

周波数利用効率 1 baud/Hz を超える光 OFDM 信号用チャネル分離集積光回路

代表研究者

瀧口 浩一

立命館大学 理工学部 電気電子工学科 教授

1 研究の目的

光通信の容量増大のためには、複数チャネル間の周波数間隔を狭窄化して周波数利用効率を高め、チャネル数を増大させる必要がある。2007年から研究が本格化した光直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 通信は、複数の直交サブキャリアチャネル信号を、変調速度に相当するチャネルボーレート [ボーレート=ビットレート/ $\log_2(\text{信号多値数})$] 間隔で高密度に周波数分割多重するため、高周波数利用効率通信 (効率 1 baud/Hz) を実現できる (実用化済の光波長分割多重通信では 0.1~0.3 baud/Hz) [1]-[5]。図1に光通信用各種多重化のチャネル配置 (チャネル数4の場合) を示す。次世代光OFDM通信の各チャネル速度は数10 Gbaud以上で、総速度は100 Gbaudを超えるため、OFDM信号のチャネル分離に必要なフーリエ変換を光領域で実時間に行う必要がある (全光分離[6]-[10])。

本研究では、光OFDM通信の一層の高周波数利用効率化を進めるために、これまでにはない周波数利用効率 1 baud/Hz を超える超高速光OFDM信号用の、全光チャネル分離集積光回路を実現することを目標とした。また、その適用によって、効率 1 baud/Hz を超え、100 Gbaud 超の超高速光OFDM通信を実現することを目指した。本研究では、高周波数利用効率化の第1段階として、信号点配置図 (複素平面) 上の実数変調信号 [振幅変調 (2値 On-off Keying: OOK、多値 Pulse Amplitude Modulation: PAM)、2位相偏移変調 (Binary Phase Shift Keying: BPSK) 信号など] を用いる効率 1 baud/Hz 超の光OFDM信号を対象とした。多値信号化によるビットレート効率向上ではなく、偏波多重、空間・モード分割多重を用いずOFDMのみによってボーレート効率を向上させることを目的とした。

本研究は、光通信速度の増大に貢献する他、超高速光OFDM通信での一層の効率追求の契機となり、新規光OFDMチャネル分離光回路の設計論、光DSP (Digital Signal Processor) など新高機能光回路へ展開する可能性もあるため、学術的・社会的意義は大きい。

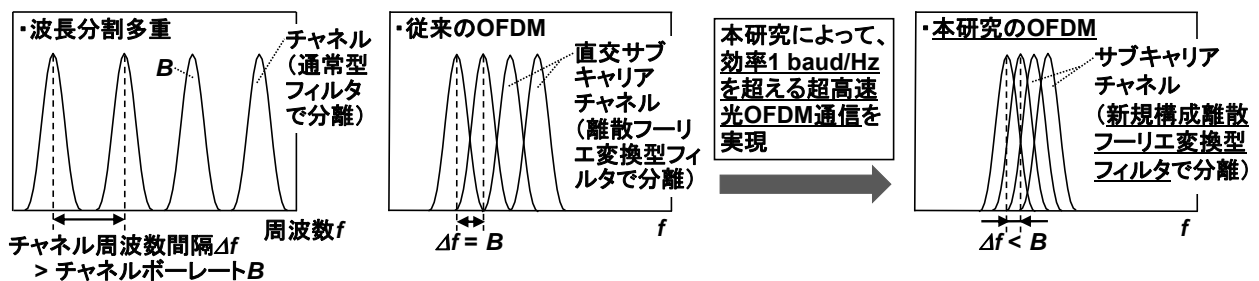


図1 光通信用各種多重化のチャネル配置 (チャネル数4の場合)

2 研究内容

2-1 研究方法

光 OFDM 通信の一層の高周波数利用効率化を進めるために、周波数利用効率 1 baud/Hz 超の超高速光 OFDM 実数変調信号用の全光チャネル分離集積光回路、およびその適用によって、効率 1 baud/Hz 超、100 Gbaud 超の超高速光 OFDM 通信を実現することを目標とした。

本研究で提案・検討を行った光 OFDM 信号用チャネル分離集積光回路の構成は以下の通りである。入力 OFDM 信号の遅延線でのシリアル/パラレル変換、およびスターカプラでの位相付与によって、光領域での OFDM 信号のチャネル分離に必要な、複素関数列 $\exp(-j2\pi mk/N)$ (j : 虚数単位、 n : 信号系列番号、 k : 離散フーリエ変換系列番号、 N : 標本点数) を基底とする光離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) を実現する。スターカプラ通過後のコンステレーションマップ上の信号点は、実数変調信号として OOK 信号

を使用する場合、必要な実部（同相成分）の他に、虚部（直交位相成分）にも値が生じる。実部のみを検出するため、光 DFT 回路、すなわちスターカプラの後段に信号光と局発光の電界加減算光回路を付加する。電界加減算光回路の 2 出力をバランス受光することによって実部信号のみを抽出する。光回路（導波路）材料は、当初、比屈折率差が大きく回路の小型化が可能な窒化シリコン、あるいはシリコンのいずれかを用いることを予定した。10 GHz 間隔、10 ch 程度の光回路を作製し、効率 1 baud/Hz 超、100 Gbaud 超の光 OOK-OFDM 信号の分離を行うことを目指した。

本研究期間内に、(1)光回路の最適構成設計・作製、(2)光回路特性評価・光信号分離用実験系の構築、(3)実験系を用いた光回路の特性評価を行った。

(1)の光回路に関しては、当初予定していた窒化シリコンあるいはシリコン光導波路ではなく、石英光導波路による設計、作製を行った。これは、予定していた窒化シリコンあるいはシリコン光導波路のファウンドリの作製予定が応募者の研究計画とは合わず、数か月以上の作製の大幅な遅れが発生してしまうこと、また、窒化シリコンあるいはシリコン光導波路を用いる場合、周波数特性間のクロストークが大きくなり予定していた特性が得られない可能性が大きかったためである。従って、サイズ、消費電力特性はある程度犠牲にして、光学特性（クロストーク、損失）の優れる石英導波路（比屈折率差 $\Delta=1.2\%$ ）を使用することにした。チャンネル数 10、チャンネルあたりのシンボルレート 20 Gbaud、最大総容量 200 Gbaud の光 OFDM 信号を分離可能な光回路を作製した。

(2)の測定評価系に関しては、新規に必要なバランス受光器、光学・RF 部品類を購入し、保有済の測定装置・素子類（半導体レーザ、高速オシロスコープ、光・RF スペクトルアナライザ、符号誤り率測定器、光ファイバ増幅器、多チャンネル電源、回転微動調芯台、光変調器など）と組み合わせることによって構築を完了した。光回路の周波数特性を分解能 1 GHz で測定し、チャンネルあたり 20 Gbaud の光 OOK・OFDM 信号の評価が可能である。

(3)の光回路の特性評価に関しては、高周波数利用効率光 OFDM 信号の分離を実現する上で必要な光 OFDM 信号分離回路のゲートレス化は達成したが、最終目標である高周波数利用効率光 OFDM 信号の分離については現在も継続中である。

2-2 研究成果

現在実験結果として得られている光 OFDM 信号分離回路のゲートレス化について、以下に詳細に記載する。

スラブスターカプラ型光 DFT 回路、結合率可変カプラアレイ、遅延線アレイから構成される、集積型可変光 OFDM 信号分離フィルタ（比屈折率差 $\Delta=1.2\%$ の石英光導波路で作製、サイズ $21 \times 44 \text{ mm}^2$ ）を作製した。その構成を図 2 に示す。10 x 10 スターカプラの半径、入出力導波路ピッチは、それぞれ 1.5 mm、12.6 μm と設計した。10 個の遅延線から構成される遅延線アレイでは、後段のスターカプラでの光 DFT 処理のために入力光 OFDM 信号のシリアル/パラレル変換が行われる。隣接遅延線間の長さの差は 2.07 mm であり、10 Gbaud 信号の 1/10 のタイムスロット差に相当する。光が通過する有効遅延線数が分離可能な最大チャンネル数に相当し、光が通過する有効遅延線の長さの差がフィルタのフリースペクトルレンジを決めるため、結合率可変カプラを用いた遅延線の選択によって、様々なチャンネル数、シンボルレートの信号を分離できる。全ての遅延線、あるいはそれぞれ隣接する 5 個の遅延線に光を通過させることによって、それぞれ 5 x 10 Gbaud、5 x 20 Gbaud の光 OFDM 信号を分離できる。チャンネル信号間の直交性は 1 タイムスロット時間で成り立つため、これまで光フィルタの出力信号中の有効時間を抽出する光ゲートを用いていた。今回は周波数利用効率を向上した光 OFDM 信号分離光回路の実現のため、光ゲートを使用せず、帯域 26.5 GHz の広帯域受光器を使用することによって、受光後の電気信号においても有効時間特性がなるべく劣化せずに受信できるようにした。

上記の光回路を用いて、5 x 10 Gbit/s、5 x 20 Gbit/s の光 OFDM 信号（OOK 信号使用）のチャンネル分離実験を行った。使用した測定評価系を図 3 に示す。分布帰還型半導体レーザの出力光を、LN (LiNbO_3) 位相変調器で 10/20 GHz の正弦波で位相変調することによって 10/20 GHz 間隔のコム周波数を生成し、必要な数のコム周波数を矩形フィルタによって切り出す。コム周波数を FSR (Free Spectral Range) 20/40 GHz のインターリーブ光フィルタによって、偶数チャンネル、奇数チャンネルに分離し、偶数・奇数チャンネルのコムを別々の LN 強度変調器で変調する。変調信号は、パルスパターンジェネレータ (Pulse Pattern Generator: PPG) から生成した 10/20 Gbit/s、2 値 OOK 信号を用いた。偶数・奇数チャンネル信号を合波して光 OFDM 信号を生成するために、偶数・奇数チャンネル信号間のビット同期が取れるように変調信号間の位相調整を行った。生成光 OFDM 信号をゲート除去型集積可変光 OFDM 信号分離フィルタに入射し、その出力光信号を光電変換した後、オシロス

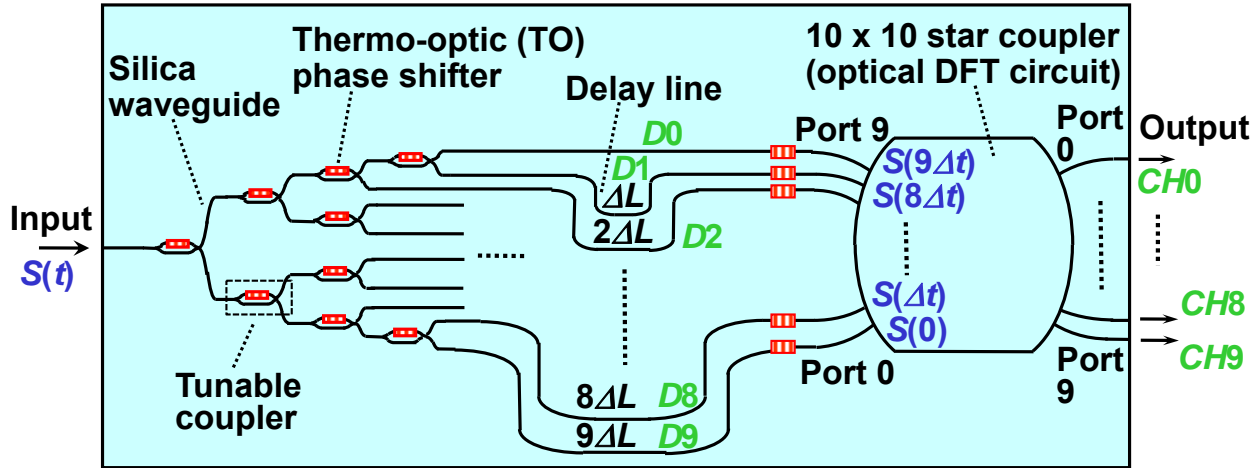


図2 ゲート除去型集積可変光 OFDM 信号分離フィルタの構成

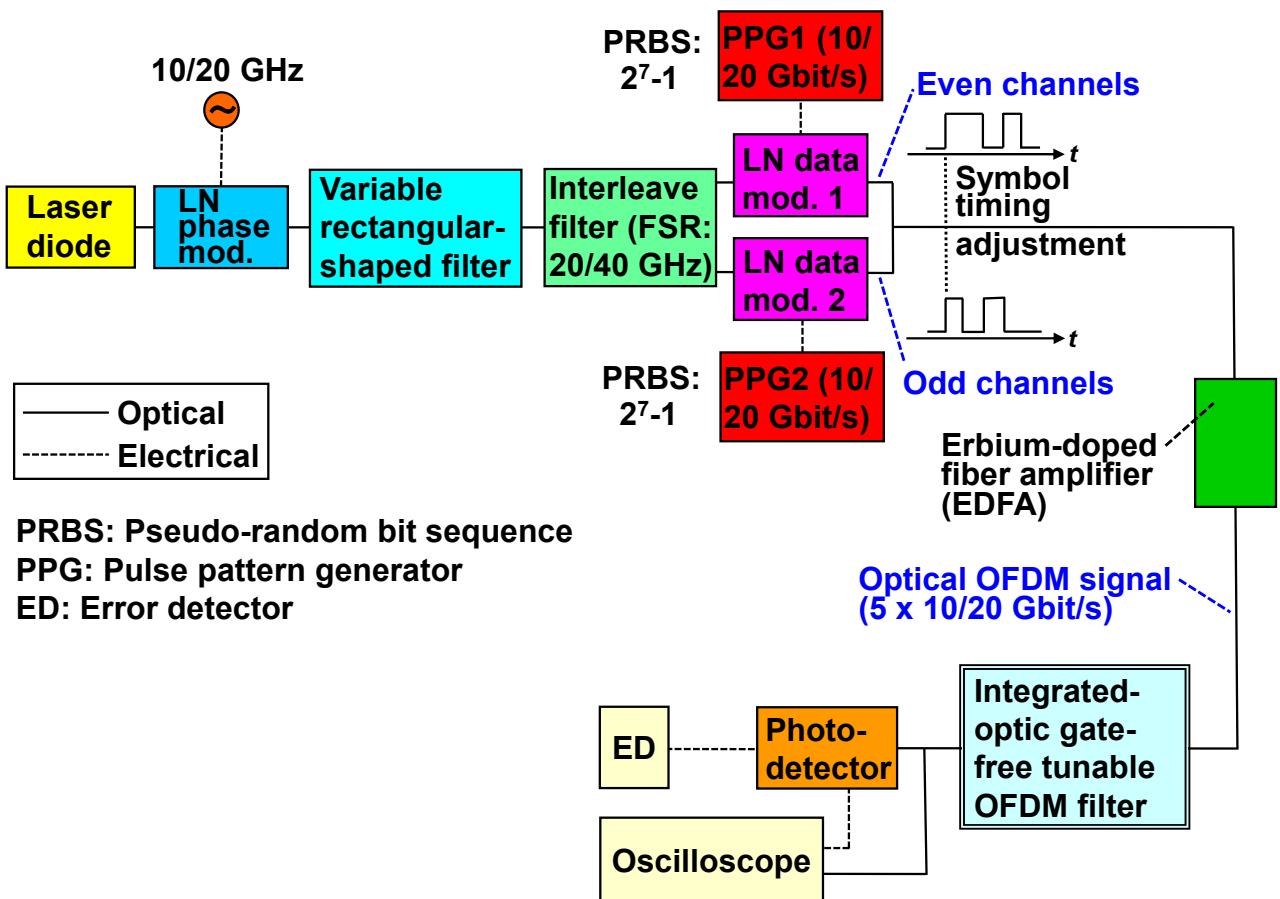
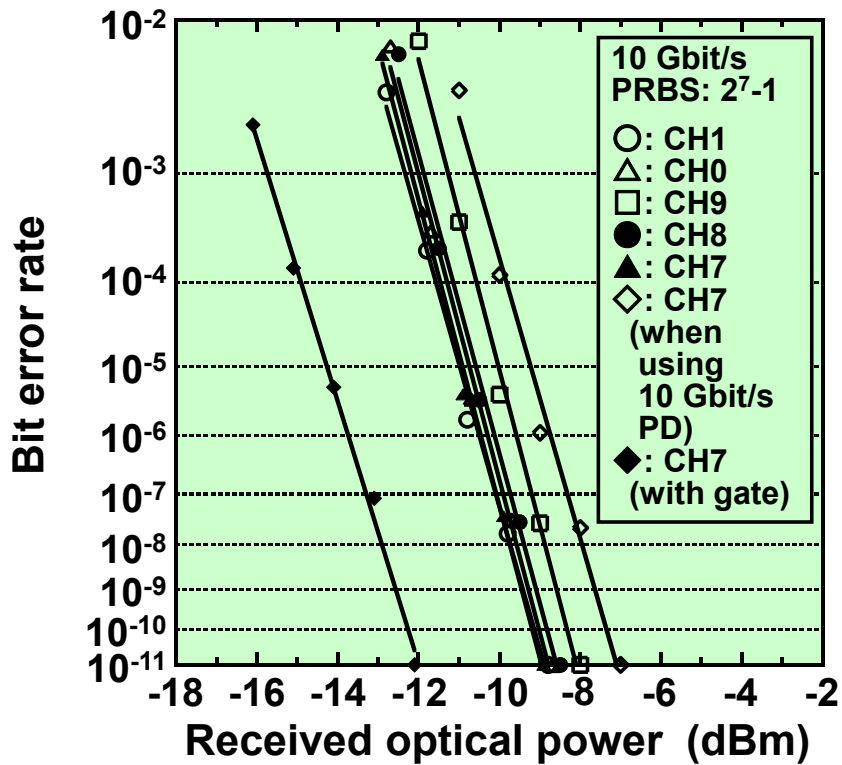


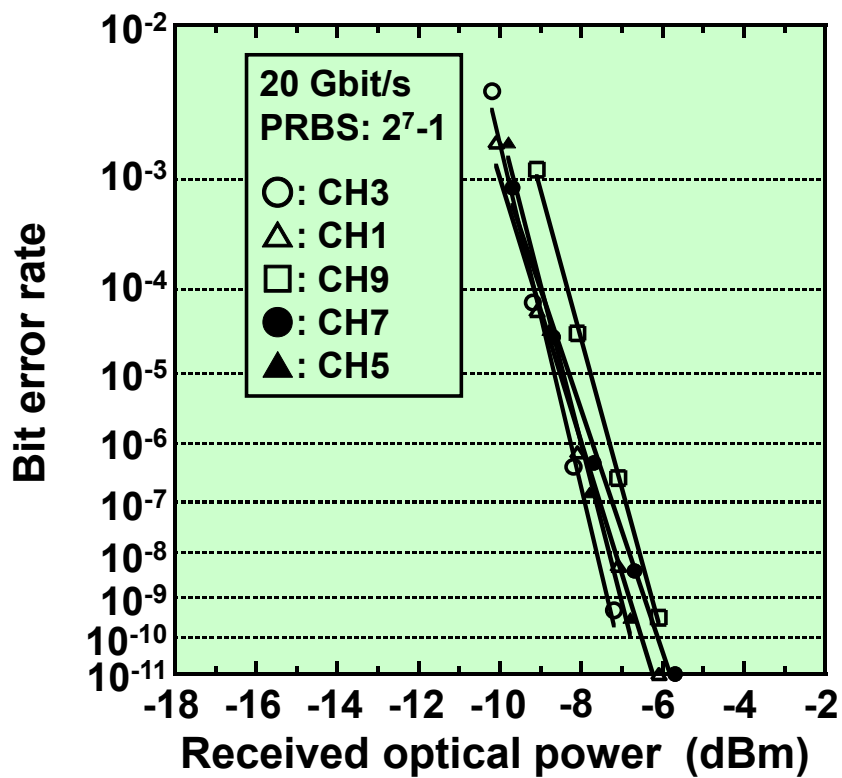
図3 測定評価系

コープ、誤り率測定器 (Error Detector: ED) を用いて評価を行った。

図4に符号誤り率の測定結果を示す。図4(a)、(b)に、それぞれ 5×10 Gbit/s、 5×20 Gbit/s の光 OFDM 信号の分離全チャネルの符号誤り率特性を示す。図4(a)には、参考のため、光ゲート無しで帯域 10.0 GHz の受光器を用いた場合、光ゲート有りの場合 (帯域 10.0 GHz の受光器を使用) の特性も示す。注釈のない誤り率は、光ゲート無しで帯域 26.5 GHz の受光器を用いた場合 (提案形態) の特性である。光ゲート無しで帯域 26.5 GHz の広帯域受光器を用いる提案構成において、全てのチャネルにおいて 10^{-10} オーダ以下の誤り率が得られた。



(a)



(b)

図2 符号誤り率特性 [(a) 5 x 10 Gbit/s、(b) 5 x 20 Gbit/s]

誤り率 10^{-9} における最良特性からのパワーペナルティは、 5×10 Gbit/s の場合 0.03~0.9 dB、 5×20 Gbit/s 信号の場合 0.3~1.1 dB であった。クロストークの影響が最も大きい中央チャンネルのパワーペナルティが最大であった。本提案構成の分離特性に対する、光ゲート無しで帯域 10.0 GHz の受光器を用いた場合の、分離特性のパワーペナルティは 1.8 dB であった。また、光ゲート有りの場合（帯域 10.0 GHz の受光器を使用）に対する、本提案構成のパワーペナルティは 3.1 dB であった。

2-3 今後の展開

実数変調信号を用いる効率 1 baud/Hz 超の光 OFDM 信号の分離回路を実現した後、複素数変調信号 [4 位相偏移変調 (Quadrature Phase Shift Keying: QPSK)、直交振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation: QAM) 信号など] を用いる効率 1 baud/Hz 超の光 OFDM 信号の分離回路の検討に移行する。

本研究によって、光領域の信号処理に新しい手法を導入する契機となり、延いてはより高機能な光 DSP、光適応信号処理回路・光知的信号処理回路へと展開する可能性もあるため、学術的・社会的意義は大きい。

3 まとめ

高周波数利用効率光 OFDM 信号の分離を実現する上で必要な光 OFDM 信号分離回路のゲートレス化は達成した。スラブスターカップラ型光 DFT 回路を主構成要素とする光ゲート除去型集積可変光フィルタを作製して、可変チャンネルビットレート光 OFDM 信号のチャンネル分離を行った。ゲート有りの場合と比較して特性は劣化したが、全分離チャンネルで 10^{-10} オーダ以下の符号誤り率を得た。また、使用受光器の帯域に対する、分離特性の違いについても評価を行った。

今後は本光回路構成を活用して、高周波数利用効率光 OFDM 信号の分離を早急に実現する予定である。

【参考文献】

- [1] H. Sanjoh, E. Yamada, and Y. Yoshikuni, "Optical orthogonal frequency division multiplexing using frequency/time domain filtering for high spectral efficiency up to 1 bit/s/Hz," in *Proc. OFC (Optical Fiber Communication Conference) 2002*, paper **ThD1**, Anaheim, USA, Mar. 2002.
- [2] W. Shieh, "OFDM for adaptive ultra high-speed optical networks," in *Proc. OFC 2010*, paper **OWO1**, San Diego, USA, Mar. 2010.
- [3] A. J. Lowery and L. B. Du, "Optical orthogonal division multiplexing for long haul optical communications: a review of the first five years," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 421-438, Aug. 2011.
- [4] S. L. Jansen, "Multi-carrier approaches for next-generation transmission: why, where and how?," in *Proc. OFC 2012*, paper **OTh1B.1**, Los Angeles, USA, Mar. 2012.
- [5] X. Liu and S. Chandrasekhar, "Superchannel for next-generation optical networks," in *Proc. OFC 2014*, paper **WIH.5**, San Francisco, USA, Mar. 2014.
- [6] K. Takiguchi, T. Kitoh, M. Oguma, A. Mori, and H. Takahashi, "Integrated-optic demultiplexers for optical OFDM signals," in *Proc. OFC 2011*, paper **OWM4**, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [7] K. Takiguchi, T. Kitoh, M. Oguma, Y. Hashizume, and H. Takahashi, "Integrated-optic OFDM demultiplexer using multi-mode interference coupler-based optical DFT circuit," in *Proc. OFC 2012*, paper **OM3J.6**, Los Angeles, USA, Mar. 2012.
- [8] K. Takiguchi, T. Nakagawa, and T. Miwa, "Demultiplexing method of variable capacity optical OFDM signal using time lens-based optical Fourier transform," *IEICE Trans. Electron.*, vol. **E101-C**, no. 2, pp. 112-117, Feb. 2018.
- [9] K. Takiguchi and Y. Ikeyama, "Tunable optical OFDM demultiplexer utilizing slab star coupler-based optical DFT circuit," *Photonics Technol. Lett.*, vol. **31**, no. 16, pp. 1327-1330, Aug. 2019.
- [10] D. Hillerkuss, M. Winter, M. Techke, A. Marculescu, J. Li, G. Sigurdsson, K. Worms, S. B. Ezra, N. Narkiss, W. Freude, and J. Leuthold, "Simple all-optical FFT scheme enabling Tbit/s real-time signal processing," *Opt. Express*, vol. **18**, no. 9, pp. 9324-9340, Apr. 2010.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Integrated-optic gate-free tunable filter for demultiplexing various channel symbol rate OFDM signals	OFC (Optical Fiber Communication Conference) 2021	2021年6月
Integrated-optic spectrum synthesizer with loop-back paths for processing 10 GHz-spaced frequency comb	Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR) 2020	2020年8月
光ゲートなしで集積型光フーリエ変換フィルタのみを用いた光 OFDM チャネル分離実験	電子情報通信学会総合大会	2021年3月
ループバック構成を持つ 10 GHz 間隔光周波数コム処理用集積型光スペクトルシンセサイザ	電気関係学会関西連合大会	2020年11月
可変容量光 OFDM 信号サブキャリアチャネル分離用光回路	電気関係学会関西連合大会（招待講演）	2020年11月