次世代のフェムト秒レーザ

フロリアン・エマウリー、アンドレアス・ソス

安定性に非常に優れた新しいフェムト秒レーザは、ギガヘルツオシロスコープ、通信回線、高精度レーダーなど、多種多様なアプリケーションをターゲットにしている。

フェムト秒レーザは、数十年の歳月をかけて進化を遂げ、その期間の大半において、科学研究の主力ツールとして活用されてきた。これらのシステムはほとんどの場合、チタンサファイア（Ti:sapphire）結晶に基づいている。どちらかといえば繊細なデバイスだったが、1980年代から画期的な研究成果の達成にも貢献しており、1999年と2018年にはノーベル賞を受賞している。

この20年間で、ターンキー操作の産業グレードのシステムが登場している。それらの多くがファイバ技術に基づいており、それによって長時間にわたる安定した動作が実現されているが、まだ制約は存在する。より最近では、モノリシック型の発振器が、スイスのメンヒル・フォトニクス社（Menhir Photonics）によって発表されている。同社は、スイス連邦工科大チューリッヒ校（ETH Zurich）からスピンオフした企業である。同社のモノリシック型発振器は、かつてないほどの安定性と性能を備え、現在は靴箱サイズの筐体で提供されているが、将来的にはマッチ箱かそれ以下のサイズに縮小される可能性を秘めている。そしてこれらのレーザはもう1つ、斬新な性質を備える。通常の郵便サービスでの配送が可能で、その後はターンキーで動作することである。

図1　近い将来、小型で頑丈なフェムト秒レーザが、衛星や航空機上の無線周波数（RF）信号の時間基準または時間源として使用されるようになるかもしれない（写真：48582746©Andrey Armyagov | Dreamstime.com）。

レーザは「問題を模索中の解決策」？

セオドア・メイマン（Theodore Maiman）のこの言葉は、第1世代のレーザについては正しかったかもしれないが、最新レーザについては間違いなく成立しない。新しいウルトラファーストレーザの実際の強みは、そのレーザパルスの卓越した安定性にある。これらのレーザのアプリケーション関連のタイミングジッタは、タイミング情報を分配する非常に要件の厳しいアプリケーションに不可欠となる、1fsよりもはるかに小さい。例えば、大型望遠鏡を運用していて、異なる望遠鏡からの信号を精密なタイミングで結合して1つの画像を生成しなければならない複数の施設で、これらのレーザが使用されている。レーダーについても、同じことがいえる。レーダーシステムは、従来の商用光ファイバによって分配された、精密なタイミング信号を使用して、異なるソースからの信号を結合することにより、さらに遠く、または、さらに細部を確認することができる。

粒子加速器は、この精密なタイミング信号を使用して、正確な瞬間にそのシステムをトリガする。ほぼ光の速度（30万km/s）で加速器管の中を循環する粒子を想像してほしい。1フェムト秒の間に、それらの粒子は0.3μm移動する。低ジッタのレーザ信号を、ファイバによって任意の加速器ステージと任意の測定デバイスに分配すること

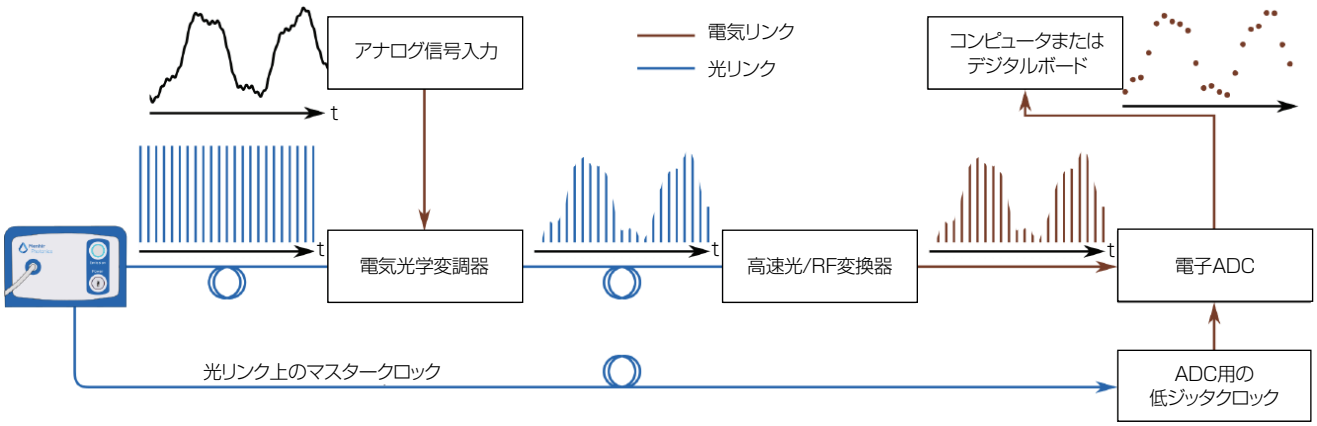

図2　フォトニックADCの例。パッシブモードロックレーザ（MENHIR-1550）が、入力信号の光学サンプリングと、超低タイミングジッタのクロック信号の電子ADCへの分配に使われている。各レーザパルス（青色）の強度は、アナログ信号によって変調される。光/電気（O/E）変換器により、入力信号のサンプリングイメージである電圧パルスが生成される。電子ADCは、入力された電気パルスをデジタル変換して、コンピュータボードに送信する。

が可能で、適切な信号を適切な瞬間に提供することができる。

ここまでは順調だが、これらはすべてニッチな市場である。もっと大きな野望はないのだろうか。

アナログ／デジタル変換

この60年間を通して、レーザは複数回にわたって技術的な後押しを受けた。最も大きくレーザを後押ししたのは、通信である。この分野において、半導体レーザ、低損失光ファイバ、そして後のエルビウム添加ファイバ増幅器の導入は、2つの影響をもたらした。1つは、インターネットの登場による社会変革だった。2つめは、想像を超えるエレクトロニクス技術とフォトニクス技術が推進されたことである。この巨大市場の需要は、レーザと光学コンポーネントの開発を加速させた。ギガビットやテラビットの通信回線は、その主な成果である。材料加工の分野をけん引してきたキロワットレベルのファイバレーザは、実はこのトレンドの素晴らしい副産物である。

通信は大きな市場であり、さらに広い帯域幅に対する需要は切迫している。これに応えて、伝送速度はギガヘルツレートを超えるまでに増加している。これはテスト技術において、問題となっている。テスト技術は、エレクトロニクスに基づくためである。タイミングがピコ秒レベルに深く達するようになると、電子テストはコストが高くなるか、単純に不可能になる。1GHz発振の1サイクルは、1000psである。このサイクルを、1サイクルあたり100ポイントの分解能で測定するには、10psの分解能が必要である。この信号を測定するには、検出器を正確な瞬間に起動して一定時間後に停止することを、10psの時間の間に行わなければならない。つまり、検出器の起動と停止の両方の操作を、10psよりもはるかに高い精度で行う必要がある。

このような精度を、適切なタイミングのレーザ信号によって達成することができる（**図2**）。デジタル変換を必要とする高周波信号を使用して、電気光学変調器（Electro Optical Modulator：EOM）を駆動する。EOMは、高い繰り返し周波数でレーザ信号を減衰し、連続的なアナログ信号を、個々に十分に間隔のあいたピーク列に変換する。これらのピークは、高速電子A/Dコン

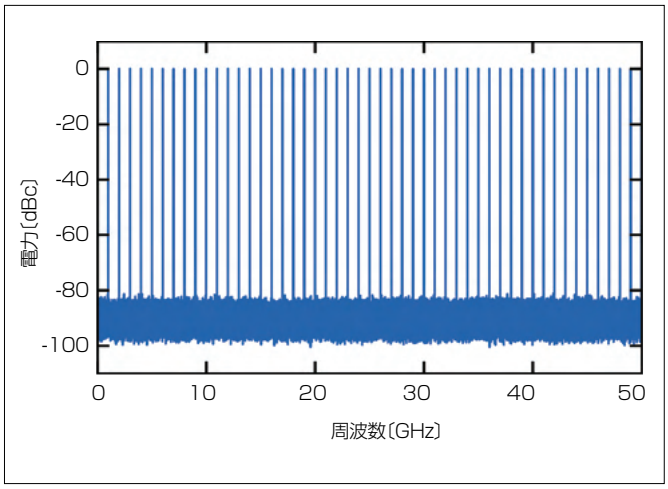

図3　レーザモードはスペクトル（周波数）領域において、非常に安定した周波数コムを形成する。すべてのトーンが互いに位相コヒーレントである。

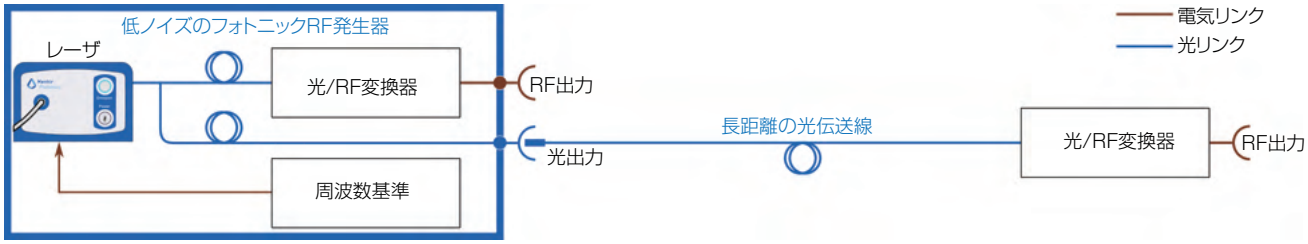

図4　MENHIR-1550レーザをフォトニック源として使用する、低ノイズのフォトニックRF発生器（青枠）の構成図。出力RF周波数は、発振器（レーザ）の基本周波数と、光/RF変換器の帯域幅という、2つの要素によって定義される。光出力は、局部発振器から離れた位置にRF信号を分配するために使用できる。

バータ（analog-to-digital converter：ADC）によって、デジタル信号に変換される。ADCは元のレーザ信号によってトリガされるため、変換が必要な信号と本質的に完璧にタイミングが一致している。レーザ信号のジッタは一般的に1fs未満で、2つのピーク（2つの測定ポイント）の間の間隔よりもはるかに小さい。

各ピークの持続時間は、レーザパルスの持続時間（1psよりも十分に短い）によって定義される。これは、2つのパルスの間の時間よりもはるかに小さい。従って、ADCの測定時間は、パルスの途中で区切れることにならない限り、さほど重要ではなくなる。以上により、アパーチャジッタは電子特性にはもはや依存せず、レーザパルスの長さに依存することになるため、レーザによって信号品質は向上する。「MENHIR-1550」レーザは振幅安定性が高く、109個の連続パルスにおける誤差が0.01%未満となっており、これも信号品質の向上につながる。

サンプリングレートが高い場合は、時分割多重を適用することができる。1つの1GHzレーザで複数のADCのクロッキングを行い、すべてのADCが、時間シフトしたトリガ信号を受信するようにすることによって、これを行う。100個のADCを使用することにより、100GHz相当のサンプリングレートを得ることができ、最大50GHzの信号の測定が可能になる。これは、シンプルなフォトニックADCを簡単に説明したものだが、より複雑なフォトニックADCを対象とした多数の技法が存在する。これらは、800Gbps、さらには1.2Tbpsをターゲットとする、次世代の通信プラットフォームを支えることになる。

これは、通信やデータセンターのネットワークにおいて、テストに使用される将来のサンプリングオシロスコープに対して、魅力的な手法である。この技術は宇宙でも試験済みであるため、将来の衛星通信に対しても魅力的なソリューションになる可能性がある。フォトニックADCは、宇宙における信号処理の難しさを大幅に軽減する可能性がある。

マイクロ波信号発生

高精度な測定に加えて、これらのレーザシステムは、低ノイズで低ジッタの無線周波数（RF）信号を生成することもできる。メガヘルツからギガヘルツの周波数範囲のRF源には、幅広い用途がある。レーダーはもちろんのこと、GPSや、4Gや5Gといった多くのワイヤレス通信技術にも利用することができる。

これらのアプリケーションは、クロック信号を電子発振器から受け取り、主にクォーツ結晶に依存する。10～100fsの光パルスを生成するモードロックレーザは、マイクロ波駆動のものよりもジッタが1000～1万倍も低いサンプリングクロックとして、機能することができる。マイクロ波信号発生器は、標準パルス幅が100psで、それ以外のパラメータはほぼ同じである[(1)]。極低温冷却など、クォーツクロックの精度を上げるための手法があるが、それらを適用すると、コストがかかり、サイズも大きくなる。

上述のメリットに加えて、レーザの物理学にも利点がある。超短パルスレーザはモードロック式である。これは、レーザ共振器のすべてのモードの和によって短パルスが生成されるように、すべてのモードが同期されることを意味する。モードは定常波である。最小周波数または最長波長のモードは、共振器と長さが全く等しい。それ以外のモードはすべて、この基本モード周波数の整数倍である。これを周波数空間で見ると、これらのモードは、基本モード周波数の間隔で等間隔に並んだピークとなる。そして好都合なことに、基本モード周波数はレーザ共振器の繰り返し周波数と一致する。また、モードロックというこの効率的なプロセス

により、モードはすべてコヒーレントであるため、位相関係は固定となる。これをスペクトルまたは周波数空間で見ると、周波数コムとして広く知られる状態が観測される。

ラインの間隔は、レーザ共振器長によって定義されるが、このような周波数コムの実際のスペクトル位置は、レーザの利得媒体によって主に定義される。つまり、中心周波数（または中心波長）が存在し、その周辺はモードが最も強くなる。

複数のモードがフォトダイオード上で干渉する場合、それらは周波数領域において、基本周波数のすべての整数倍（高調波）にパターンを形成する。繰り返し周波数のすべての整数倍を含む信号が得られ、各RFトーンは互いに位相コヒーレントな状態となる。電子フィルタリングによって、基本周波数の特定の倍数の成分を抽出することができる。レーザ源は、最大で650GHz以上の周波数を生成可能だが、検出器の帯域幅が、約50～100GHzで高周波をカットオフするフィルタとして機能する（**図3**）。

さて、これで何ができるだろうか。ここで、レーザ源で生成されたRF信号は、本質的に非常に安定していることに注意することが重要である。RF信号をあるポイントに生成して、その信号のコヒーレントな複製を、光ファイバによって元のRF源と接続された、まったく異なるポイントに生成することができる。この方法は、RF導波路よりもはるかに扱いやすく、損失も低い。その光出力は、過酷な環境下においても、数百メートル離れた先まで送信することができるため、必要なところにRF信号を生成することが可能である（**図4**）。どちらのRF信号も、レーザ信号の高い品質（ジッタが非常に低く、位相の安定性が高い）を引き継ぐことになる（**図5**）。

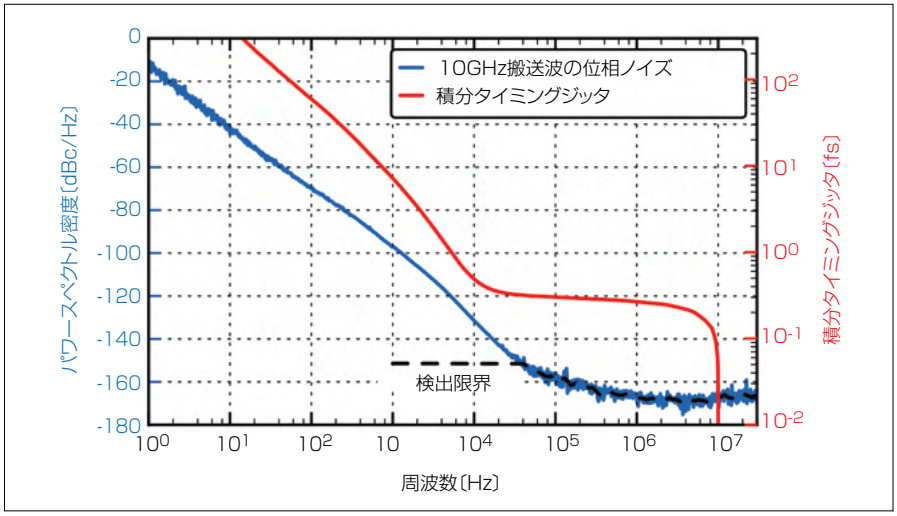

図5　第10次高調波信号（10GHz）で測定した、MENHIR-1550レーザの位相ノイズ（青色）とタイミングジッタ（赤色）。黒い破線は、特性評価設定の検出限界を示すものであり、レーザの本質的な限界を表すものではない。

RF信号を、8～12GHzの範囲のXバンドで選択することができる。このバンドはレーダーだけでなく、さまざまな通信システムにおいても利用されている。古いボイジャー（Voyager）などの深宇宙探査ミッションや、現在のキュリオシティ（Curiosity）などの月探査ミッションにおいて、Xバンドが通信に利用されている。Xバンドの一部の帯域は、軍事衛星通信用に予約されている。通常の通信衛星は、12～18GHzのいわゆるKu（K underの略）バンドを主に利用し、米スペースX社（SpaceX）の「Starlink」衛星は、24GHz周辺を利用している。どのようなRF信号でも、レーザ源によってかつてないほどの品質で生成することができる。

今後の展望

超短パルスレーザの新世代版が、まもなく市場に投入される。モノリシック型の共振器を搭載するこの種のレーザは、頑丈な筐体から非常に安定したパルスを発生する。その低いジッタと高い位相安定性の有効な活用が期待できる、数多くのアプリケーションが存在する。例えば、タイミング分配、高精度レーダー、通信技術などの分野では、ますます多くの機能でフォトニクスがエレクトロニクスにとって代わりつつある。この技術は宇宙分野における活用も見込まれており、このレーザ源に関連する多数の宇宙試験が成功裏に完了している。

参考文献

(1) A. Khilo et al., Opt. Express, 20, 4, 4454-4469 (2012); https://doi.org/10.1364/oe.20.004454.

著者紹介

フロリアン・エマウリー（Florian Emaury）は、スイスのメンヒル・フォトニクス社（Menhir Photonics）の最高経営責任者（CEO）。アンドレアス・ソス（Andreas Thoss）は、独ソス・メディア社（THOSS Media）の社長で、本誌寄稿編集者。

e-mail: th@thoss-media.de URL: http://www.thoss-media.de

LFWJ