

## 研究報告書

### 「(光の極限制御・積極利用と新分野開拓)光時間周波数離散直交変換による超高速連続光計測とその仮想化」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2015年12月～2019年3月

研究者: 坂本 高秀

#### 1. 研究のねらい

本研究では、超高速光信号の連続一括取得を可能とする、光時間周波数離散直交変換器を提案・開発する。瞬間的な超高速光現象をシングルショットで捉える、柔軟かつ実践的な超高速光計測の形態を提唱し、各分野への応用を探る。典型的に用いられてきた時間軸上での超高速光サンプリングを廃し、超短光パルス技術・非線形光学技術への依存を回避する。代わりに、光ファイバ通信の分野で実用化の進む光電子回路、デジタル信号処理技術を駆使した実践的なハードウェア構成で、多様性・実用性に優れた超高速光計測技術を確立する。ここでは、本申請者等が光ファイバ通信応用のために培ってきた、コヒーレント光信号合成・検出、光多重技術を積極的に活用し、中核的な役割を与える。

短光パルスを用いる従来型の間欠的な光サンプリングと異なり、光時間周波数離散直交変換器では、超高速・広帯域被測定光信号を時間周波数空間に線形投影し、光振幅・位相情報を一括して連続的に取得する。達成目標性能は、光信号帯域: 数 100 GHz～THz (10<sup>11</sup>～10<sup>12</sup> Hz)以上、サンプリングレート: 毎秒 100 G～1T(10<sup>9</sup>～10<sup>12</sup>)サンプル点以上、連続取得時間: 数 1 マイクロ～ミリ(10<sup>-6</sup>～10<sup>-3</sup>)秒以上とし、この時間周波数ブロック内で引き起こされる全ての事象を捉える。取得信号は低速の電気信号群として、デジタル空間内に格納し、デジタル信号処理を施す。この操作の線形性、完全性に着目し、デジタル空間上に、既存の任意の線形的光計測・解析手法を実装し、超高速光測定器の仮想化を目指す。時間領域のみならず、周波数領域、時間周波数領域等での超高速光計測・解析手法の仮想化により、このアプローチの多様性・万能性を示す。

工学的実践応用を強く意識し、超高速物理現象の解明等に貢献する、新しい超高速光計測プラットフォームとしてのスタンダード確立を目指す。加えて、入力インターフェースの工夫により、物理計測、光回路デバイス解析に留まらず、各分野への応用、連携展開を探る。また、短光パルスを廃した測定器形態を活かし、光ダメージの少ない、低光尖頭値での超高速光計測技術に繋げる。

#### 2. 研究成果

##### (1) 概要

本研究では、光時間周波数離散直交変換器を提案・開発し、連続測定に優れた超高速光計測能力を実証した。この技術では、被測定光信号を時間周波数領域に直交投影し、長いタイムフレームを持った被測定光信号ブロック内の光振幅・位相情報を全て一括して連続取得する。ブロック内で引き起こされる超高速光現象を捉え、真にシングルショット計測を行う超高速光計測器を可能とする。

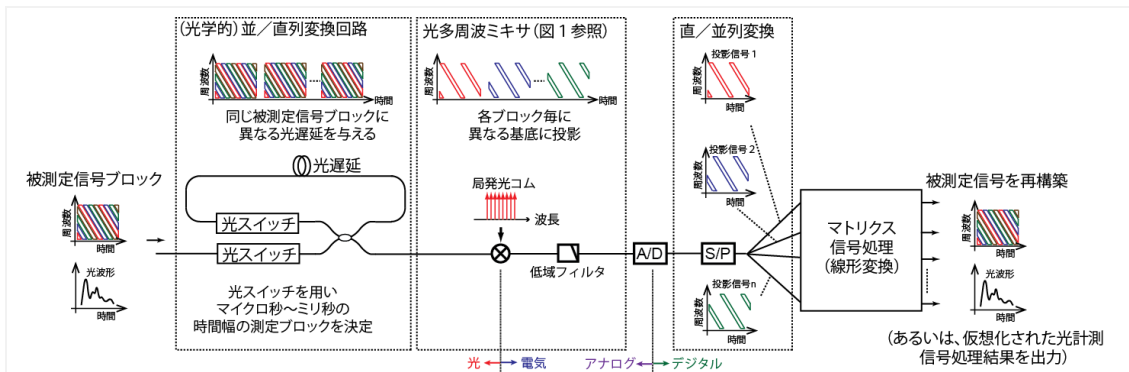


図 1 : ループ型光時間周波数分散直交変換器

図1は、本研究で実証した、ループ型の光時間周波数分散直交変換器の基本構成である。光時間周波数分散直交変換器では、互いに直交した光コム群を発生し、被測定光信号との光多周波ミキシングを行った。光コムの振幅、位相と整合のとれた光信号成分のみが低速電気信号として検出され、超高速被測定光信号が光コムにより形成される光時間周波数軸に投影される。本研究では、光段にてループ遅延構成を設け、多並列の光検出構成を持つ光時間周波数分散直交変換器を模した。光段で、並/直列変換を行い、逐次光多周波ミキシングを行った後、逆の直/並列変換を電気段で行うことにより、単一の光検出器のみを用いて、高次の光時間周波数分散直交変換を可能とする。原理実証のみにとどまらず、長時間の超高速連続測定を可能とし、計測器としても実践性に耐える。

本構成を用いて、次数8の光時間周波数分散直交変換を実証した。帯域10GHzの従来型コヒーレント光検出器を光検出部に用いることにより、80GHz(=8x10GHz)の光時間周波数分散直交変換帯域を確保した。時間領域換算で80GSa/sの光サンプリングレートの確保に成功した。タイムフレームや次数の拡張は、柔軟に行うことができる。ループ型の光時間周波数分散直交変換器の限界は、光段、電気段のメモリ長といったプラクティカルな要因により決まる。開発構成では、1TSa/s以上のサンプリングレート、数10usec以上の連続測定窓のハードウェア能力を有する。

また、光時間周波数分散直交変換器の特徴である、完全性、線形性を活かし、任意の線形操作をデジタル空間上に実装できることを示した。時間領域、周波数領域での光計測機能を確認した。

## (2) 詳細

本研究では、1. 光時間周波数分散直交変換器の開発、2. 超高速光計測の実証、及びその仮想化、3. 物理計測への応用の探求)の流れで研究開発を行ってきた。3に関しては異分野との連携が必須であり、継続課題として後述の「3. 今後の展開」の項で述べる。

### 1. 光時間周波数分散直交変換器の開発(研究テーマA)

“時間周波数分散直交変換器”の開発を行うためには、柔軟な制御性に優れた光コム光源の開発、及び、光時間周波数空間のコヒーレント化、電氣的デジタル補償技術の開発が必須となる。後述の、ループ型光時間周波数分散直交変換器構築を想定し、以下の要素技術を開発を行った。

## 1. 1. コム光源開発

光時間周波数帯域離散直交変換器には、スペクトル平坦性に優れた光コムが求められる。光変調器型の光コム光源は、的確な駆動により、平坦スペクトルを持った光コムを生成することができ、本目的に最適である。光時間周波数帯域離散直交変換器の光検出器帯域は、生成光コム帯域幅により決定される。ただ、光コム帯域の拡張を図ると、変調器の駆動周波数の高周波が求められ、高周波回路への負担が大きくなる、という現実的な問題が存在する。

ここでは、光コム帯域の光周波数間隔を柔軟に制御できる、新しいコム生成の手法を提案した。(ア)直列型光変調器を用いる方式、(イ)並列型光変調器を用いる方式を提案、検証した。(ア)直列型光変調器を用いる方式では、Uniform型、及び、non-uniform型の直列方式を提示した。前者では、直列数(N)に比例した光コム帯域拡張が図れる。一定の光コム帯域を確保するためには、光コム周波数間隔を $1/N$ に抑えることができる。また、non-uniform型を適用することにより、光コム周波数間隔を、更に $1/M(M=2\sim5)$ 程度抑えられることが確認された。

一方、(イ)並列型光変調器を用いる方式では、並列型の光変調器構成により、高周波数間隔の光コム生成が行えることを示した。(光フィルタ等の光段の処理に依存せずに)光変調器のみを用いて、任意の光周波数間隔を持つ光コムを生成できることを示した。また、その手法を解析的に導出した。このような光コム生成はこれまでに存在しておらず、光コム生成の新機軸を示すことに成功した。

上記の結果は、国際会議(OECC)、著名海外論文誌(Optics letters)に投稿し採択された。時間周波数空間投影に際して、柔軟な投影を可能とする。サンプリング操作の高分解能化、柔軟化に繋がる。コム光源自体としても多方面への応用が期待できる。

## 1. 2. コヒーレント光時間周波数空間の確保、電氣的デジタル補償技術の開発

光時間周波数離散直交変換器においては、(1)投影された光信号間のコヒーレンスを確保し、かつ、(2)光信号歪みを回避しなくてはならない。被測定信号波形を復元するために必要な投影信号間の直交性を、十分に確保するためである。

前者に関しては、被測定信号光に対し、参照光(パイロット光)挿入することにより、被測定信号間位相差を確定させた。後者に関しては、以下に述べるように、時間周波数領域での信号等化手法を提案し、理論整備を行った。

光時間周波数離散直交変換を行い、被測定光信号を取得、復元する際、光ファイバ中の群速度分散の影響が無視できず、信号復元を阻害する主要因となる。ここでは、群速度分散を時間周波数領域で記述し、光ファイバの時間周波数伝達関数を特定した。この逆関数を適用することにより、光時間周波数離散直交変換における分散補償をシステムティックに行うことが可能となる。本検討に関しては、論文投稿準備中である。

## 2. 超高速光計測の実証、及びその仮想化(研究テーマB)

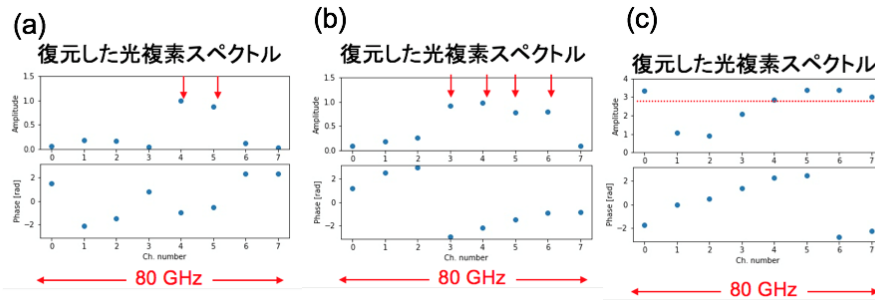


図 2 : 光複素スペクトルの測定結果 (例)

ループ型時間周波数離散直交変換器を開発(図1)し、超高速光信号計測能力の実証を行った。時間周波数ミキサの実効的な並列化に欠かせない、並/直列、直/並列変換回路開発を行った。光ファイバ遅延線及び、光スイッチを用い、ループ構造を持った光遅延回路を構築し、 $n$ 次元時間周波数離散直交変換器を構築した。この構成を用いることにより、次数はループ長さ、光スイッチの時間制御タイミングによって、柔軟に時間周波数離散直交変換器の次数  $n$  を達成することができる。

特に、次数 8 の光時間周波数離散直交変換器構成により、本方式の原理実証を行った。光検出部に、帯域 10 GHz のコヒーレント光検出器を適用することにより、光検出帯域 80 GHz(=8x10 GHz)の光時間周波数離散直交変換器を構築した。本構成で得られる時間領域換算の光サンプリングレートは、80 GSa/s となる。

## 2. 1. 基本性能(超高速光信号検出)の確認

開発したループ型時間周波数離散直交変換器を用い、複素光スペクトル計測能力を確認した。複素光スペクトルを得るためには、(ア)光時間周波数離散直交変換器による被測定光信号の直交投影・検出、(イ)時間波形復元、(ウ)線形光計測仮想化、の全段を作動させる必要がある。この場合、(ウ)の仮想化は、FFT 変換を適用し、複素光スペクトル計測機能を仮想実装した。(ア)の光時間周波数離散直交変換の線型性、完全性により、(イ)や(ウ)の操作・処理を可能とし、原理的に保証される。

図2は、光周波数成分数が既知の平坦光コムを計測し、得られた複素光スペクトル群である。それぞれ、(a)2本、(b)4本、(c)8本の光周波数成分を持つ、光周波数間隔が10GHzの光周波数コムを計測した場合の計測結果である。想定通りの光周波数成分数が得られており、本方式の原理が実験的に確認された。(c)8本の場合においては、各光周波数成分強度にうなりが確認された。(光時間周波数領域で定義される)スプリアス成分からの影響、もしくは、ループ型時間周波数離散直交変換器に内在する光ファイバ、受光器の不完全性に由来すると考えられる。これらの対策に関しては、変換次数の冗長化、及び、時間周波数信号等化の適用により克服できると考えられる。

上述の光複素スペクトルの評価は、本方式の全ての処理、制御要素を統合することによって得られるものであり、他の線形な光計測を柔軟に「仮想実装」が可能であることを保証できる。光スペクトルアナライザ等といった確立された計測機器に夜計測結果と比較できるため、本計測手法の初期校正法として、手法確立が期待できる。

## 2. 2. 光通信用信号検出による連続計測能力の実証

この回路を用い、光通信用伝送信号検出を行った。最大 160Gb/s の光通信用超高速光信号の受信実験を行い、超高速、連続光検出機能を実証した。

被測定光信号には、時間領域、周波数領域、時間周波数領域で光多重された超高速光信号に対し、同一のハードウェア構成での光受信能力が実証されている。時間領域、周波数領域、時間周波数領域での光検出能力の仮想化に成功したことになる。

著名国際会議、著名海外論文誌 (OSA Journal of Lightwave Technology, 招待論文) での報告を行った。また、各成果の論文投稿を準備中である。

## 3. 今後の展開

物理計測への応用の探求が課題として残っている。被測定物質に光を照射し、光時間周波数離散直交変換器で検出するための、入力インターフェースのあり方を探っていく。また、並行して、本計測技術の需要発掘を行っていく。連携研究による発展、展開を引き続き目指していく。

また、本研究で実証したループ型光時間周波数離散直交変換器をベースに、ピコ秒級の時間分解能を持つ超高速光オシロスコープとしての装置化を目指し、社会実装につなげていきたい。

## 4. 自己評価

### ① 研究目的の達成状況

研究の原理実証に関しては、想定通りの結果を得た。研究成果としての对外発表等は進行中の課題であり、研究期間、期間後を通じて、論文投稿等の活動を継続していきたい。また、数値的な性能向上に関しては、改良の余地があり、こちらに関しても、研究期間、期間後を通じて、向上を図って行きたい。

### ② 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究実施体制に関しては、基本的には、研究代表者が主体となり、責任を持って研究活動を実施してきた。サブテーマ(光コム光源開発、信号処理等)を大学との共同研究により展開することにより、研究進捗を加速させると共に、多くの副産物的成果を得た。また、期間中、民間企業との議論を開始し、今後の成果展開等を視野に入れた取り組みを始めることができた。

研究費は、的確に活用でき、研究の終盤での部分的軌道修正にも対応できた。展示会出展用の増額措置による研究費も加えて的確に執行を完了する。

### ③ 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

光計測器応用として、ローエンドな応用に関しては、比較的、近い将来の実用化を十分に視野に入れられる。その一方で、ハイエンドな応用は、極限光計測技術として、光計測基盤技術として、計測技術開拓を進め、科学技術分野各方面にインパクトを与えていきたい。

<領域独自の評価項目>

④ 異分野との交流他による新たな研究ネットワークの構築

学会参加前後に、内外の研究機関訪問を積極的に行い、各分野の研究者との意見交換を積極的に行った。領域存続期間等を通じて、領域内外の他のさきがけ研究者との連携を加速させていきたい。

⑤ 新たな視点や発想の創出

本研究により、より高度かつ柔軟な光コム生成手法考案に繋がるなど、発展技術の創出を行うことができ、光計測に留まらず、各方面への応用展開の可能性が見えた。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. <b>T. Sakamoto</b> , and A. Chiba, "Multiple Frequency-Spaced Flat Optical Comb Generation Using Multiple-Parallel Phase Modulator," <i>Opt. Lett.</i> , vol. 42, no. 21, pp. 4462-4465, Nov. 2017.                       |
| 2. <b>T. Sakamoto</b> , G.W. Lu, and N. Yamamoto, "Loop-Assisted Coherent Matched Detector for Parallel Time-Frequency Sampling (invited paper)," <i>OSA J. Lightwave Technol.</i> , vol. 35, no. 4, pp. 807-814, Jan. 2017. |

(2)特許出願

研究期間累積件数:3件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発明者: 坂本 高秀  
発明の名称: 空間整合受信  
出願人: 情報通信研究機構  
出願日: 2017/3/17  
出願番号: 2017-053742

2.

発明者: 坂本 高秀  
発明の名称: 間隔制御型光コム  
出願人: 情報通信研究機構  
出願日: 2016/9/30  
出願番号: 2016-195251

3.

発明者: 坂本 高秀  
発明の名称: コヒーレントサンプリング  
出願人: 情報通信研究機構  
出願日: 2016/05/31

出願番号：特願 2016-109633

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表

1. **T. Sakamoto**, and A. Chiba, “Frequency Spacing and Offset Tunable Multiple-Frequency-Spaced Optical Comb Generation Using Multiple-Parallel Phase Modulator,” *the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Pacific Rim)*, Hong Kong, F2F3, Aug. 2018.
2. **T. Sakamoto**, T. Umezawa, G.W. Lu, K. Akahane, A. Matsumoto, A. Kanno, N. Yamamoto, T. Kawanishi, “Spatial Coherent Matched Detection Using High-Speed Two-Dimensional Photo-Diode Array for Full-Channel Demultiplexing and Demodulation of Mode-Division-Multiplexed Signals,” *43th European Conference on Optical Communication (ECOC 2017)*, Tu.1.F.5, Sweden, Sep. 2017.
3. **T. Sakamoto**, G.W. Lu, and N. Yamamoto, “Ultrafast Demultiplexing of Optical Time-Division Multiplexed Signals by Parallel Opto-Electronic Time-frequency Domain Sampling,” *the 2017 Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)*, M2J.5, Los Angeles, USA, Mar. 2017.
4. **T. Sakamoto**, I. Morohashi, and N. Yamamoto, “Non-uniform Operation of Cascaded Mach-zehnder Modulator Based Flat Comb Generators for Higher Spectral Bandwidth and Resolution,” *OSA Fourier Transform Spectroscopy (FTS2016)*, FTh3B.3, Leipzig, Germany, Nov. 2016.
5. **T. Sakamoto**, G.W. Lu, and N. Yamamoto, “Full-Channel Parallel Measurement of 4x20-Gb/s All-Optical OFDM Signals by Using Loop-Assisted Coherent Matched Detector,” *42th European Conference on Optical Communication (ECOC 2016)*, Dusseldorf, Germany, Tu.1.E.2, Sep. 2016.
6. **T. Sakamoto**, “Opto-Electronic Time-Frequency Domain Sampling for Ultra High-Bandwidth Multi-Carrier Signal Detection (invited),” *the 2016 Optical Fiber Communication Conference (OFC2016)*, Th3H.4, Anaheim, USA, Mar. 2016.