

# 光トランスマルチプレクサに関する研究

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

光通信において、時分割多重 (Time Division Multiplexing: TDM) 信号と波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 信号を、光電変換を介さずに光領域で自在に直接変換する技術 (トランスマルチプレクサ) は、将来の全光ネットワークの実現に向け重要である。この技術が実現できれば、異なる分割多重信号間の変換を処理速度の制限なく低消費電力で実現でき、光ネットワークの柔軟化、簡易化、経済化をもたらすことができる。

非線形光学効果を用いることなく、光逆離散フーリエ変換 (Inverse Discrete Fourier Transform: IDFT)、あるいは光逆高速フーリエ変換 (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) 技術を用いることによって、受動回路でトランスマルチプレクサを実現することを、助成期間に拘らない最終目標とする。その実現のための基礎検討として、TDM 信号の周波数変換を光導波路型の光逆フーリエ変換回路を用いて実現することを目指す。初期的な本目標が実現された段階においても、光ネットワークの進展に大きく貢献することができ、その意義は大きい。例として、現状の光通信では、高速空間スイッチ技術が未成熟であるため、TDM 信号の高速経路振り分け (高速ルーティング) は難しい。TDM 信号の周波数を、受動光回路を用いて所望の値に簡便に変換できれば、実用化済のアレイ導波路格子などの波長合分波素子を併用することによって、信号の高速ルーティングが可能となる。

## 2 研究内容

### 2-1 研究方法

本テーマの発想は、2007 年から本格的に研究開発が始まった、光直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 技術[1]-[14]に基づいている。OFDM は、複数の直交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分割多重する方式であり、従来の WDM 技術と比較し、周波数利用効率を大幅に向上することができる。地上デジタルテレビ放送や無線 LAN 用の OFDM 信号と異なり、次世代光通信のチャンネルあたりのシンボルレートは数 10 Gbaud 以上と格段に高く、総伝送容量は 100 Gb/s を超える。そのため、電子回路による OFDM 信号の実時間分離は、処理速度の限界、消費電力の増大のため難しい。従って、申請者は早くから、OFDM 信号を光領域で直接分離可能な技術の重要性を認識し、これまでに、分離に必要な光離散フーリエ変換 (DFT) / 光高速フーリエ変換 (FFT) 技術を用いた各種 OFDM 信号分離光回路を世界に先駆けて提案し、動作実証を行ってきた[7]-[10]。

光 IDFT/IFFT 回路構成の周波数変換回路とその動作原理を、それぞれ、図 1、2 に示す。周波数変換回路は IDFT/IFFT 回路と可変遅延線とから構成され、導波路の位相設定によって、IDFT/IFFT

$[S_k = \sum_{n=0}^{N-1} d_n e^{j2\pi nk/N} (k=0 \sim N-1)]$  が実現される (図 1 では  $N=4$ )。タイムスロット  $T$  の  $1/N$  の幅を持つ

TDM 信号を生成し、図 1 の  $d_n$  に入力すると、信号は図 2 の位相付与を受ける。周波数  $f$  は位相  $\phi$  の時間微分 ( $f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$ ) で表されるため、周波数変換回路の出力信号の周波数は、入力位置に応じて  $n/T$  シフトされる。すなわち、1 つの入力に信号を入力すると、入力位置に応じて異なる周波数変換信号が得られる。また、複数入力のいくつかを選んで信号を入力すると、トランスマルチプレクサとして動作する [全入力使用の場合、OFDM 信号が生成される]。

(1) 光逆離散フーリエ変換 IDFT/IFFT 回路構成光周波数変換回路の設計、作製、(2) 時分割多重 (Time Division Multiplexing: TDM) 信号用光周波数変換回路の測定評価系の構築、(3) 光周波数変換回路の特性設定、評価、および(4)成果の外部発表、次段階の研究に向けた知見、課題の整理に取り組んだ。(1)は予定より約 2 か月遅れて平成 26 年 8 月下旬に完了し、(2)はほぼ予定通りに平成 26 年 6 月下旬に完了した。(3)

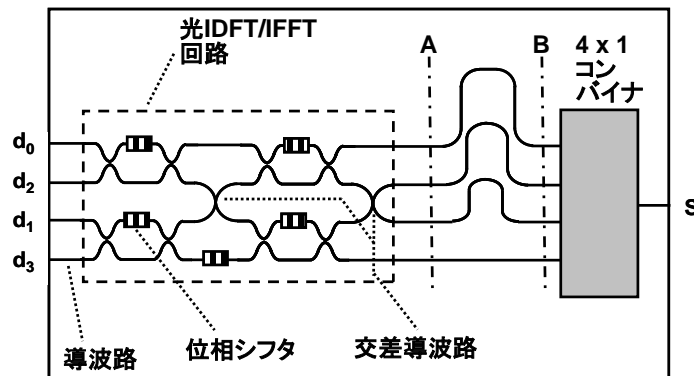


図1 光 IDFT/IFFT 回路構成の周波数変換回路

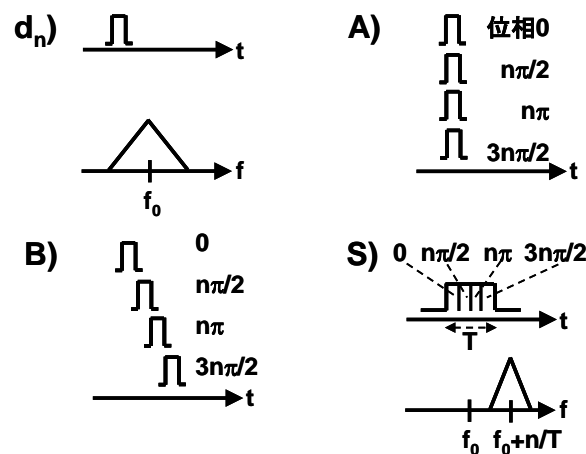


図2 周波数変換の原理

は(1)の遅れに起因して、約2か月遅れの9月初旬に開始し、初期目標（10 Gb/sのTDM信号の周波数を数10 GHzの範囲で変化）に関しては、原理検証実験を平成27年3月中に完了した。(4)に関しては、平成27年3月までに3件の外部発表を行った。また、知見、課題の整理は現在も継続中である。

以下に各項目の詳細を記す。

(1)の光回路に関しては、当初予定した10 GHz単位で30 GHzまでの周波数シフトが可能な4チャンネル回路（方向性結合器編込型光IDFT/IFFT回路）の他に、10 GHz単位で90 GHzまでの周波数シフトが可能な10チャンネル回路（スラブ型光IDFT/IFFT回路）の設計も行い、石英光導波路のファウンドリ会社（作製サービス会社）を活用して比屈折率差 $\Delta=1.1$ 、 $1.2\%$ の光回路の作製を行った。10チャンネル回路の設計、作製を追加したことと、外部ファウンドリでの作製が予定より遅れたため、当初の予定より2か月の遅延が生じた。

(2)の測定評価系の整備に関しては、所属機関の予算も併用して、パルス発生用変調器、光導波回路駆動用多チャンネル電源、データ変調器、光回路微動台、高速光受信器、光学部品類、RF部品類を予定通り購入した。保有済みのビットエラーレート測定器、高速オシロスコープ、光スペクトラムアナライザなどの基本測定器と組み合わせて、10 Gb/s信号ベースの時間信号評価系、および分解能0.01 nmの周波数特性評価系を構成した。

(3)の光回路の特性設定、評価に関しては以下の手順で進めた。まずは、4チャンネル方向性結合器編込型光IFFT回路の特性設定、評価に取り組んだ。石英導波路の熱光学位相シフトを用いた $0.01\pi$ オーダの位相設定

特性を用いて、周波数領域で損失 2.4 dB、消光比 $\sim 20\sim 40$  dB の良好な特性を得た。10 Gb/s TDM パルス を光 IFFT 回路に入力し、周波数変換特性の原理検証実験を行った結果、予定通りの 10 $\sim 30$  GHz の範囲で の信号周波数シフトを達成することができた。さらに広い周波数可変範囲特性を持つ 10 チャンnelスラブ型 光 IFFT 回路に関しては、周波数領域での特性設定、評価を継続中であり、損失 7.0 dB、消光比 $\sim 20\sim 30$  dB の特性を、現在までに得ている。今後は、消光比を中心とした特性改善の検討を継続した後、周波数変換実 験に移行する予定である。

(4)の外部発表については、上記の 4 チャンnel方向性結合器編込型光 IFFT 回路に関して、英文レター誌 (Electronics Letters, 2015 年 3 月発行)、国際会議 (Photonics West 2015, 米国サンフランシスコ, 2015 年 2 月発表)、国内学会 (電子情報通信学会 総合大会, 草津, 2015 年 3 月)において、原理確認結果を発表 した。なお、10 チャンnelスラブ型光 IFFT 回路の評価が未完了のため、知見、課題の整理も継続中である。

## 2-2 研究成果

周波数変換を、光 OFDM 信号の生成という観点から実現した。以下に詳細を記す。

図 3 に、石英光導波路技術を用いて作製した、4 サブキャリアチャンネル生成用の光 IDFT/IFFT 回路の構 成を示す (サイズ: 18 x 38 mm<sup>2</sup>、比屈折率差 $\Delta=1.1\%$ )。4 つの 2 x 2 3 dB 方向性結合器、遅延線アレイ [隣 接遅延線間の長さの差 $\Delta L=5.1$  mm (10 Gbaud 信号のシンボル時間を 1/4 周期ずらす遅延)]、4 x 1 合流器 から構成されている。図 3 の回路を用いれば、中心周波数が入力信号と同じ出力信号と、10 $\sim 30$  GHz の範 囲で 10 GHz 間隔で周波数がシフトした出力信号を、信号の入力位置に応じて得ることができる。以前報告 した光 OFDM 信号分離回路[?]の構成要素を逆に配列した構成を有しているが、以前のマツハツェンダ型干 渉計を方向性結合器に置き換えることによって回路サイズの小型化を図っている。入力信号  $d_0\sim d_3$  は、熱光 学位相シフトを併用することによって青字で示したように変化し、光 IDFT/IFFT が実行され、光 OFDM 信 号が出力される。

図 4 に図 3 の回路の評価系を示す。波長 1550.27 nm の DFB レーザ光を、同期した 2 つの 10 GHz 正弦 波で駆動された EA 強度変調器、LN 位相変調器を通過させることによって、繰り返し 10 GHz のパルス光 を生成する。その後 4 つに等分岐されたパルスは、10 GHz 正弦波に同期した 4 つの 10 Gb/s データ信号に よって LN 強度変調器を用いて変調され、図 3 の光 IDFT/IFFT 回路に入力される。

図 5 に光 IDFT/IFFT 回路の周波数特性を示す。全 4 入力と出力間の損失は 2.4 $\sim 3.1$  dB であり、設計通り 40 GHz の周期性を示した。図 6 に光 IDFT/IFFT 回路を用いて生成した 4 x 10 Gb/s [(a)]および 8 x 10 Gb/s 光 OFDM 信号 [(b)] のスペクトルを示す。OFDM 信号の特徴である矩形状スペクトル、雑音状の時間波形 が得られていることがわかる。4 サブキャリア信号のスペクトル偏差は 1.4 dB 未満であった。また、8 x 10

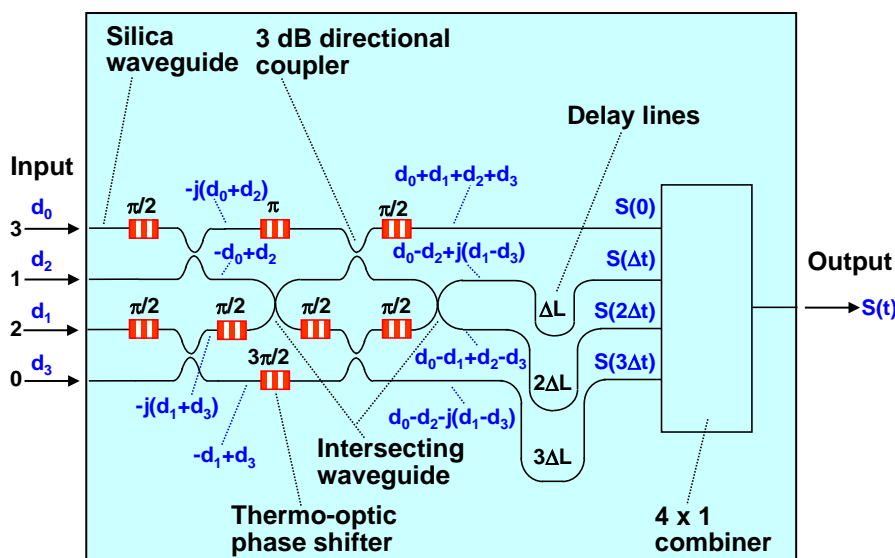


図 3 4 サブキャリアチャンネル生成用光 IDFT/IFFT 回路の構成

Gb/s 光 OFDM 信号は、光回路の周期性を活用することによって生成される（8 サブキャリア信号のスペクトル偏差： $<3.4$  dB）。そのため、周波数分離用に追加フィルタが必要となる。今後、スペクトル特性の不要サイドローブ成分を一層除去し、特性改善を行っていくことが必要である。また、4 を超えるサブキャリア数では、使用チャンネル間スペクトル偏差を低減することが重要である。

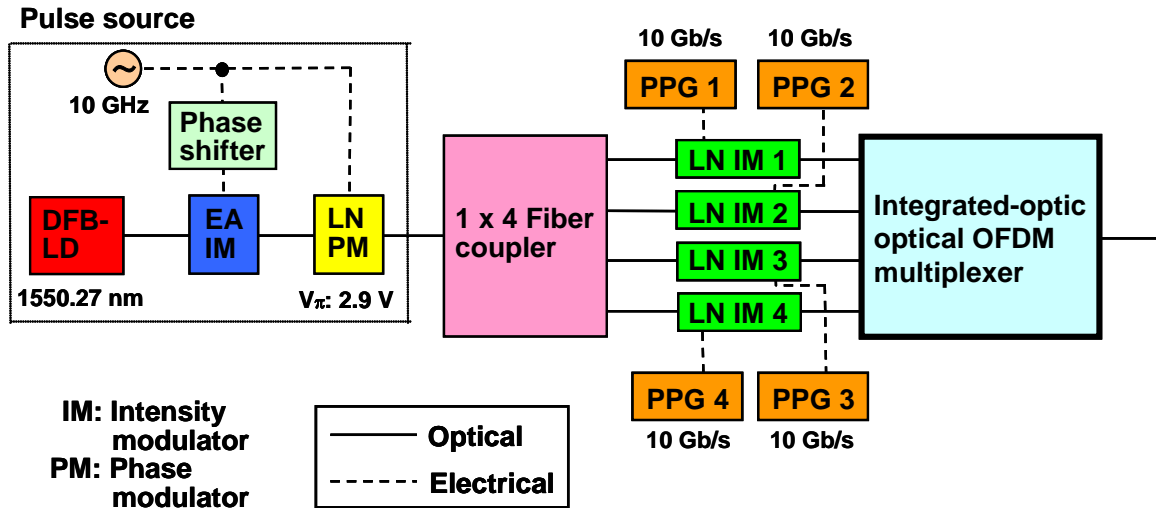


図 4 光回路の評価系

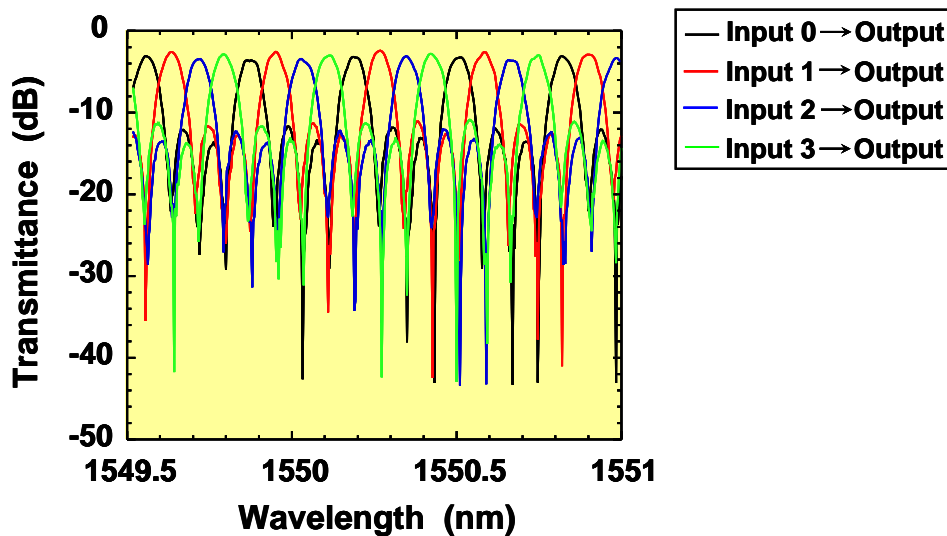


図 5 光 IDFT/IFFT 回路の周波数特性

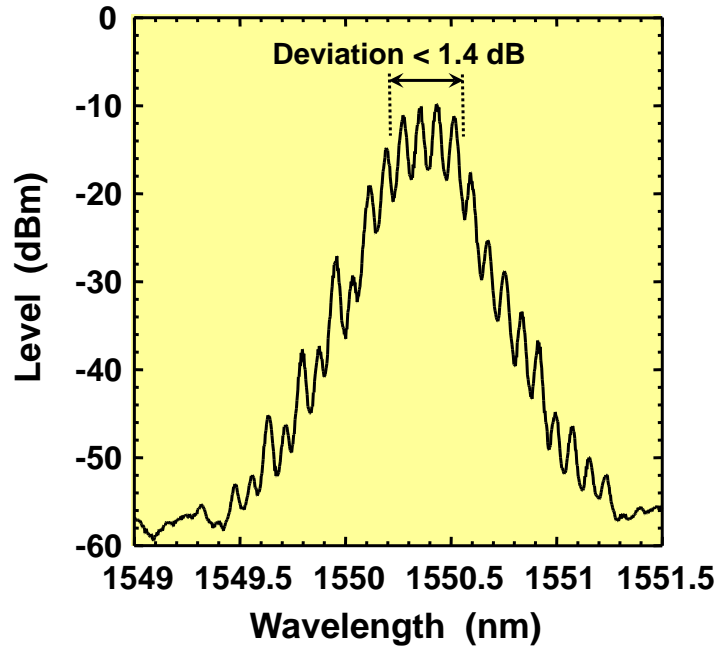
### 2-3 今後の展開

今後は先ず、10 GHz 単位で 90 GHz までの周波数シフトが可能な、10 チャンネルスラブ型光 IDFT/IFFT 回路の評価を完了させる。

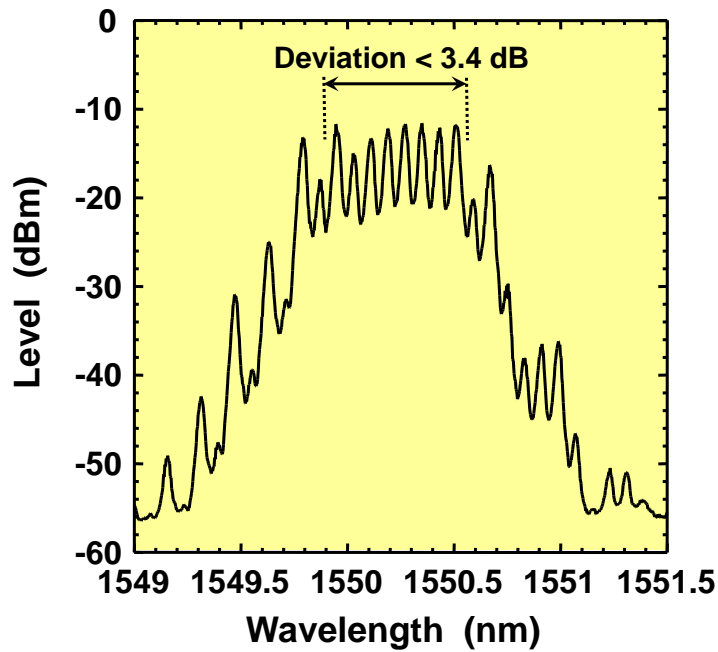
その後、本周波数変換技術に関して、対応ビットレートの増大（ $\geq 40$  Gb/s）、周波数変換範囲の拡大（ $> 100$  GHz）などの特性改善を行い、40 Gb/s TDM 信号の高速ルーティングなどのサブシステム実験を行う。さらに、本周波数変換技術の検討結果から得られる知見、課題をまとめる。

上記の知見、課題を基に、光 IDFT/IFFT 回路構成の光トランスマルチプレクサ実現へ向けた検討を本格的に開始する。最終的には、100 Gb/s 以上の高速 TDM 信号を 4~8 チャンネル程度の WDM 信号に変換可能な性能の実現を目指す。

光 IDFT/IFFT 回路を使用する構成では、上記技術の実現には、光信号への精密な位相付与が鍵となる。



(a) 4 x 10 Gb/s



(b) 8 x 10 Gb/s

図 6 光 IDFT/IFFT 回路を用いて生成した光 OFDM 信号のスペクトル

従って、各研究段階において、安定な位相付与が可能な、石英、シリコン光導波路ベースの光回路を活用する。特に小型、低消費電力化に適した後者の導波回路に徐々に研究の重点を移す。研究の進展に伴い光回路が複雑化するため、光回路の最適設計技術も重要となる。

### 3 まとめ

光通信において、TDM 信号と WDM 信号を、光電変換を介さずに光領域で自在に直接変換する技術（トランスマルチプレクサ）を実現するための基礎検討として、TDM 信号の周波数変換を導波路型の光 IDFT/IFFT 回路を用いて実現することを目指し検討を行った。光 IDFT/IFFT 回路構成光周波数変換回路の設計、作製、(2) TDM 信号用光周波数変換回路の測定評価系の構築、(3)光周波数変換回路の特性評価、および(4)成果の外部発表、次段階の研究に向けた知見、課題の整理に取り組んだ。研究期間内に、上記(1)～(3)の項目をほぼ予定通りに完了することができた。10 GHz 単位（チャンネル間隔）で 30 GHz までの周波数シフトが可能な 4 チャンネル回路（方向性結合器編込型光 IDFT/IFFT 回路）を、石英導波路技術を用いて設計、作製した。10 Gb/s TDM パルスを光 IFFT 回路に入力し、周波数変換特性の原理検証実験を行った結果、予定通り 10～30 GHz の範囲での信号周波数シフトを達成することができた。本研究成果に関して、3 件の外部発表を行った。本検討結果より、周波数変換回路としての対応ビットレートの増大、周波数変換範囲の拡大、および最終目標である光 IDFT/IFFT 回路構成の光トランスマルチプレクサ実現へ向けた有用な知見を得られた。

#### 【参考文献】

- [1] H. Sanjoh et al., OFC'02 **ThD1**, Anaheim, 401-402 (2002).
- [2] A. D. Ellis et al., *Photon. Technol. Lett.* **17**, 504-506 (2005).
- [3] [S. Chandrasekhar et al.](#), ECOC'09 **PD2.6**, Vienna (2009).
- [4] D. Qian et al., OFC'10 **PDPD9**, San Diego (2010).
- [5] W.-R. Peng et al., ECOC'10 **PD2.5**, Turin 45-47 (2010).
- [6] K. Lee et al., *Opt. Express* **16**, 4023-4028 (2008).
- [7] K. Takiguchi et al., *Opt. Lett.* **34**, 1828-1830 (2009).
- [8] K. Takiguchi et al., *Electron. Lett.* **46**, 575-576 (2010).
- [9] K. Takiguchi et al., ECOC'10 **PD1.4**, Turin 24-26 (2010).
- [10] K. Takiguchi et al., OFC'12 **OM3J.6**, Los Angeles (2012).
- [11] T. Kobayashi et al., *J. Lightwave Technol.* **34**, 3714-3720 (2009).
- [12] D. Hillerkuss et al., OFC'10 **PDPC1**, San Diego (2010).
- [13] A. J. Lowery, *Opt. Express* **18**, 14129-14143 (2010).
- [14] J. Zhou, *Photon. Technol. Lett.* **22**, 1093-1095 (2010).

#### 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Integrated-optic OFDM signal multiplexer composed of optical IFFT circuit	Electronics Letters	2015 年 3 月
Optical OFDM signal generation using integrated-optic multiplexer based on optical IFFT	Photonics West 2015	2015 年 2 月
光逆高速フーリエ変換回路を用いた光 OFDM 信号生成の基礎検討	電子情報通信学会 総合大会	2015 年 3 月