

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN マルチカラーレーザー同期ネットワークのタイミングドリフトを、常時、サブ・フェムト秒に抑える

Kemal Şafak^{1,2}, Ming Xin^{1,3}, Michael Y. Peng³ & Franz X. Kärtner^{1,3,4}

Received: 8 May 2018

Accepted: 18 July 2018

Published online: 09 August 2018

サブ原子時空間解像度で動いている原子を撮影することは我々の時代の顕著な科学的な努力の1つです。新興のX線レーザー施設はそれらのオングストロームレベル放射能波長によって原子の詳細な観察を可能にする最大の候補者です。必要な時間分解能を供給するために、多数のモードロックの掛かったレーザーが何キロメートルにも及ぶ距離全体で極端に高い精度で同期される必要があります。ここで、Cycle社は4.7kmの距離を越えて異なった中心波長と異なった繰り返しレートで稼働しているパルスレーザーのネットワークを同期させてメトロノームを実証します。この同期ネットワークはタイミングドリフトを40時間に亘って2 Hzのサンプリングで測って0.6fsRMSの最低記録を達成しました。短時間の安定性測定は、1Hzから1MHzを積分したわずか1.3fsRMSのループ外タイミングジッタを示します。ネットワークパフォーマンスの妥当性を検証するために、構成要素間のフィードバックフローに基づいて包括的なノイズ分析を行います。Cycle社の分析が特定したのは、9つの相関性の無いノイズ源を識別し、その中からスレーブレーザーの固有ジッタが1.26fsRMSで支配していることです。これはネットワークのタイミング精度が同期化技術によって制限されないことを示唆します。そのため、より低い固有ノイズのレーザーを開発することにより、さらなる改善が望めます。

レーザー科学の開拓者が初めて縦モードをHe-Neレーザーに閉じ込めることが可能となってから50年以上が経過しました。¹ それ以降、受動式モードロックレーザー²の発見は2つの発展している科学的な分野、すなわち高エネルギー超短光パルス生成と光周波数測定的基础を築いてきました。前者はチャープミラーによるチャープパルス増幅³とブロードバンド分散コントロールの発明で発展しています。^{4,5} この発明はアト秒物理学⁶とレーザーベースの粒子加速のような新しい研究分野の出現をもたらしました。⁷ これらの業績と平行して、光学式周波数距離測定が周波数測定不安定を小数点以下19番目⁹まで押し下げ、光時計の開発に導いた光周波数コム⁸の発明で発展しています。¹⁰ さらに、極端に鋭い縦モードラインを持つ明瞭な光周波数コムが、その存在をモードロックの掛かったレーザーで生成されたパルス列の完璧な時間周期性と振幅安定性に負うことが証明されています。¹¹ 今日、研究者は異なる国に置かれて¹²遠く隔たった光時計の周波数を比較することが可能となっており、これは「秒」の再定義へと繋がります。¹³ これらの出現から50年が経過し、これら2つの進化中の科学分野がふたたび力を合わせて、原子と電子の大きさに関するウルトラファースト構造力学を確立するという困難な仕事を成し遂げようとしています。この長く存続している科学的な念願の実現は、2つの基本的な進歩を必要とします。(i) 超短高強度コヒーレント硬X線光源および(ii) 必要とされる空間的・時間的解像度それぞれを供給できる超精細高安定タイミング供給。

新興のレーザーベースのアト秒科学施設(例えば、極端光施設¹⁴)とX線自由電子レーザー(XFEL)(例えば、ヨーロッパのXFEL¹⁵、LCLS II¹⁶)はすでに高い繰り返しレートで効率的な硬X線を産み出すという最初の挑戦に対する解決策を提供しています。しかしながら、それらが同時に必要とするのは、運用中のレーザー(例えば、投入レーザー、シードレーザー、ポンプレーザーなど)への施設全体に亘る高精度の同期を行って超短安定X線パルス¹⁷を生み出し、高精度時間分解光学励起X線調査実験を可能にすることです。¹⁸ そのため、第二の挑戦が必要とするのは、図1で示されるようなモードロックレーザー同期ネットワークの開発です。ここでは、マスターレーザーからのタイミングシグナル光が、タイミング安定化ファイバーリンクネットワークを経由して種々の離れた場所にあるスレーブレーザーに転送され、相対タイミングドリフトを数日に亘ってサブフェムト秒に抑えます。

¹Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestrasse 85, Hamburg, 22607, Germany. ²Cycle GmbH, Notkestrasse 85, Hamburg, 22607, Germany. ³Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 02139, USA. ⁴Department of Physics and the Hamburg Center for Ultrafast Imaging, Luruper Chaussee 149, 22761, Hamburg, Germany. Correspondence and requests for materials should be addressed to M.X. (email: xinm@mit.edu)

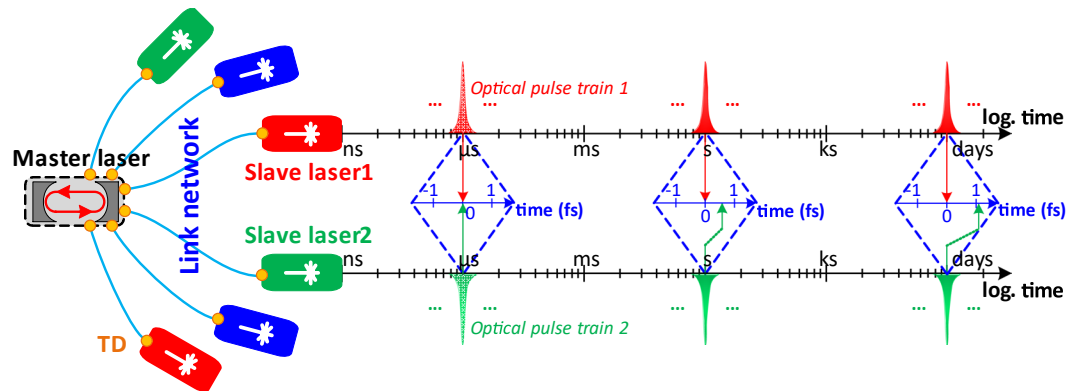


図1 複数日に亘ってドリフトをサブフェムト秒に抑える同期モードロックレーザーネットワークのレイアウト。赤および緑のパルスの持続時間と周期性は、時間軸で一定の比例にはなっていません。パルスの時間軸は対数軸となっており、片や、中央の時間軸はフェムト秒目盛での線形軸となっています。オレンジ色で満たされた円はタイミング検出器 (TD) を表します。

こうしたネットワークを構築するため、アト秒精度タイミング検出器^{19,20}、超低ノイズモードロックレーザー^{11,21} 離れた場所にあるスレーブレーザー²⁴⁻²⁶のドリフトなしのファイバーネットワーク送信^{22,23}と厳格な同期化が必要とされます。これらの個別の要素の実現可能性がすでに示されていますが、これらの構成要素を優れた特徴とするマルチカラー長期安定同期モードロックレーザーネットワークについての報告がこれまでありませんでした。これを達成するには、システムで発生しうるすべてのノイズ発生源に注意を払う必要があります。例えば、タイミングエラーがレーザーネットワークの出力に存在することもあります。マスターレーザーのタイミング信号がシステム由来のいかなるノイズも含まずにスレーブレーザーに伝達されるといった完ぺきな同期化が達成される場合であっても、もし対処をしないと、マスターレーザーの繰り返しレートでのスロドリフトがフェムト秒レベルのタイミングドリフトをもたらしかねません。マスターレーザーの繰り返しレートの長時間安定性に関する最も厳しい必要条件は「補償されていない」ビーム経路から生じます。例えば、長さがばらつくはずのない伝送時間の安定化のために使われる短い参照路がそれに当たります。この場合、式(1)が、マスターレーザーの繰り返しレート(補足情報を参照)の偏差により、ループ外のタイミングエラーを与えます。

$$\Delta t = \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} \frac{\Delta d}{c} \quad (1)$$

Frepがマスターレーザーの繰り返しレートであり、 Δf_{rep} はその偏差であり、 Δd は2つのファイバーリンクの間の補償されていないビームパスの長さの相違であり、 c は真空中の光速を表します。マスターレーザーが200MHzの繰り返しレートで稼働するためには、もし偏差が $\Delta f_{rep} = 1\text{kHz}$ のみで $\Delta d = 10\text{cm}$ の長さの相違を持っているとすると、2つのスレーブレーザーの間には $\sim 1.7\text{fs}$ のタイミングエラーが観察されるでしょう。従って、マスターレーザーの長時間安定性と補償されていないビームパスの長さの両方に相当の注意を払う必要があります。

さらに、同期化構造と単純さも、システムに存在するノイズ発生源の数を最小にするために重要な役割を果たします。光時計比較と遠隔レーザー同期化^{9,24}で広く使われる「継続波」(CW)手法は、ヘテロダインビートを得るため、スレーブモードロックレーザーのバンド幅以内の光周波数を持つ単色超安定転送レーザーを付加的に必要とします。そのために、多くの異波長の転送レーザー²⁴を使用してマルチカラーモードロックレーザー同期ネットワークを達成することになりますが、結果的にフィードバックシステムの複雑さとノイズ発生源の数の増加につながります。さらに、この構成は、異なった波長で稼働しているレーザーを同期させる必要がある場合、1550nm以外の波長での長い距離を越えるファイバー送信を非実現なものとして扱います。ここでCycle社は、タイミングドリフトを数日に亘ってサブフェムト秒に抑え、4.7kmの距離に亘って設置できるマルチカラーモードロックレーザー同期システムを提案します。このレーザーネットワークは、パルスタイミング同期計画に基づいて、1550nmの中心波長のモードロックレーザーをマスター発振器として使用します。CW手法と異なり、マスターレーザーの光信号は、タイミング安定化ファイバーリンクを経由して直接スレーブレーザーに伝達され、そこでは同期化がリンク出力とスレーブレーザーの間で四波の混合によって達成されています。2つの離れた場所にあるスレーブレーザー間で計測されたループ外タイミングドリフトは、0.6fs RMSを70,000s平均時間で 1.2×10^{-20} の相対タイミング不安定性に対応しながら40時間以上に亘って記録しました。Cycle社の知る限り、この記録は、ファイバーリンクネットワーク経由で同期している2つのスレーブレーザー間での複数日に亘って測られた最も低いタイミングドリフトです。さらに、Cycle社は1Hzより上でのシステムの短期間安定性を測定し、スレーブレーザー間の全体統合ジッタが1Hzと1MHzの間で統合してわずか1.3fs RMSであることを示します。Cycle社のノイズ分析が示すのは、スレーブレーザーの固有ジッタが1.26fs RMSを持つ最も支配的なノイズ発生源であることです。このことが意味するのは、レーザーネットワークの精度はCycle社の同期化計画によって制限されることはなく、より低いノイズモードロックレーザーを使用することでさらに改善するということです。この論文では、Cycle社はまずモードロックレーザー同期ネットワークの実験的な実施状況を説明し、それから測定結果を示します。その後、Cycle社は制約となるノイズ要因を見いだすためのタイミングジッタ分析を紹介し、

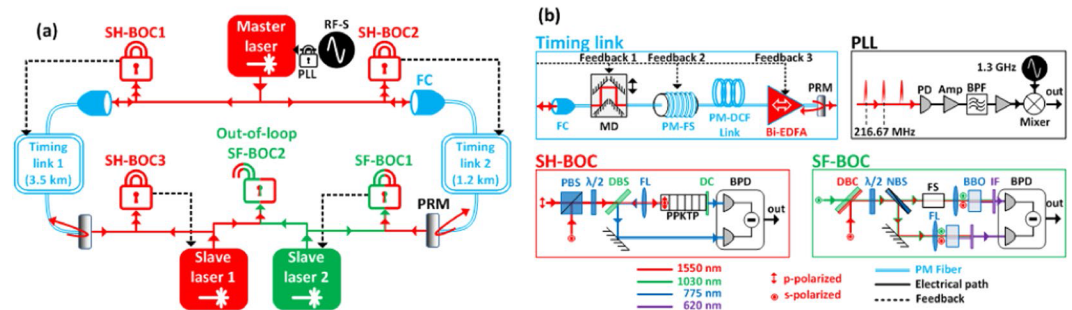


図 2. (a)モードロックレーザー同期ネットワークの実験的なセットアップ。すべての BOCは省略された「錠前マーク」で表示されています。錠の掛かった錠前がループ内検出器に相当し、開いている錠前がループ外検出器に相当します。(b) 個別の要素の詳細な概略図。略名: SH-BOC: 第二高調波バランス光クロスコリレータ; SF-BOC: 合波BOC; PLL: 位相ロックループ; RF-S: RF シンセサイザー; FC: ファイバーコリメーター; PRM: 部分反射ミラー; PBS: 偏波ビームスプリッター; $\lambda/2$: $\lambda/2$ 板; DBS: ダイクロイックビームスプリッター; FL: フォーカスレンズ; PPKTP: 周期的分極反転のリン酸チタニルカリウム結晶; DC: ダイクロイックコーティング; BPD: バランス光検出器; PD: 光検出器; AMP: 電圧アンプ; BPF: 1.3GHz電子バンドパスフィルター; DBC: ダイクロイックビームコンバイナ; NBS: ニュートラル50:50ビームスプリッター; FS: 溶融シリカプレート; BBO: ホウ酸バリウム結晶; IF: 干渉フィルター; MD: 自動遅延; PM-FS: 偏波面保存ファイバーストレッチャー; PM-DCF: PM 分散保証ファイバー; Bi-EDFA: 双方向性エルビウム添加光ファイバー増幅器。

実験的なセットアップ

図 2 (a) で示すように、Cycle社は実験的にモードロックレーザー同期ネットワークを実現しました。3つの隔たったレーザーが、4.7kmの長さに亘って2つの異なるタイミング安定化ファイバーリンクでスター・ネットワークトポロジーとして同期しています。Cycle社は、バランス光クロスコリレータ (BOC)¹⁹を使用してパルスタイミング同期計画²⁷⁻²⁹を応用し、偏波面保存 (PM) ファイバーリンクを通して信号遅延を安定させると同時にリンク出力において離れた場所にあるスレーブレーザーを同期します。Cycle社のマスターレーザーは商業的に利用可能なモードロックレーザー (OneFive社製Origami-15) を使用し、216.67MHz の繰り返しレート、1554nmの中心波長そして172fsのパルス幅で稼働します。このマスターレーザーは、1kHz - 1MHz³⁰間の統合でわずか0.4fsRMSの自走時タイミングジッタで稼働します。長期の周波数ドリフトを避けるため、マスターレーザーの繰り返しレートは位相ロックループ (図 2 (b) での PLL) を使用して (100Hz未満の) 小さいオフセット周波数でより低い位相ノイズとなるよう高周波 (RF) シンセサイザーに対してロックされています。マスターレーザーの出力は、2つの独立したタイミングリンクに分けられ、全体で4.7kmの長さとなります。それぞれのリンクは、PM分散補償ファイバースプール、PMファイバーストレッチャーおよび自動ディレイラインステージで構成されています (図 2 (b) で「タイミングリンク」図を参照)。

それぞれのリンク端にある部分反射ミラーがリンク入力に戻る光出力の10%を反映します。ミラーの前の双方向エルビウムドープファイバー増幅装置が、パルスエネルギーを前後方向に増幅し、リンク入力側でのリンク安定化およびリンク出力側でのレーザー同期化に十分な出力を供給します。往復伝送に関してパルスのタイミングは1554nm波長用に設計されたII型第二高調波BOCを使用してマスターレーザーからの新しいパルスと比較されます (図2(b)の SH-BOC)。光相互相関は、2つの直角に分極化された入力パルスの間に置かれた非線形結晶の複屈折を通して達成されます。このようにして、SH-BOC1とSH-BOC2 がタイミングリンクで増幅遅延変動を検出し、それぞれ長期のタイミングドリフトと速いタイミングジッタに対して補償するべき自動遅延とファイバーストレッチャー (図2(b)でのFeedback1とFeedback2) にフィードバックされる電圧応答を生成します。さらに3番目のフィードバックが光ファイバー増幅器の励起電流に送られ、自動遅延の動きにおけるビーム位置調整不足を原因とするリンク出力変動を排除します。Cycle社のこれまでの業績で詳述されているように光出力偏差が、BOC検出計画では修正できない残余分散と光ファイバーの非線形性による複合効果によるファイバーリンク出力でのタイミングジッタとドリフトを引き起こします。このフィードバックメカニズムがこれらの影響のノイズ寄与を最小にすることにより、アト秒精度タイミングリンク安定化を保証します。タイミングリンクの出力は、2台のスレーブモードロックレーザーの遠隔同期のために使用されます。スレーブレーザー1 (OneFive社製Origami-15) はマスターレーザーとまったく同一です。SH-BOC3を構築することで、イントラキャビティピエゾ駆動ミラーを経由して繰り返しレートを調整することにより、スレーブレーザー1とタイミングリンク1の出力を同期することができます。片や、スレーブレーザー2 (OneFive社製Origami-10) は、54.17MHzの繰り返しレートと、ヨーロッパのXFEL³¹で使用されているポンププロセッサシステムのような、Ybベース増幅チェーンのシード光として広く使われる1030nmを中心波長とする出力光学スペクトルで動作します。スレーブレーザー2をタイミングリンク2の出力に同期させるため、I型合波BOC (SF-BOC1) が、2つのBBO結晶を使って1030nmと1554nmでの動作用に構築されます (図2(b)のSF-BOC概略図を参照)。SF-BOCの2つの光路の間の遅延時間差は、ガラス板でバランス検出のタイミング感度を最大にするように調節されます。それぞれのスレーブレーザーからの出力の一部がループ外タイミングディテクタ (すなわち、図2(a)でのSF-BOC2) 用に使用されレーザーネットワークのタイミング精度を評価します。

実験的なセットアップには、光学定盤2台全体のスペースを必要とします。マスターレーザー、SH-BOC1 およびSH-BOC2は、1台目の光学定盤の上に置かれ、積極的に温度の安定化が図られ、音響的に隔離された容器で覆われています。ファイバーリンクはその容器の外に設置され、研究室内で環境による変動に晒されます。

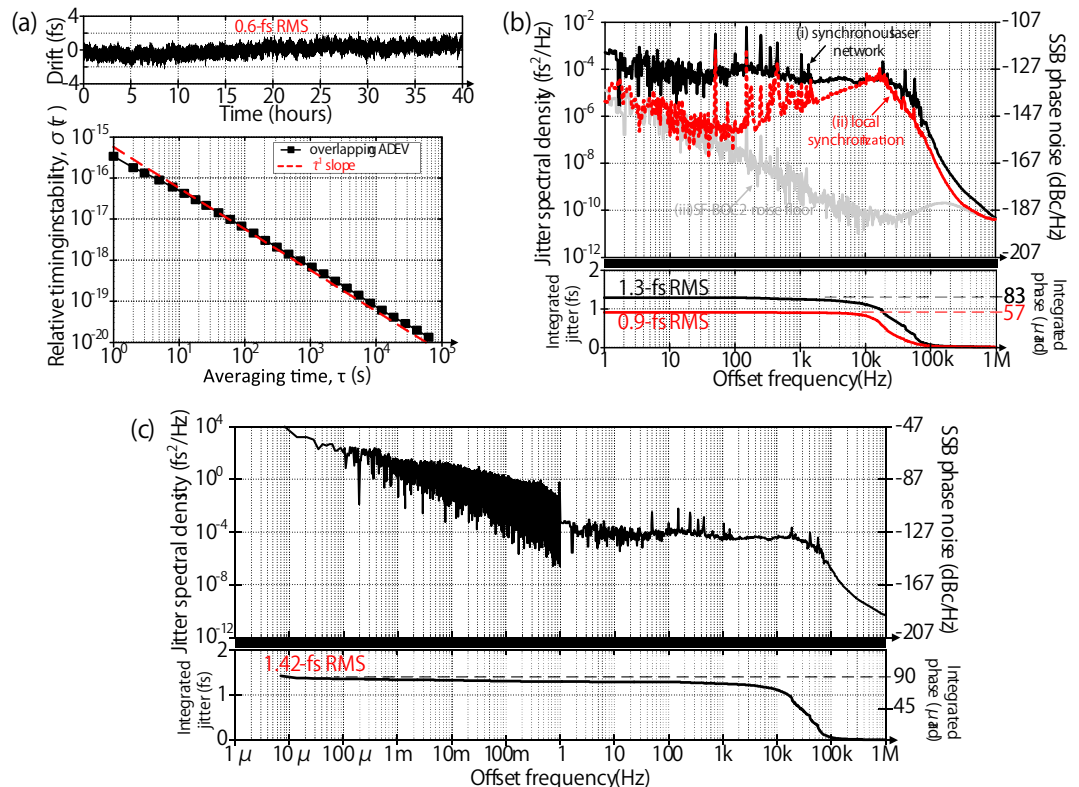


図3.モードロックレーザー同期ネットワークの実験結果 (a) 長期性能; 上のグラフのデータは2Hzでサンプルを取った相対タイミングドリフトを示し、下のグラフが相対タイミング不安定性対平均時間を示します。留意点としては、1Hz未満の測定ノイズがRMSとしてわずか ~ 0.8 であることです。(手法セクション参照) (b) 1Hzより上での短期性能; (i) レーザーネットワークでの相対タイミングジッタスペクトル密度と統合タイミングジッタ; (ii) スレーブレザーと (iii) SF-BOC2のノイズフロアの間のローカルな同期化。留意点としては、1Hz - 1MHz間で統合されたRMSとして、検出器ノイズフロアがわずか12であることです。(c) $7\mu\text{Hz}$ から1MHzまでの完全な測定範囲としてのタイミングジッタと位相ノイズ。(b)と(c)の右端軸が示すのは、10GHzの搬送波周波数で取り直された同等シングルサイドバンド(SSB)位相ノイズです。

リンク出力は第2の光学定盤に接続され、そこではスレーブレザー、SH-BOC3、SF-BOC1およびSF-BOC2がもう1つの光学式容器の中に構築されます。

実験結果

図3が示すのがループ外タイミングディテクタで計測された実験結果であり、このディテクタが2つの遠隔で同期されたスレーブレザーの出力パルス列の間の強度クロスコリレーションを実行します。図3(a)で示される結果の1つ目のグラフは、モードロックレーザー同期ネットワークの長期性能を説明します。スレーブレザー間の相対タイミングドリフトは40時間に亘ってわずか0.6fsRMSであり、明白な長期変動がない継続した測定となっています。この結果は、今までに何キロにも及ぶ距離に亘って共通のレファレンスに2つの遠隔に同期されたモードロックレーザーの間で計測された最も低いタイミング不安定性に相当します。図3(a)での2つ目のグラフは、タイミングドリフトデータから算出された重なり合うアラン分散を示します。レーザーネットワークは10sの平均時間(τ)後にわずか 5×10^{-17} の相対タイミング不安定性を示し、 τ^{-1} に非常に近い勾配に沿って ~ 8000 s後に小数点第20位での不安定性限界を越えます。この傾斜特性が示すのは、長い測定時間であってもレーザーネットワークが超過タイミングドリフトを持たないということです。短時間目盛でのタイミングジッタ分析は、更なる改善に向けてシステムの構成要素のノイズ寄与を調べるためには不可欠です。Cycle社は、SF-BOC2の電圧出力をその周波数要素に分解するベースバンドアナライザーで同期レーザーネットワークのタイミングジッタスペクトル密度を計測します。図3(b)の黒い曲線は、計測されたループ外タイミングジッタを示します。50Hz高調波で観察された出力ライン支線を除外すると、完全なスペクトルは $9 \times 10^{-4}\text{fs}^2/\text{Hz}$ のジッタスペクトル密度を下回ります。この結果は、4.7km隔てて設置されている2台の10GHz発振器の間の1Hzにおいてわずか $-118\text{dBc}/\text{Hz}$ 相対位相ノイズに相当します。さらに、レーザーネットワークの統合タイミングジッタは、1Hz $\sim$ 1MHzまでの範囲で積分されたわずか1.3fs($\pm 0.006\text{fs}$)のみとなります。この結果は、10GHzの搬送波周波数において $83\mu\text{rad}$ ($\pm 0.4\mu\text{rad}$)の相対位相エラーに対応し、そこでは手法の節で示されるように計測値の不確かさがタイミング感度の測定エラーから生じます。留意する必要があるのは、1MHz超のノイズは検出器ノイズフロアで覆い隠され、無視できることです。これは図3(b)でレーザーネットワークの統合タイミングジッタで明確に示されており、10kHz $\sim$ 100kHzの範囲のオフセット周波数から最も顕著なノイズ寄与を有しています。ネットワークの高周波ノイズ限界を調査するために、スレーブレザーはリンクから外され、SF-BOC2を介して互いにローカルに同期させられます。図3(b)の赤い曲線は、ローカルな同期化のループ内ジッタ

スペクトル密度を示し、10kHzと1MHzの周波数範囲でネットワーク結果に対して密接に従属します。ループ内検出器はロックするバンド幅より低い周波数(〜10kHz)でのスレーブレザー間のノイズを明瞭にできないので、ローカルな同期化のタイミングジッタスペクトル密度は、この領域(図3(b)の10kHzより低い赤色の点グラフカーブ参照)でのネットワーク結果からより大きい偏差を示します。にもかかわらず、ローカルな同期化の統合タイミングジッタが0.9fsRMS程度であることから分かるのは、ロックするバンド幅を越えるスレーブレザーの固有タイミングジッタが顕著なノイズ寄与であることです。

図3(c)が示すのは、7μHz〜1MHz(すなわち、1μs〜40hの時間領域で)の範囲の全測定範囲でのレーザーネットワークのタイミングジッタスペクトルです。このネットワークは、1.42fsRMSの全体のタイミングジッタを持ちます。もし10kHzより上のノイズ寄与を除外すると、総合タイミングジッタはアト秒領域に留まります。すなわち、1kHzから7μHzまでの統合RMSとして670を示します。

タイミングジッタの源

この節では、光パルス列とファイバーリンクを使用するタイミング転送の限界を理解するために、モードロックレーザー同期ネットワークのタイミングジッタ分析を提示します。システムに内在するノイズ源から生み出されるタイミングジッタを簡単な手法で計測し、数量化します。例えば、図3(b)に示されるローカルな同期化のタイミングジッタ測定がスレーブレザーの固有ノイズを表します。しかしながら、多くのフィードバックループが使われているCycle社の同期モードロックレーザーネットワークのような複雑なシステムでは実際のジッタ寄与を決定できません。このような複雑な内部依存性から生じるタイミングジッタの源を識別する効果的な方法は、構成要素間のフィードバックフローを調査することです³²。ここで、Cycle社は、自社の最近の業績から適応させた包括的なフィードバックループ分析と共に、自社のレーザーネットワークのノイズ源を決定します³²。ノイズ源の詳細な由来は補足情報で説明されます。Cycle社の分析によれば、スレーブレザー間で計測されたループ外タイミングジッタスペクトル密度は以下となります。

$$\begin{aligned} J_{out}^2 = & |C_M|^2 J_M^2 + |C_{S1}|^2 J_{S1}^2 + |C_{S2}|^2 J_{S2}^2 + |C_{E,L1}|^2 J_{E,L1}^2 + \quad (2) \\ & |C_{E,L2}|^2 J_{E,L2}^2 + |C_{N,S1}|^2 J_{N,S1}^2 \\ & + |C_{N,S2}|^2 J_{N,S2}^2 + |C_{N,L1}|^2 J_{N,L1}^2 + |C_{N,L2}|^2 J_{N,L2}^2 \end{aligned}$$

全体として、ループ外のタイミングジッタに9つの相関性の無いノイズ源があります。JM、JS1およびJS2はそれぞれマスターレーザー、スレーブレザー1およびスレーブレザー2の自走タイミングジッタを表します。JE、L1とJE、L2は、一方向の送信のためにタイミングリンク1とタイミングリンク2に強いられた統合環境ノイズです。JN、S1とJN、S2が表すのは、スレーブレザーをタイミングリンク出力に同期させている、SH-BOC3とSF-BOC1に基づくフィードバックコントロールの電氣的ノイズです。一方、JN、L1とJN、L2は、タイミングリンクを安定させているSH-BOC1とSH-BOC2に基づくフィードバックコントロールの電氣的ノイズです。それぞれのノイズ源(CM、CS1、CS2、CE、L1、CE、L2、CN、S1、CN、S2、CN、L1およびCN、L2)の前の項は、周波数依存複合「ジッタ伝達関数」であり、レーザーネットワークのループ外タイミングジッタへのノイズ源の寄与を決定します。留意すべき点は、式(2)に含まれるすべての項が、実験的なパラメータを使って計測あるいは計算できることです。(方法のセクションを参照)

図4(a)は100Hzから100kHzの範囲のタイミングジッタ分析の結果を表し、右側の注釈は統合されたジッタのカラーコードとグラフ下部のジッタスペクトル密度を示します。留意すべきは、オフセット周波数の下限は、100Hz未満では確認されなかったマスターレーザーの自走タイミングジッタによって設定されるのに対し、高周波限界は、100kHzよりも上の測定ノイズフロアより小さいタイミングリンクの環境ノイズによって設定されることです。Cycle社が図3(b)で示されるローカルな同期化結果から推測したように、最も顕著なノイズ寄与はスレーブレザー2に起因し、それは1.26fsのRMS統合ジッタで全タイミングジッタスペクトルを支配します。タイミングリンクに関する環境ノイズは、10kHz未満のオフセット周波数のフィードバックループによってかなり抑制されます。しかしながら、留意すべきは、0.28fsRMSでタイミングリンク1の環境ジッタを2番目に大きなノイズ発生源にするPZT共鳴です。(図4(a)で濃い緑色のカーブが示す70kHz辺りにあるジッタピークを参照) マスターレーザーとスレーブレザー1は、0.11fsRMSと0.10fsRMS統合ジッタという小さな寄与を示しますが、その理由はスレーブレザー2と比べてより低い固有ノイズを持つためです。さらに、Cycle社のシステムの中の最小の支配的ジッタ寄与が4つの電氣的ノイズ条件であるため、BOCロック計画によって提供される低いノイズフロアの利点を確認できます。

最終的に、図4(b)が式(2)に含まれるすべてのノイズ源の合計と測定結果を比較します。算出ジッタスペクトルは実験と非常に良く合致し、20kHz辺りのサーボバンプや1kHzより下の電氣的ノイズ変動などの測定されたジッタ構造の多くを明らかにします。スペクトルの統合が1.31fsの総合ジッタをもたらし、それは非常にうまく実験に合致します。それにもかかわらず、15kHzと40kHzの間で特にオフセット周波数での測定と計算の間の若干の偏差があります。この周波数領域は、フィードバックシステム全体でPZT共鳴によって大いに影響を受けます。Cycle社では、モデリングにそれらの共鳴周波数を含めることにより、計算と測定との間の合致がさらに改善されるものと信じます。

結論

結論として、Cycle社は長期のサブフェムト秒安定性を持つ4.7kmの距離を越えるマルチカラーレーザー同期ネットワークの完成を報告します。Cycle社は40時間に亘って2つの遠隔レーザー間で0.6fsRMSの最低記録ループ外タイミングドリフトの検出に成功しています。ドリフトデータのアラン分散計算が示すのは、決定論的なτ⁻¹勾配に重なることによって、10sでの5 × 10⁻¹⁷の相対タイミング不安定性が70,000sでの1.2 × 10⁻²⁰に到達することです。

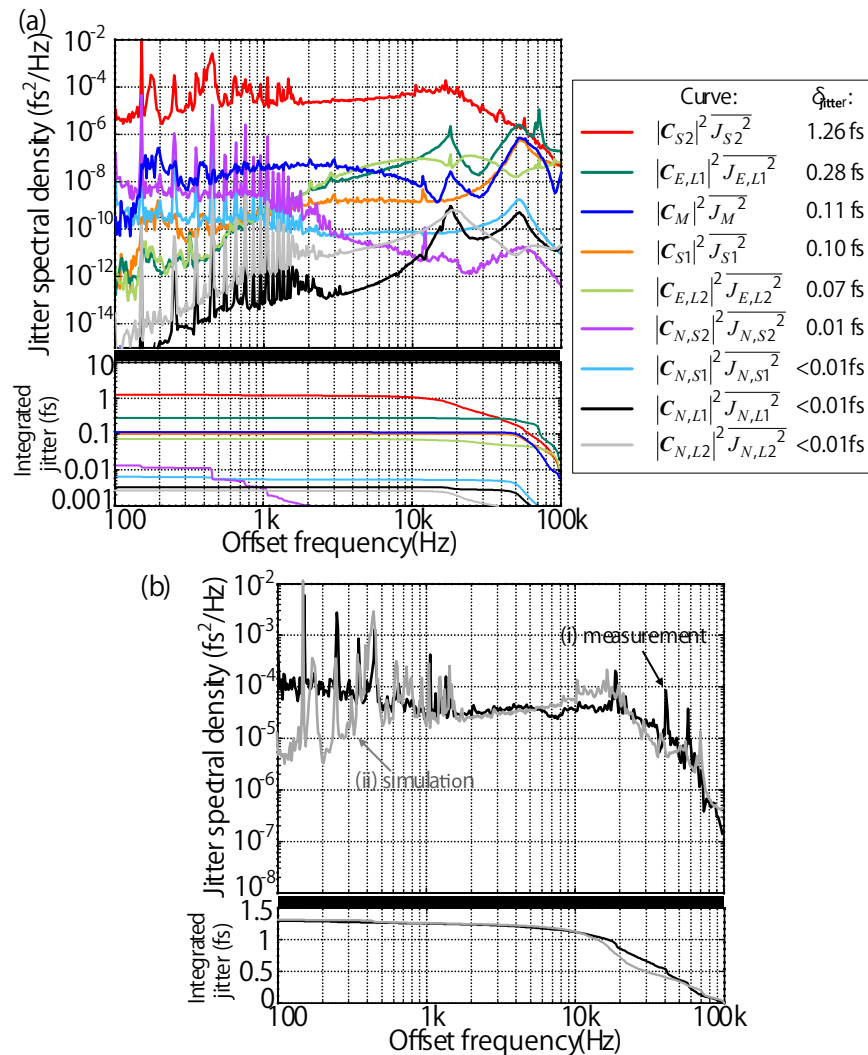


図4 レーザー同期ネットワークのノイズ源。(a) それぞれのノイズ源のジッタスペクトル密度と対数軸でのそれらの統合タイミングジッタ。右側の注釈はグラフのカラーコードを示す。(b) (i) 計測されたループ外タイミングジッタ、(ii) (a) で与えられたすべての計算されたノイズ源の合計。

このことが明確に示しているのは、レーザー同期ネットワークは超過タイミングドリフトを蓄積することではなく、結果的に2つの離れた場所にあるスレーブレザーの間のタイミング不安定性が増加する積分時間に対して逆に減少することです。Cycle社はこのレーザーネットワークのループ外ジッタスペクトル密度も計測し、それは1Hzから1MHzの範囲でわずか1.3fsRMSの統合されたジッタを示します。包括的なフィードバックループ分析を行うことにより、Cycle社はレーザーネットワーク内の9つの独立したノイズ源を明確にしました。スレーブレザー2の固有ジッタは1.26fsRMS総合ジッタという最も優勢なノイズ源であるのに対して、フィードバックループから生じる電氣的ノイズは、BOCをロックするシステムの高いSN比により、0.01fsRMSの総合ジッタのみに寄与します。詳細な分析により、Cycle社が結論とするのは、同期モードロックレーザーネットワークの高周波性能は、より低い固有ノイズを持つレーザーを開発することによって、アト秒領域まで改善することが可能であるということです。

このような同期レーザーネットワークがX線レーザー研究施設に最も高い時間分解能を提供し、ウルトラファースト分子力学分野に於ける新たな発見に導くことができるとCycle社は信じます。さらに、提示したネットワークは、離れた光時計間の比較¹²、マルチ望遠鏡列³³を使った低温黒体の精細画像化、超長基線電波干渉法を使った地表面と大気の測地学のモデリングなどの意欲的で大規模な科学的探究にも応用することができます³⁴。

手法

ループ外タイミング計測 すべてのタイミング計測装置とそれらのフィードバックループを実験的なセットアップ(図2(a)でのPLL、SH-BOC1-3とSF-BOC1を参照)上でいったん始動すると、スレーブレザーの繰返しレートがタイミングリンクを経由して遠隔でマスターレーザーにロックされます。それから、自動ディレイラインステージを使用して2つの光パルス列を時間的に重ね、それらの相対タイミングを自走のSF-BOC2で計測します。このとき、SF-BOC2の出力は1DCVです。タイミング感度を測るために、パルス列間の相対ディレイを掃引し、同時にSF-BOC2の応答電圧を記録します。応答電圧のゼロ交差近辺の線形勾配はmV/fs

単位のタイミング感度となります。SF-BOC2のタイミング感度の5つの独立した測定が、傾斜不確実性を原因とする $\pm 0.066\text{mV/fs}$ の計測エラーを伴う 14.96mV/fs の平均値をもたらします。図3(a)の長期ドリフトデータを計測するには、1Hzのローパスアンチエイリアシングフィルターでループ外信号をフィルターし、かつ2Hzのサンプリングレートでそれを記録します。この計測でのノイズフロアは、 $12\mu\text{VRMS}$ と特定される測定装置(NI USB-6211)のノイズで支配されます。ループ外BOCのタイミング感度を考慮すると、1Hzより下の測定ノイズはRMSとしてわずか ~ 0.8 であると言えます。図3(b)でのジッタスペクトル密度データは、シグナル源分析装置(Agilent E5052B)で計測されたSF-BOC2の出力電圧のベースバンド出力スペクトルです。図3(c)で、1Hzより上のデータは、図3(b)でのデータセット(i)と同一です。一方、1Hzより下のデータは、図3(a)でのドリフトデータのフーリエ周波数要素です。

ノイズ源とそれらのジッタ伝達関数

式(2)の分析的な由来が補足情報で示されます。マスターレーザーとスレーブレザー1が同一であるため、Cycle社は両方のレーザー($J_M^2 = J_{S1}^2$)についてこれまでの発表論文から実験データを採用しています。スレーブレザー2(J_{S2}^2)の固有タイミングジッタは、図3(b)に示されるローカルな同期化データから得られ、補足情報で詳述されます。リンク($J_{E,L1}^2, J_{E,L2}^2$)上の環境ノイズ源は、それらのフィードバックループが稼働していないときにシグナル発生源分析装置付のSH-BOC1とSH-BOC2の自走出力を測ることにより実験的に得られます。そして、電氣的ノイズ要素($J_{N,S1}^2, J_{N,S2}^2, J_{N,L1}^2, J_{N,L2}^2$)とジッタ伝達関数

$$(|C_M|^2, |C_{S1}|^2, |C_{S2}|^2, |C_{E,L1}|^2, |C_{E,L2}|^2, |C_{N,S1}|^2, |C_{N,S2}|^2, |C_{N,L1}|^2, |C_{N,L2}|^2)$$

は、補足情報で説明されているように、実験的なパラメータを使用して計算されます。補足情報にある図S3とS4が示すのは、すべてのノイズ源のジッタスペクトル密度とそれぞれの計算されたジッタ伝達関数です。

データの利用可能性

著者はこの原稿のすべてのデータが利用可能であると宣言します。

参考

- Hargrove, L. E., Fork, R. L. & Pollack, M. A. 同期イントラキャビティ変調によって誘導されたHe-Neレーザーモードのロック。Appl. Phys. Lett. 5, 4–5 (1964).
- Ippen, E. P., Shank, C. V. & Dienes, A. CW色素レーザーの受動的モードロック。Appl. Phys. Lett. 21, 348–350 (1972).
- Strickland, D. & Mourou, G. 増幅チャープパルスの圧縮。Opt. Commun. 55, 447–449 (1985).
- Szipöcs, R., Ferencz, K., Spielmann, C. & Krausz, F. フェムト秒レーザーでのブロードバンド分散制御のための多層コーティング。Opt. Lett. 19, 201–203 (1994).
- Kärtner, F. X. et al. ダブルチャープミラーの設計と製作。Opt. Lett. 22, 831–833 (1997).
- Krausz, F. & Ivanov, M. アト秒物理学Rev. Mod. Phys. 81, 163 (2009).
- Mourou, G. A., Tajima, T. & Bulanov, S. V. 相対論的領域での光学。Rev. Mod. Phys. 78, 309 (2006).
- Jones, D. J. et al. フェムト秒モードロックレーザーと直接光周波数合成のキャリアエンベロープ位相コントロール。Science 288, 635–639 (2000).
- Predehl, K. et al. 小数点以下第19位の周波数測定のための920km長の光ファイバーリンク。Science 336, 441–444 (2012).
- Ushijima, I., Takamoto, M., Das, M., Ohkubo, T. & Katori, H. 低温光格子時計。Nat. Photonics 9, 185–189 (2015).
- Benedick, A. J., Fujimoto, J. G. & Kärtner, F. X. アト秒ジッタを伴う光学式はずみ車Nat. Photonics 6, 97–100 (2012).
- Lisdat, C. et al. 測地学と基本的な科学のための時計ネットワーク。Nat. Commun. 7, 12443 (2016).
- Gill, P. 我々はいつ秒の鮮明度を変えるべきか? Phil. Trans. R. Soc. A 369, 4109–4130 (2011).
- Mourou, G. & Tajima, T. より強く短いパルス。Science 331, 41–42 (2011).
- Altarelli, M. et al. 欧州X線自由電子レーザー。Technical Design Report, DESY 97, 1–26 (2006).
- Stohr, J. 直線加速器コヒーレント光源II(LCLS-II)の概念的な設計報告。United States. <https://doi.org/10.2172/1029479> (2011).
- Chambaret, J. et al. 極端光でのインフラストラクチャー：構造と主な挑戦In Proc. SPIE 7721: Solid State Lasers and Amplifiers IV, and High-Power Lasers, 77211D. <https://doi.org/10.1117/12.854687> (2010).
- Ulrich, J., Rudenko, A. & Moshhammer, R. 自由電子レーザー：分子物理学および光化学における新たな道。Annu. Rev. Phys. Chem. 63, 635–660 (2012).
- Schibli, T. R. et al. バランスクロスコリレーションによる受動式モードロックレーザーのアト秒での能動的同期化。Opt. Lett. 28, 947–949 (2003).
- Mainz, R. E. et al. 柔軟、正確、精細なパラメトリックサブサイクル波形形成のための高ダイナミックレンジ到達時制御Opt. Express 25, 3052–3068 (2017).
- Kim, H. et al. サブ20アト秒タイミングジッタモードロックファイバーレーザー IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 260–267 (2014).
- Peng, M. Y. et al. 1.2kmの偏波面保存ファイバーリンク経由での10-21のリンク安定性を備えた長期に亘って安定したサブフェムト秒のタイミング供給。Opt. Express 21, 19982–19989 (2013).
- Xin, M. et al. アト秒精度複数キロメートルレーザーマイクロ波ネットワーク。Light Sci. Appl. 6, e16187 (2017).
- Coddington, I. et al. 何百メートルと何百テラヘルツに亘ってサブフェムト秒タイミングジッタを伴うコヒーレント光リンク。Nat. Photonics 1, 283–287 (2007).
- Xin, M., Şafak, K., Peng, M. Y., Callahan, P. T. & Kärtner, F. X. 3.5km長のファイバーリンクによる1フェムト秒、長期安定遠隔レーザー同期。Opt. Express 22, 14904–14912 (2014).
- Li, H. et al. 2つの受動式モードロックレーザー間での遠隔2色光-光同期。Opt. Lett. 39, 5325–5328 (2014).
- Kim, J., Cox, J. A., Chen, J. & Kärtner, F. X. 遠隔の光源およびマイクロ波源でのドリフトなしのフェムト秒タイミング同期。Nat. Photonics 2, 733–736 (2008).
- Schulz, S. et al. エックス線自由電子レーザーのフェムト秒全光同期。Nat. Commun. 6, 5938 (2015).

29. Xin, M. et al. 複数キロメートル離れたでのタイミング同期化システムでのフェムト秒障壁の打破IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 23, 97–108 (2017).
30. Şafak, K., Xin, M., Callahan, P. T., Peng, M. Y. & Kärtner, F. X. 数フェムト秒ジッタを伴う自由電子レーザー用のファイバー接合長期安定タイミング供給. Struct. Dyn. 2, 041715 (2015).
31. Pergament, M. et al. 欧州X線自由電子レーザー施設での実験用汎用光学用レーザーシステム. Opt. Express 24, 29349–29359 (2016).
32. Şafak, K. et al. タイミング供給と遠隔レーザー同期システムのジッタ分析. Opt. Express 24, 21752–21766 (2016).
33. Wootten, A. & Thompson, A. R. アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計. Proc. IEEE 97, 1463–1471 (2009).
34. Clivati, C. et al. コヒーレント光リンク経由での遠隔原子時計を使った VLBI (超長基線電波干渉法) 実験. Sci. Rep. 7, 40992 (2017).

謝辞

著者は、実験にてレーザーOrigami-10の使用を許可してくださったことに対してLaurens Wissmann博士、Jinxiong Wang博士およびMaximilian Lederer博士に感謝します。この仕事は、欧州連合の7番目の枠組みプログラム (FP/2007-2013)/ERC Grant Agreement n. 609920 およびドイツ研究振興協会の優秀な集まり「ウルトラファースト画像化のためのハンブルグセンター」の下にあるヨーロッパ研究評議会によってサポートされました。

著者寄稿

F.X.K. がプロジェクトを始めました。K.?, M.X., M.Y.P. と F.X.K. が実験を案出し、設計しました。K.?, M.X. が実験を行い、システムでタイミングジッタの発生源を調査しました。すべての著者は原稿の準備に貢献しました。

Additional Information

Supplementary information accompanies this paper at <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30348-2>.

Competing Interests: The authors declare no competing interests.

Publisher's note: Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.