

BOMPDーレーザーとマイクロ波源を結ぶ低ノイズブリッジ

フェムト秒の精度での超短パルスレーザーと高周波（RF）の同期化

はじめに

2000年代初期に、マサチューセッツ工科大学（MIT）の FranzKärtner のグループは困難な仕事に直面していました：彼らは MIT の X-線レーザープロジェクトに取り組んでおり、その目的は強化された自由電子レーザー（FEL）に基づく全国規模のユーザー施設を構築することでした。しかし、大型加速器を同期するための既存の方法は、X線 FEL（自由電子レーザー）を構成する新しいレーザー施設に必要なタイミング精度を提供できませんでした。そのため、彼らは新しいアイデアを思いつく必要がありました。

チャレンジ

一般に、光パルス列を電気発振に同期させるには、2つのシグナルを同じ形状に変換する必要があります。2004年までは、主に「直接光検出」を用いて光パルスの光子を電子に変換することで達成してきました。光検出器の読み出しから正弦波が生成され、マイクロ波信号と比較して位相エラーを検出できます。

直接光検出は実行しやすいため、検出する間に強度変動からの追加位相ノイズが在るにもにかかわらず、広く使われています。ただ、そのタイミング解像度は伝統的なマイクロ波混合装置を使っても、約 100fs に制限されます。そのため、先進的な加速器施設と特に自由電子レーザーは、さらに良好なタイミング精度を必要としました。

直接光検出の限界を克服するために、FranzKärtner と彼のグループに加わった MikePerrott は、2つの信号を比較する前に光を電気信号に変換する伝統的な手法に挑戦しました。光領域内でマイクロ波信号と光信号の間のタイミングオフセット値に関する情報を変換できれば、上記の限界を超えることができるでしょう。そして光検出器のタイミング特性は限定されていても、検出器のタイミング検出性能を限定することは無いでしょう。技術的に言えば、彼らのアイデアは、マイクロ波信号と光パルス列の間の位相エラーを、2つの光信号間の強度の相違に置き換えることでした。

解決策

彼らが思いついたアイデアこそ、現在の「BOMPD」（バランス光マイクロ波位相検出器）の基本概念であり、フェムト秒タイミングジッターを持つ電気装置へのレーザー光源などの光システムをロックする位相ロックループとして機能する世界中の多くの加速器施設の不可欠な構成要素となっています。

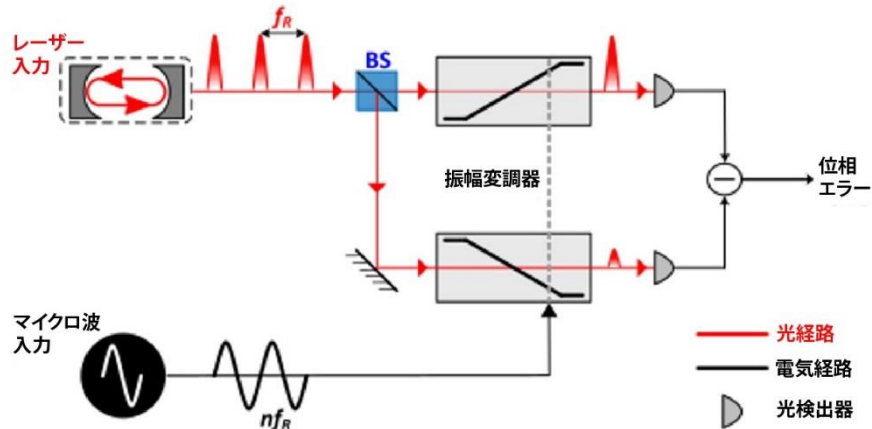


図1：バランス光マイクロ波位相検出器 (BOMPD) の概略図

直接光検出と同様に、BOMPDは2つの入力信号を受信します：光パルス列とマイクロ波信号。しかし、光そのものの信号の検出と2つのマイクロ波信号間の位相差を比較する代わりに、BOMPDは2つの異なることを実行します：まず最初に、マイクロ波信号を光振幅変調に置き換えます。そして次に、バランス検出器を用いて変調された信号を検出します。

図1に示されるように、BOMPDは入ってくるレーザーを2つの等しい経路に分離し、それらを2つの電気-光振幅変調器に送って、マイクロ波信号に従ってこれらのレーザーパルスの強度を変えます。入射パルスはゼロ変換とフル変換の間で変調されます。そして変調後に、2つの経路はバランス光検出器を使って検出されて、2つの経路間の強度の相違を生成します。

変調されたパルスの片方が変調器で完全に抑制されている場合、他方はもうひとつの変調器でフル変調されます。この場合、バランス検出器はその最大値を表示します。そして両方の入射パルスがマイクロ波のゼロ交差に到達すると、変調はパルス伝送を変化させないままとし、両方の経路が互いをキャンセルするため、バランス検出での信号はゼロ電圧となります。これは同じくバランス検出の大きな利点を示します：つまりレーザー入力信号のいかなる強度のふらつきもキャンセルします。

長時間に亘ってバランス検出器の出力信号をモニターすると、レーザー入力信号とマイクロ波入力信号間の位相相関が明らかとなります。信号が完璧な同期状態にある場合、一定電圧が出力として得られます。マイクロ波とレーザーパルス間の一定の位相シフトの場合、この電圧レベルはシフトします。そしてマイクロ波とレーザーが異なる周波数を示す場合、出力信号は両方の信号の周波数の相違で振動して変化する電圧信号、いわゆる「ビート周波数」を示します。

原理的にはBOMPDの片方の経路を変調することで十分ですが、両方の経路を変調することで、位相検出の感度が増強され、出力における位相-電圧曲線でのゼロ交差の可能性を高め、それはロック用のアプリケーションで位相エラーを用いる際に好まれます。

FranzKärtnerと彼のグループがBOMPD装置を実行する際、彼らはコヒーレントレーザー光の独自の特性である干渉を利用しました。干渉計は、光信号の強度を変調する簡単な方法をもたらし、信号間の 180° の必要な位相差で、干渉計の両方の経路の変調を直接的に行います。

Kärtner のシステムは位相変調器とサニャック・ループの組み合わせを用いました。これにより、温度や振動のような環境による変動の影響をさらに減らすことが可能となりました。この BOMPD により、彼らは低ノイズ VCO をフェムト秒ファイバーレーザーに成功裏に同期させることができ、あるいはその逆もできました（それぞれ図 2a と 2b を参照）。

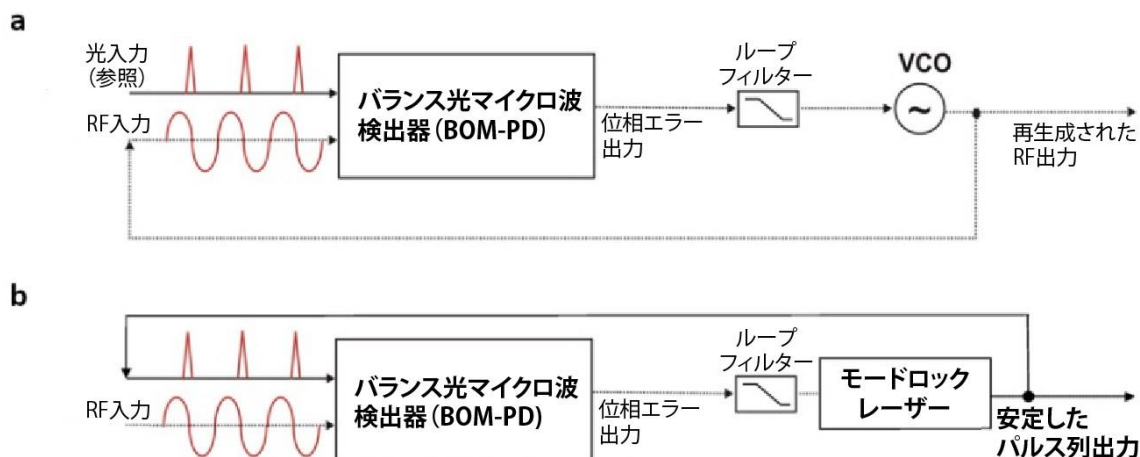


図 2 : BOMPD による同期化。(a) フェムト秒レーザーからのパルス列への VCO の同期化そして(b) マイクロ波信号へのフェムト秒レーザーの同期化。

BOMPD 技術の今

BOMPD の最新の標準版は、20fs 未満のタイミングジッターを提供しております。さらに低いタイミングジッターもご要望に応じており、特殊事例ではサブ fs 性能も達成しております。システムは 10 時間以上に亘って 20fsrms 未満のタイミングドリフトで長期的なロック状態を維持します。そして低いノイズフロアにより、BOMPD による計測は、 $<0.5\text{fs}$ のタイミング解像度を提供します。

BOMPD の感度は、V/fs 単位によるゼロ交差周りの線形勾配で決定されます。0.1mV/fs を超える典型値を持つため、標準的な直接光検出よりも 2 桁から 3 桁も高い感度を示し、高精度タイミング計測と同期化タスクにおいて BOMPD を適切なものとしております。

FranzKärtner は言います：「BOMPD とその基本原則なしでは、マイクロ波サブシステムと光レーザー間の同期化は、現代の自由電子レーザー施設で達成することは不可能でしょう。」

アプリケーション

10 年以上に亘って BOMPD 技術はトリエステの FERMI、スタンフォードの LCLS、大連コヒーレント光源と上海 XFEL などの世界中の大型加速器施設で稼動しております。これらの施設において、光とエレクトロニクス間の高精度が必要とされる場合には、常に BOMPD がその支えとなっております。

BOMPD は施設のレーザーとマイクロ波源の同期をもたらし、長期間に亘ってそれらをロック状態に保ちます。BOMPD はまた、安定したマスターレーザー発振器から RF 信号を（再）生成することにも役立っております。より多くの研究室がタイミングジッター計測用の高精度装置として BOMPD を利用しております。

「大型加速器は、アプリケーションのたったひとつの分野からはかけ離れた存在です。」と Kärtner 教授は続けます。「BOMPD はフェムト秒タイミングが必要とされるあらゆるアプリケーションで有用です。」 Cycle 社は、Kärtner によって設立されたハンブルグに本拠地がある会社であり、BOMPD の性能を改善し続けております。Cycle 社は、時間分解電子回折、顕微鏡法あるいは精細マイクロ波生成のような他の分野へのアプリケーション応用を広げております。そしてこの進行中の業績を通して、より多くの研究者が BOMPD の精細な電気-光同期からの恩恵に浴することとなるでしょう。

参考

Moncton, D. E., & Graves, W. S. (2004). The MIT X-ray laser project. *Radiation Physics and Chemistry*, 70(4-5), 577-586.

Kim, J., Ludwig, F. & Kärtner, F. X. (2004). Balanced optical-microwave phase detectors for optoelectronic phase-locked loops. *Opt. Lett.* 29, 2076

Peng, M.J. , Kalaydzhyan, A., & Kärtner, F. X. (2014). Balanced optical-microwave phase detector for subfemtosecond optical-RF synchronization. *Opt. Express* 22, 27102-27111