

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月21日現在

機関番号：82636  
 研究種目：若手研究(A)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22686039  
 研究課題名（和文） 光多重信号解析のための超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ  
 研究課題名（英文） Ultrafast coherent optical oscilloscope for multidimensional analysis  
 研究代表者  
 坂本 高秀 (SAKAMOTO TAKAHIDE)  
 (独) 情報通信研究機構・光ネットワーク研究所 光通信基盤研究室・主任研究員  
 研究者番号：70392727

### 研究成果の概要（和文）：

本研究課題「光多重信号解析のための超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ」では、「超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ」を新たに提案、開発し、光通信ネットワーク上での複雑な光多重信号の実時間解析及び評価の手法を探った。このオシロスコープにより、複雑な全光信号処理技術等に依存せずに、電氣的帯域限界及び光学的精度限界を超えたコヒーレント光波形計測が可能であることを示した。

### 研究成果の概要（英文）：

In this research, new technologies related ultrafast multidimensional coherent oscilloscope have been proposed and demonstrated. It has been proved that we can measure and characterize ultrafast optical signals at high resolution without relying on all-optical signal processing.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2011年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2012年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
年度			
年度			
総計	19,600,000	5,880,000	25,480,000

### 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測機器、光通信

#### 1. 研究開始当初の背景

光通信ネットワークの大規模・複雑化の傾向は避けられない。光信号の多重化が急速に進められ、その多重度は極限にまで高められつつある。例えば、時間領域では、数10～100の光信号チャネルが多重化され、光伝送速度は100Gb/sから数Tb/sに迫っている。波長領域では、1000チャネルを超える波長多重(WDM)により、30Tb/s以上の光伝送も実証されている。更に、光

位相シフトキーイング(光PSK)、光直交振幅変調(光QAM)等のコヒーレント光伝送方式や、光直交周波数分割多重(光OFDM)、光符号分割多重(光OCDM)などの複雑な光多重方式も、研究レベルでは市民権を得つつある。また、ネットワーク全体でも、光信号が空間的に複雑に多重化されており、その規模の大きさは計り知れない。

このような状況下にもかかわらず、既存

の光計測技においては、上述のような光多重度の高い高速信号、波長多重信号、コヒーレント信号等を解析・評価する実践的手法は確立されていない。確かに、実験室内においては、光物理現象の探求や、光デバイス開発のための光計測・評価技術を目的としたハイエンドな超高速・超広帯域光信号の光計測は実現されているが、これらは、第二次高調波発生（SHG）や四光波混合（FWM）現象等に基づいた複雑な全光信号処理技術に依存し、光通信ネットワークへの実践的適用は困難である。あるいは、機能的にも、単一チャネル信号の解析が精一杯であり、光通信ネットワーク上で高度に多次元的に多重化された光多重信号の解析には、ほぼ無力である。高多重度の光信号をコヒーレントに分析できる、実践的なオシロスコープの開発・実現が切望される。

## 2. 研究の目的

（概要）※ 当該研究計画の目的について、簡潔にまとめて記述してください。

「超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ」を新たに提案、開発し、光通信ネットワーク上での複雑な光多重信号の実時間解析及び評価の手法を探る。複雑な全光信号処理技術等に依存せず、電気的帯域限界及び光学的精度限界を超えたコヒーレント光波形計測を実証する。提案方式の心臓部では、独自技術の「超平坦・伸縮光コム」との「光多周波ミキシング」によって、被測定光信号をコヒーレントに周波数分解し、電気領域に復元・解析する。また、本方式の特徴である、時間的、空間的、周波数的拡張性を活かし、多次元コヒーレント光計測の手法を探る。多次元光多重信号解析への道を開き、複雑化・大規模化する光通信ネットワークへの適用を目指す

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の機能を実証することにより、「超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ」を提案、実証する。すなわち、(1) 電気的応答速度・帯域を越えた「超高速光時間波形測定」、(2) 光学的精度の限界を超えた「超高精度光スペクトル測定」、(3) 光位相・周波数を分析する「コヒーレント光位相測定」、(4) 多次元に多重化された光信号を解析する「多次元多重光測定」、の4点を探求する。

### (1) 超高速光時間波形測定

電気的応答速度・帯域限界を超えた超高速光計測機能を、簡易かつ実践的手法にて実証する。本目的のためには、従来は、SHGやFWM等、モード同期レーザを用いた、全光サンプリング技術が用いられてきた。本申請研究ではこれらの全光技術を廃し、低速光検出、電子信号処理技術のみを用いて、超高速光計測機能を実証する。

リング技術が用いられてきた。本申請研究ではこれらの全光技術を廃し、低速光検出、電子信号処理技術のみを用いて、超高速光計測機能を実証する。

### (2) 超高精度光スペクトル測定

本技術を用い、非常に高分解能な光周波数分析を実証する。従来は、光スペクトラムアナライザによる分光技術が標準的に用いられてきた。しかしながら、光波長分解能は、光の回折限界に支配され、高分解能化には限界があった（現状の分解能は、0.01nm程度）それに対し、本申請研究では、被測定信号光を電気領域でスペクトル分解することにより、非常に高解像度な光スペクトル解析を実証できる。この技術を用い、光OFDMやOCDM信号など光学的精度限界を超えた光信号解析を試みる。

### (3) コヒーレント光位相測定

光の位相信号の分析手法を提供する。従来の光波形測定機能は、光強度波形の測定に限定されており、被測定信号光の光位相を測定できない。本研究では、上記の超高速光信号解析機能に加え、光位相解析機能を併せて実証する。光PSKやQAM信号の実践的評価手法に繋げる。

### (4) 多次元多重光測定

時間軸上や波長軸上に高度に多重化された光信号の解析を実証する。光ネットワーク上で高次元に光信号が多重化されており、これを一括計測する手法を探索する。

## 4. 研究成果

本研究では、「超高速多次元コヒーレント光オシロスコープ」を新たに提案、開発し、光通信ネットワーク上での複雑な光多重信号の実時間解析及び評価の手法を探った。このオシロスコープにより、複雑な全光信号処理技術等に依存せず、電気的帯域限界及び光学的精度限界を超えたコヒーレント光波形計測が可能であることを示した。

まず、提案方式の心臓部となる、「超平坦・伸縮光コム」と「光多周波ミキシング」の基礎実証と開発を行った上で、本オシロスコープの特徴である、①電気的応答速度・帯域を越えた、超高速・広帯域光波形測定、②光学的精度の限界を超えた超高精度光スペクトル測定、③光位相・周波数を分析するコヒーレント光位相測定、④多次元に多重化された光信号を解析する多次元多重光測定の4機能の実証を行ってきた。

以下、詳細について述べる。

「光多周波ミキシング」に基づいた「超高速コヒーレント光オシロスコープ」の基本概

念は以下の通りである。被測定信号に対し素性の知れた光コムを重畳させ、光検出器内でミキシングを行う（ここでは、この手法を光多周波ミキシングと呼ぶ）。被測定信号の各周波数成分は、光コムを構成する各光周波数成分により周波数分解され、低周波電気信号に変換される。得られる変換信号は、元の光信号と光信号との畳み込みの関係にあり、振幅情報・位相情報を含んだ相似信号を、元の光信号を電気信号領域に復元することができる。

この光多周波ミキシングのためには、複数の振幅一定の光周波数成分からなり、各周波数成分の間隔は等しく、そのコヒーレンスも十分に高い光コム信号を発生する必要がある。マハツェンダ光変調器を用いた構成にて光コムを発生した。モード同期レーザ等の光発振技術に依存せず、連続光（CW光）レーザから、このような光コムの生成されるため、光周波数間隔及び信号帯域を自由かつ俊敏に制御できることが示された。

#### （１）超高速コヒーレント光オシロスコープの基本原理解説

新提案技術である、超高速コヒーレント光オシロスコープの基礎実証を行った。光コム発生回路及び、光検出系を組み合わせ、超高速コヒーレント光オシロスコープを構築した。また、検出、解析部分には光位相回復アルゴリズムを実装した。これにより、光信号のコヒーレント解析を可能とした。超高速光信号の復元波形の実軸、虚軸成分の２次元取得が可能となった。光受信、解析回路の非線形領域での復元信号に対する影響を解析した。この非線形動作の解析により、本光計測方式の測定誤差を規定することができると思われる。

一方、被測定信号を合成するために、光領域での合成回路を作成し、ここから得られる信号の光波形測定を行った。この光合成回路は、当初発展課題として計画してきた光符号を光段で信号合成するものであり、直列、並列型回路の開発を行った。これにより、光通信システム上で用いられる被測定光信号等のエミュレートが可能となる。

#### （２）超高速光波形測定

超高速コヒーレント光オシロスコープを用い、超高速光信号の簡易計測機能を実証した。サンプリングレート 80GSa/s の超高速光信号を用意し、光信号波形を計測できることを示した。超高速光信号に光パルス信号等を用い、超高速コヒーレント光オシロスコープの応答性等の基本性能を明らかにした。本オシロスコープを用い、相互相関測定による評価手法の動作を確認した。この技術は、光信号波形の評価を実現するだけでなく、超高速

信号に対する隣接信号間の影響を評価することを可能とする。

#### （３）超高精度光スペクトル測定

本技術は、光スペクトルを非常に高い解像度にて光周波数を分解、評価することを可能とする。光周波数軸上に、10GHz 間隔に多重された光信号を分離、解析を行えることを示した。光フィルタを用いて同様の光信号を分解した場合、光フィルタのパスバンドの形状により、周波数領域の分解能の低下、もしくは、時間波形の劣化が避けられない。

#### （４）コヒーレント光位相測定

電氣的応答限界を超えた 160Gb/s の超高速光波形実証を行い、超高速・広帯域光波形測定機能を示すと共に、この速度での光 QPSK 信号測定を行い、コヒーレント光位相測定機能を示した。

#### （５）多次元多重光測定

また、光フィルタでは分離できない高い周波数分解能の機能を活かし、約 20 波の光 OFDM 信号測定を実証し、超高精度光周波数分解機能を示した。また、2 信号の同時計測を行い、多次元多重光測定の原理確認、可能性を示した。

得られた成果は、複数の著名国際会議で発表を行い、著名論文誌にも投稿中である。

本研究により、時間的、空間的、周波数的拡張性を活かした多次元コヒーレント光計測の手法が探求された。複雑化・大規模化する光通信ネットワークへ対応する多次元光多重信号解析への道が開かれたと言える。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

① T. Sakamoto, G. W. Lu, and T. Kawanishi, "Multi-tone coherent matched detection for demultiplexing of superchannels," OSA Optics. Express (accepted). (査読有)

② I. Morohashi, Y. Irimajiri, T. Sakamoto, T. Kawanishi, M. Yasui, I. Hosako, "Generation of Millimeter Waves with Fine Frequency Tunability Using Mach-Zehnder-Modulator-Based Flat Comb Generator," IEICE TRANSACTIONS on Electronics, vol. E96-C, No. 2, pp. 192-196, 2013. (査読有)

③ G. W. Lu, T. Sakamoto, and T. Kawanishi,

“Flexible high-order QAM transmitter using tandem IQ modulators for generating 16//32/64-QAM with balanced complexity in electronics and optics”, OSA Optics Express, vol. 21, no. 5, pp. 6213-6223, 2013. (査読有)

④ I. Morohashi, T. Sakamoto, M. Sudo, A. Kanno, A. Chiba, J. Ichikawa, and T. Kawanishi, “Synthesis of 16 Quadrature Amplitude Modulation Using Polarization-Multiplexing QPSK Modulator,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol. E94-B, no. 7, pp.1809-1814, 2011. (査読有)

⑤ T. Sakamoto, and A. Chiba, “Coherent Synthesis of Optical Multilevel Signals by Electrooptic Digital-to-Analog Conversion Using Multiparallel Modulator (invited paper),” IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. vol. 16, no. 5, pp. 1140-1149, Sep/Oct, 2010. (査読有)

[学会発表] (計20件)

① T. Sakamoto, “Time-Frequency Domain Signaling/Multiplexing for Optical Filter-less Networking (invited),” OSA Topical Meeting, Rio Mar Beech Resort, Puerto Rico, USA. (accepted)

② T. Sakamoto, R. P. Scott, and S. J. B. Yoo, “Optimization of Discrimination Filters for Orthogonal Time-Frequency Domain Multiplexing,” The 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2013), MR1-7., Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2013. (2013/07/04)

③ T. Sakamoto, G. W. Lu, T. Kawanishi, “Traceback Equalization against Modulation Non-uniformity in QAM Transmitters,” The 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2013), MR1-5, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2013. (2013/07/04)

④ T. Sakamoto, R. P. Scott, And S. J. B. Yoo, “Improved Phase Matching by Paired-Fiber Coherent Matched Detection for Time-Frequency Domain Demultiplexing,” Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2013), San Jose Convention Center, San Jose, USA, CF1F4, 2013 (2013/06/09)

⑤ T. Sakamoto, G.-W. Lu, T. Kawanishi, “Traceback Equalization for

Non-Uniformly Synthesized Optical QAM Signals,” The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CI-1.4., ICM Centre of the New Munich Trade Fair Centre, Munich, Germany, 2013. (2013/05/12)

⑥ T. Sakamoto, G.-W. Lu, T. Kawanishi, “Filter-less “Multi-Tone Coherent Orthogonal Detection for Multi-Channel Reception of Super-Channel/OFDM Signals,” the 2013 Optical Fiber Communication Conference (OFC2013), JTh2A.47., Anaheim Convention Center, Anaheim, USA, 2013. (2013/03/09)

⑦ G.-W. Lu, T. Sakamoto, T. Kawanishi, “Optical 64QAM Transmitter Using Tandem IQ Tandem Modulators with Balanced Complexity in Electronics and Optics,” the 2013 Optical Fiber Communication Conference (OFC2013), JTh2A.47., Anaheim Convention Center, Anaheim, USA, 2013. (2013/03/09)

⑧ T. Sakamoto, “Optical Multicarrier Source for Orthogonal Time/Frequency Division Multiplexing,” The 16th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), P-1-19, BEXCO, Busan, Korea, Jul, 2012. (2012/07/02)

⑨ G. W. Lu, T. Sakamoto, A. Chiba, T. Kawanishi, “Experiment Investigation of Nonlinear Distortion in QAM Constellation due to Imbalance in Intradyne Coherent Receiver,” The 16th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), P-1-17, BEXCO, Busan, Korea, Jul, 2012 (2012/07/02)

⑩ T. Sakamoto, “Coherent Matched Detection with Multi-Input-Multi-Output Equalization for Demultiplexing/Demodulation of Orthogonally Time/Frequency Domain Multiplexed Signal,” Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2012), San Jose Convention Center, San Jose, USA, CF1F4, 2012. (2012/05/06)

⑪ I. Morohashi, T. Sakamoto, N. Yamamoto, Y. Ogawa, T. Kawanishi, and I. Hosako, “Investigation of Linewidth of Comb Modes in MZM-Based Flat Comb Generator with

Optical Feedback Loop”, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2012), San Jose Convention Center, San Jose, USA, CTh2A. 53, 2012. (2012/05/06)

⑫ I. Morohashi, M. Oikawa, Y. Tamura, S. Aoki, T. Sakamoto, T. Kawanishi, and I. Hosako, “High Peak Power Pulse Generation Using Mach-Zehnder-Modulator-Based Flat Comb Generator Combined with Chirped Pulse Amplifier”, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2012), San Jose Convention Center, San Jose, USA, CF1N. 7, 2012. (2012/05/06)

⑬ N.K. Fontaine, T. Sakamoto, D.J. Geisler, R.P. Scott, B. Guan and S. J. B. Yoo, “Coherent reception of 80 GBd QPSK using integrated spectral slice optical arbitrary waveform measurement”, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2012), San Jose Convention Center, San Jose, USA, 2012. (2012/05/06)

⑭ T. Sakamoto, “Optical Comb and Pulse Generation from CW Lightwave (invited).” Microwave Photonics (MWP 2011), Furama RiverFront, Singapore, Oct, 2011. (2011/10/18)

⑮ T. Sakamoto, “160-Gb/s Orthogonal Time-Frequency Domain Multiplexed QPSK for Ultra-High-Spectral-Efficient Transmission,” 37th European Conference on Optical Communication (ECOC2011), Geneva Palexpo, Geneva, Switzerland, Sep, 2011. (2011/09/19)

⑯ T. Sakamoto, “Nonlinear Distortion of 16QAM Constellations in Intradynic Coherent Receiver,” Conference on Laser and Electro Optics-European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2011), ICM Center of the New Munich Trade Fair Centre, Munich, Germany, May, 2011. (2011/05/22)

⑰ T. Sakamoto, “Optical Comb and Pulse Generation from CW light (tutorial)”, Conference on Laser and Electro Optics (CLEO2011), , Baltimore Convention Center, Baltimore, USA, May, 2011. (2011/05/08)

⑱ T. Sakamoto, A. Chiba, T. Kawanishi, “Phase Division Analysis for Intradynic Coherent Detection in Nonlinear Regime,”

the 2011 Optical Fiber Communication Conference (OFC2011), JThA6, San Diego Convention Center, San Diego, USA, Feb., 2011. (2011/02/13)

⑲ T. Sakamoto, A. Chiba, A. Kanno, I. Morohashi, and T. Kawanishi, “Real-Time Homodyne Reception of 40-Gb/s BPSK Signal by Digital Optical Phase-Locked Loop,” 36th European Conference on Optical Communication (ECOC2010), P3.12, Lingotto Congress Centre, Turin, Italy, Sep., 2010. (2010/09/19)

⑳ T. Sakamoto, A. Chiba, A. Kanno, and T. Kawanishi, “Digital Optical Costas Loop for Coherent Demodulation of 10-Gb/s BPSK,” The 15th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2010), 9B3-10, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, Jul., 2010. (2010/07/05)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂本 高秀 (Sakamoto Takahide)

(独) 情報通信研究機構・光ネットワーク研究所  
光通信基盤研究室・主任研究員

研究者番号 : 70392727

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :