーザである。長距離にわたる伝送速度が600Gbit/s、800Gbit/s、そして近い将来には1.6Tbit/sまで増加するにつれて、このメリットはさらに高まる。ECLはそれ以外にも、光出力が高く、消費電力が低く、サイズが小さく、チューニング範囲が広いといった、多岐にわたるメリットを備えている。

著者紹介

マイク・デズモンド(Mike Desmond)は、米ネオフォトニクス社(NeoPhotonics)のコヒーレント部品担当副社長兼製品ラインマネージャー。

e-mail: michael.desmond@neophotonics.com URL: neophotonics.com

LFWJ