

可変容量光直交周波数分割多重信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing technology of variable capacity optical OFDM signal



瀧口 浩一 (Koichi TAKIGUCHI, Ph. D.)

立命館大学 理工学部 電気電子工学科 教授

(Professor, Ritsumeikan University, College of Science and Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering)

IEEE OSA SPIE 電子情報通信学会 応用物理学会

受賞: IEE Electronics Letters, Premium Award (1997) 電子情報通信学

会 エレクトロニクスソサイエティ, 活動功労表彰 (2011) 電子情報通信

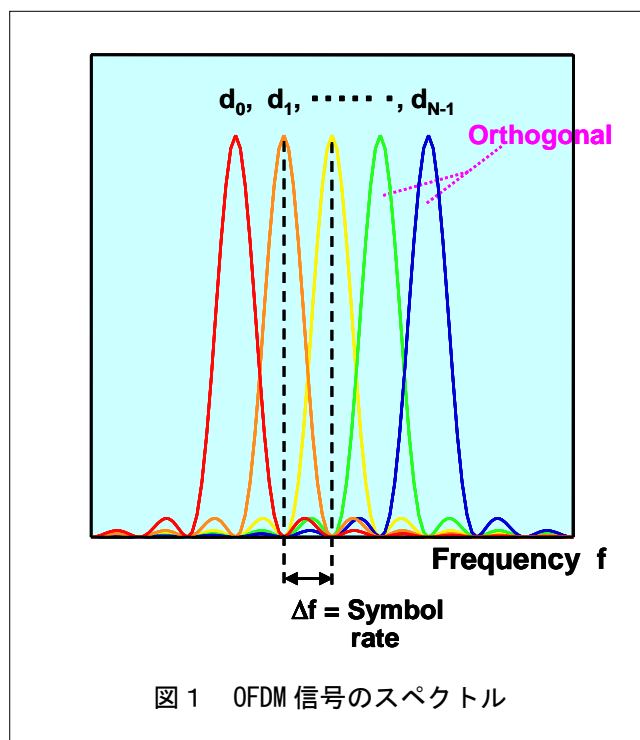
学会 エレクトロニクスソサイエティ, 活動功労表彰 (2014)

研究専門分野: 光エレクトロニクス 光通信 光波センシング

あらまし 光直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) は、複数のサブキャリアチャンネル信号を信号のシンボルレート間隔で、互いに直交させて周波数多重する光通信方式である。各チャンネル信号には多値変調を行うことができ、偏波多重、空間多重など他の多重化技術も併用できるため、非常に高い周波数利用効率を実現することができる。また、各チャンネルの信号シンボルレートは比較的低速であるため、ファイバ中の波長分散、偏波分散への耐性が高い。光 OFDM は、固定容量光通信への適用の他に、通信トラヒック、伝送距離の変動に応じて必要最小限の帯域を適応的に割り当てる次世代光ネットワークのガードバンド削減にも有効である。本研究では、可変容量光 OFDM 信号の光領域での高速、低消費電力な直接分離に必要な適応的な光フーリエ変換処理を、位相変調器と可変波長分散エミュレータ構成によって実現し、原理的な動作検証に成功したので、その概要について報告する。

1. 研究の目的

図 1 に示すように、光 OFDM は、互いに直交した複数のサブキャリアチャンネル信号を信号のシンボルレート間隔で高密度周波数多重化する多重化方式である。各チャンネルには多値変調信号を用いることができ、偏波多重、空間多重など他の多重化技術も共用できるため、非常に高い周波数利用効率を実現することができる。また、各チャンネルの信号シンボルレートは比較的低速であるため、ファイバ中の波長分散、偏波分散への耐性が高い利点もある。



OFDM 信号の分離、生成には、それぞれ、離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform : DFT) / 高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform : FFT)、逆離散フーリエ変換 (Inverse DFT : IDFT) / 逆高速フーリエ変換 (Inverse FFT : IFFT) が必要である。地上デジタルテレビ放送や無線 LAN 用の OFDM 信号と異なり、次世代光通信におけるサブキャリアチャンネルあたりのシンボルレートは数 10 Gbaud と格段に高く、トータルの伝送速度は 100 Gbit/s を超えるため、電子回路によるサブキャリア信号の実時間分離は、動作速度の限界、消費電力の増大のため難しくなっている。

可変容量光直交周波数分割多重信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing technology of variable capacity optical OFDM signal

DFT/FFT 処理を光領域で行い、光 OFDM 信号を光領域で直接分離できれば、電子回路で律速される限界を超える高速実時間処理を低消費電力で実行可能となるため、その実現が期待されている。従来、チャンネル数、およびチャンネルあたりのシンボルレートが固定された光 OFDM 信号を、光領域で分離する手法は検討されてきたが、これらを柔軟に変化させた可変容量光 OFDM 信号の光領域分離に関しては検討が行われていなかった。本研究では、位相変調器と可変波長分散エミュレータとから構成される適応型光フーリエ変換処理回路を新規に提案、構成し、これを用いることによって可変容量光 OFDM 信号の光領域分離を実現することを目標とした。次世代の適応型光ネットワークでは、チャンネル間ガードバンド^{*1}を削減し、通信トラヒック、伝送距離の変動に応じてチャンネル数、チャンネル毎のシンボルレート、変調フォーマットを柔軟に変化させて必要最小限の帯域を使用し、効率的な周波数割当を行うことによってネットワーク資源の節約を図ることを目指している[1]。しかしながら、ネットワークアーキテクチャに関する検討は進展しているが、ハードウェアの要となる光デバイスについての検討はほとんど行われていない。本研究は、このような適応型光ネットワークの進展にハード面（光デバイス）から寄与可能であると考えられる。

2. 研究の背景

2002 年に NTT から、2 サブキャリアチャンネル信号を用いた世界初の光 OFDM に関する報告がなされ、信号の分離には非対称マッハツェンダ干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer : MZI) 型光 FFT 回路が用いられた[2]。その後、2007 年から光 OFDM に関する研究開発が本格的に開始され、当初は、モナッシュユ大、メルボルン大、KDDI、ベル研、NTT、NEC アメリカなどを中心として、電気領域でのオフライン処理による信号分離が検討された。その後、光領域での分離手法の検討も再開され、韓国 IC 大、NTT、カールスルーエ工大、モナッシュユ大、ベル研、NEC アメリカ、清華大、NICT、ローマ大、ベルリン工大、デンマーク工大、富士通・HHI などから、光導波回路、バルク光学系、ファイバブラッググレーティング (Fiber

Bragg Grating : FBG)、ファイバ中の非線形光学効果などを活用した手法が報告されている[3]。筆者も、対称 MZI 編込型、スターカプラ型、多モード干渉計型などの光導波回路構成の光 DFT/FFT 回路を提案、実現することによって、光領域での分離手法の進展に貢献してきた[4]-[6]。これまでに、光回路として最高水準の、10 サブキャリア、総処理能力 100 Gbaud クラスの光 OFDM 信号分離回路を実現している。

しかしながら、適応型光ネットワークに必要なチャンネル数・シンボルレート可変の光 OFDM 信号の光領域での分離手法は、報告されていなかった。

3. 研究の方法

図 2 に、時間レンズ^{*2}法[7][8]に基づいた可変サブキャリアシンボルレート光 OFDM 信号用の光フーリエ変換回路を示す。LN 位相変調器（帯域 32.0 GHz、半波長電圧 4.1 V、損失 2.3 dB）、FBG 型可変波長分散エミュレータ（波長分散生成範囲 ± 400 ps/nm、帯域 80 GHz、損失 3.4 dB）から構成されている。信号の各時間スロットに 2 次関数形状の位相変調、すなわち線形周波数チャープ（角周波数チャーププレート K ）を付与し、その後、波長分散エミュレータによって群遅延分散 D を付与する。 $D=1/K$ の関係が成立するようにパラメータ設定を行えば、時間領域での光フーリエ変換を行うことができる。周波数 Δf 間隔の OFDM サブキャリア信号が、光フーリエ変換によって $\Delta t=2\pi\Delta f/K$ 間隔のナイキスト時分割多重パルスに変換される。これは、サブキャリア信号が時間的に分離されることに相当する。両素子とも動作パラメータの可変調整は容易であるため、任意容量の光 OFDM 信号の分離が可能である。

時間レンズ法は光通信用途として、ファイバの波長分散スロープによって劣化した短光パルス信号（パルスの立ち下がり部にリップルを発生）の等化に適用されている（光フーリエ変換による、時間波形とスペクトルの入れ替え）[8]。また、固定容量の光 OFDM 信号の分離へ適用した例も報告されている[9][10]。光通信で用いられる数 10 Gbaud の信号に対応した、位相変調器駆動用の繰り返し数 10 GHz の 2 次関数形状電圧を生成することは難しい。任意波形発生器の使用は

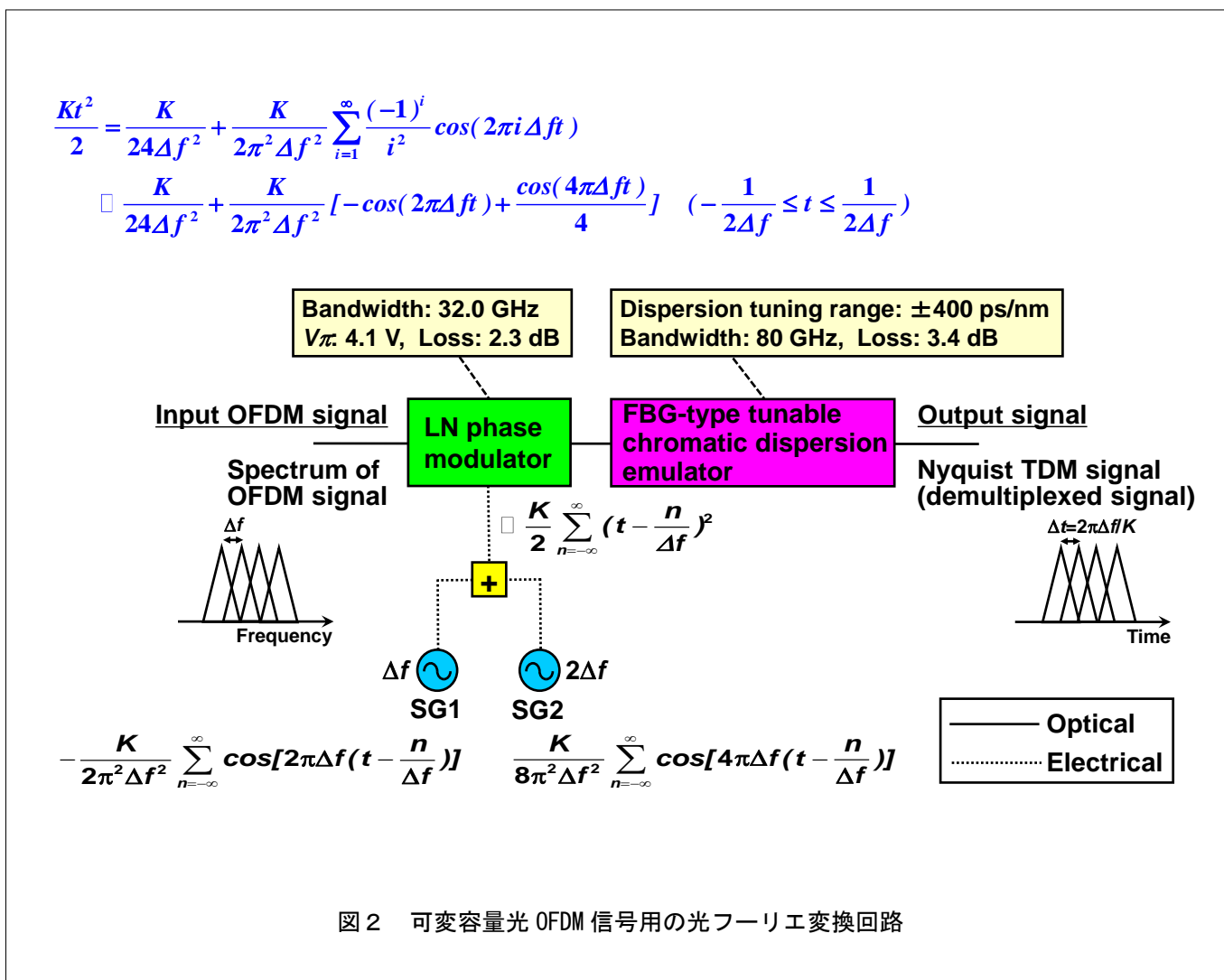
可変容量光直交周波数分割多重信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing technology of variable capacity optical OFDM signal

大幅なコスト増を招く。通常の信号発生器で容易に生成可能な余弦波は、限られた時間範囲内で2次関数波形を精度良く近似できる。文献[8]では、短光パルスが対象であるため、余弦波の限定時間領域を活用することによって分散スロープの等化を行っている。また文献[9]でも、文献[8]と同様に余弦波の限定時間領域を用いている。本来 OFDM のサブキャリア信号には、NRZ (Non-return-to-zero) パルスが用いられるが、文献[9]では、タイムスロットの半分の時間をガードインターバルに充てることによって余弦波の限定時間領域を活用している。そのため、サブキャリア信号は RZ (Return-to-zero) 形状となり、周波数利用効率が半減するため、高周波数利用効率であるという OFDM

の特徴を放棄してしまっている。

本研究では、2次関数形状の位相変調器駆動電気信号の近似波形を、2台の信号発生器を用いて簡便に生成し、可変波長分散エミュレータを用いることによって可変サブキャリアシンボルレートの光 OFDM 信号の分離を行う手法を新たに提案した[11]。2次関数のフーリエ級数展開から、周波数 Δf の余弦波と、振幅がその1/4で、位相が π ずれた周波数 $2\Delta f$ の余弦波を合波すれば、周期 $1/\Delta f$ の2次関数の近似波形を生成できる。この近似電気信号は、同期した2台の信号発生器から容易に生成できるため、これを用いて位相変調器を駆動する。K, Dの可変可能範囲内で、任意シンボルレートのサブキャリア信号を分離することができる。



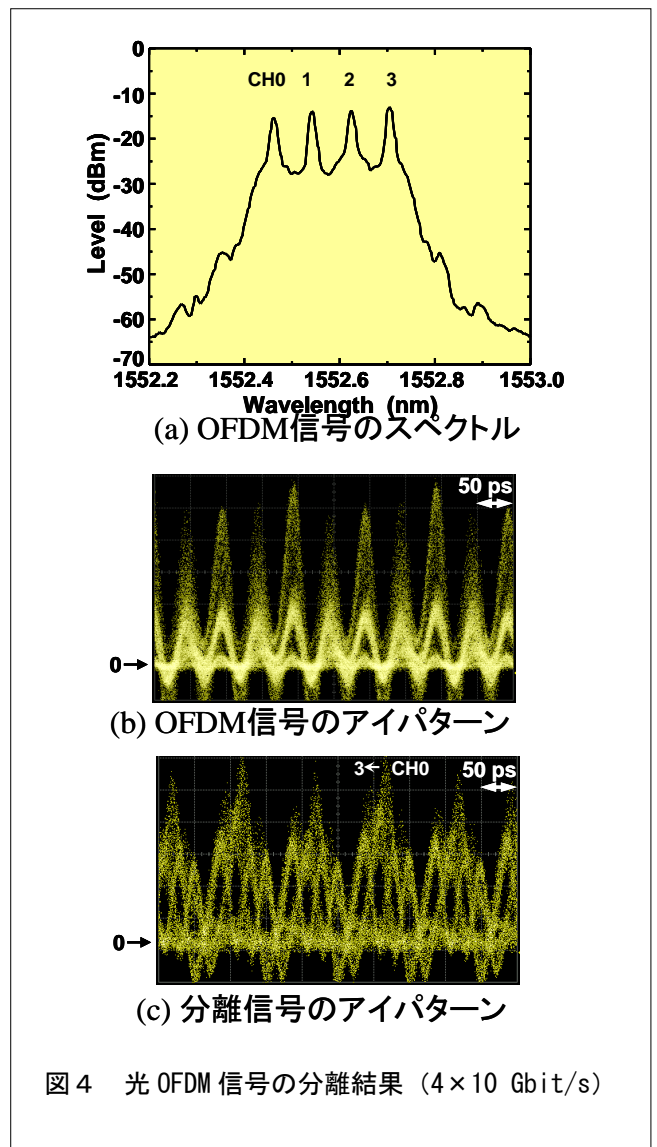
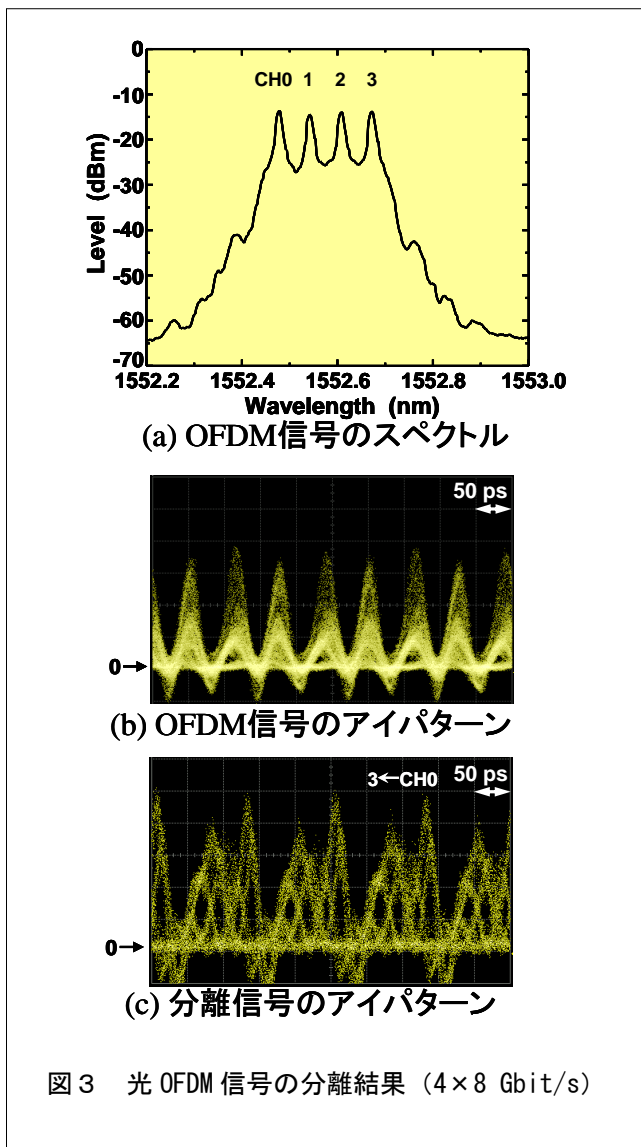
可変容量光直交周波数分割多重信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing technology of variable capacity optical OFDM signal

現所有機器で実現できる範囲にて、上記の可変サブキャリアシンボルレート OFDM 信号用分離回路の検証実験を行った[11]。図 3, 4 それぞれに、サブキャリア信号をOOK(On-off keyin)信号とした、4 x 8 Gbit/s、4 x 10 Gbit/s の光 OFDM 信号の分離結果を示す。図 3, 4 において、(a), (b), (c)はそれぞれ、OFDM 信号のスペクトル、OFDM 信号のアイパターン、分離サブキャリア信号を示す。図 3 では、角周波数チャープレート $K=2.16 \times 10^{-3} \text{ ps}^{-2}$ 、波長分散 $\sigma=-360 \text{ ps/nm}$ 、図 4 では、 $K=2.74 \times 10^{-3} \text{ ps}^{-2}$ 、 $\sigma=-280 \text{ ps/nm}$ にパラメータを設定して分離を行った。波長分散 σ と群遅延分散 D との間には、

$$\sigma = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} D \quad (c: \text{真空中の光速}, \lambda: \text{波長})$$

の関係がある。なお、図 3 における全分離チャンネルの Q 値、符号誤り率は、それぞれ、5.0 以上、 3.2×10^{-7} 以下、図 4 における全分離チャンネルの Q 値、符号誤り率は、それぞれ、4.5 以上、 2.8×10^{-6} 以下であった。なお Q 値は、分離された 2 値信号の平均値、分散値から評価し、符号誤り率は Q 値から算出した。これらの結果より、図 1 の可変容量 OFDM 信号分離回路によって、可変シンボルレートサブキャリアが時間領域で分離できていることがわかる。



可変容量光直交周波数分割多重信号の分離技術に関する研究

Research on demultiplexing technology of variable capacity optical OFDM signal

4. 将来の展望

現所有機器の制限から、4 x 8 Gbit/s、4 x 10 Gbit/s の比較的低速の光 OFDM 信号を用いて、本研究で提案した可変光 OFDM 信号分離回路の原理検証を行った。今後は、光領域処理の有用性（高速性、低消費電力）を明確に示すため、サブキャリア数、および各サブキャリアのシンボルレートを増加させ、数 100 Gbit/s クラスの可変光 OFDM 信号の分離も可能であることを示すことが重要である。また、今回は個別素子を用いて検討を行ったが、将来的には、光回路の安定化、小型化、低消費電力化のため、導波回路を用いた一体集積化を実現することも大事である。

筆者らは、集積光フィルタ構成の可変光 OFDM 信号分離回路の検討も並行して進めている[12][13]。本研究の光回路、集積フィルタ型光回路の両方とも、基礎検討の段階にあるが、今後、計算、および実験検討による両方の特性把握を進め、特性の優劣、および最適使用形態を明らかにしていく予定である。

本研究も含め現状では、光 OFDM 用回路の検討は大部分ポイント・ツー・ポイント光伝送に限定されているが、今後、容量可変のアド/ドロップマルチプレキシング、クロスコネクトなどの適応型の光ネットワーク用途に本格的に展開させていく必要があると考えられる。

用語解説

*1 ガードバンド

通信システムにおいて、隣接する周波数帯域を利用する別のシステムとの干渉を防ぐために設けられる未使用の周波数帯域

*2 時間レンズ

光の空間パターンがフレネル回折により広がることと、光パルスの波形が群速度分散により広がることは、数学的に同等の方程式に従う。このアナロジーにより空間のレンズに対応したもの

参考文献

[1] O. Gerstel et al., "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, pp. S12-S20, 2012.

[2] H. Sanjoh et al., "Optical orthogonal frequency division multiplexing using frequency/time domain filtering for high spectral efficiency up to 1 bit/s/Hz," in *Proc. OFC2002*, paper ThD1, 401-402, Anaheim.

[3] A. J. Lowery et al., "Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: a review of the first five years," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, pp. 421-438, 2011.

[4] K. Takiguchi et al., "Demultiplexer for optical orthogonal frequency-division multiplexing using an optical fast-Fourier-transform circuit," *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 1828-1830, 2009.

[5] K. Takiguchi et al., "Optical orthogonal frequency division multiplexing demultiplexer using slab star coupler-based optical discrete Fourier transform circuit," *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 1140-1142, 2011.

[6] K. Takiguchi et al., "Integrated-optic OFDM demultiplexer using multi-mode interference coupler-based optical DFT circuit," in *Proc. OFC2012*, paper OM3J.6, Los Angeles.

[7] V. Howe et al., "Ultrafast optical signal processing based upon space-time dualities," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 2649-2662, 2006.

[8] T. Hirooka et al., "Optical adaptive equalization of high-speed signals using time-domain optical Fourier transformation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 2530-2540, 2006.

[9] Y. Li et al., "Experimental implementation of an all-optical OFDM system based on time lens," *Opt. Commun.*, vol. 284, pp. 3983-3989, 2011.

[10] P. Guan et al., "Real-time all-optical OFDM transmission system based on time-domain optical Fourier transformation," in *Proc. OFC2014*, paper W4F.1, San Francisco.

[11] K. Takiguchi et al., "Tunable optical OFDM signal demultiplexer using time-domain optical Fourier transformation," in *Proc. Advanced Photonics 2016*, paper SpM3E.3, Vancouver.

[12] K. Takiguchi et al., "Integrated-optic filter for variable symbol rate optical OFDM signals," in *Proc. IPC2015*, paper TuF3.3, Reston.

[13] K. Takiguchi, "Integrated-optic Demultiplexer for variable capacity optical OFDM signals composed of slab star coupler-type optical DFT circuit and variable optical attenuators," to be presented at *ECOC2016*, Dusseldorf.

この研究は、平成24年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成25～26年度に実施されたものです。