

光 OFDM 通信用アド／ドロップ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ネル信号を、チャネル信号のシンボルレート間隔で高密度に直交させて周波数分割多重する通信方式である。ガードバンドが必要な従来の波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 通信と比較し、周波数利用効率を大幅に向上できるため、次世代の光通信用分割多重技術と考えられている。OFDM チャネル信号の生成、分離には、それぞれ逆フーリエ変換、フーリエ変換が必要である[1]-[17]。2 地点間通信用の光 OFDM 信号の生成・分離技術は進展しているが、将来の光 OFDM 信号の光ネットワークにおける利用を見据えた、ノードでのアド／ドロップ (リングネットシステムワーク用)、波長選択スイッチ (クロスコネクシステム用) などのさらに高度な処理技術の検討は進んでいない。これまでに、光ファイバ中の非線形光学効果を用いることによって、光 OFDM 信号のアド／ドロップを実現した例が報告されている[18]。しかし、非線形光学効果を用いた手法では、多チャネル化が難しく、構成が複雑・大型化する欠点がある。

そのため本助成研究では、これらの欠点を克服するものとして、光 OFDM 通信用の全光処理型アド／ドロップマルチプレクサとして、ループバック型構成の光フーリエ変換／光逆フーリエ変換共用回路を新たに提案し、受動型の集積光技術を用いて実現を目指した。初期検討として、チャネル数 10 程度、チャネルあたりのシンボルレート 10 Gbaud 程度、総容量 100 Gbit/s 程度の OFDM 信号のアド／ドロップマルチプレクサを実現し、本回路の電気処理に対する高速・低消費電力特性を実証することを目的とした。本アド／ドロップマルチプレクサが実現されれば、光周波数資源を有効利用できる OFDM ベースの光ネットワークの進展に寄与できる。また、本研究で得られた成果・知見、課題は、波長選択スイッチなど、OFDM 信号を用いたさらに高度な光ネットワーク用の光デバイスの研究・進展に繋がる。ネットワーク全体の帯域の有効利用化のみならず、使用ハードウェア (レーザ、変調器、光増幅器、受光器など) の稼働数減少、あるいは必要仕様の緩和を実現できるため、消費電力、コストを抑制可能な効果もある。

2 研究内容

2-1 研究方法

本研究で提案した集積光回路型の OFDM 用アド／ドロップマルチプレクサの構成 (ループバック型光フーリエ変換／光逆フーリエ変換共用回路)、動作原理を、図 1 に示す (信号の実線:ドロップ、破線:アド)。小型で受動構成の光スターカプラは、分波時に光フーリエ変換 (OFDM 信号分離) を、合波時に光逆フーリエ変換 (OFDM 信号生成) を、1 つの素子で超高速に実現する機能を持つ。数 10 程度の多チャネル化が可能な特徴も有する。サブキャリアチャネル間の直交性は 1 シンボル時間内のみで成立する。従って後段のスターカプラでの光フーリエ変換のため、共通入力ポートからの光 OFDM 信号を $N+1$ 本 (N : 最大使用サブキャリアチャネル数) の遅延線アレイに等分配し、シンボル時間内でシリアル・パラレル変換する。スターカプラでの光の回折効果によってパラレル信号の光フーリエ変換が行われ、共通出力ポート以外に各サブキャリア信号が分波される。共通出力ポート以外を、 2×2 光スイッチアレイを介してスプリッタの入力ポートに接続する (ループバック構成)。光スイッチの残り 2 ポートの一方をアド入力、他方をドロップ出力とする。アド／ドロップ時はスイッチをクロス、それ以外はスルーとする。共通入力ポート以外の各サブキャリア信号は、光逆フーリエ変換されて共通出力ポートに合波され、光 OFDM 信号のアド／ドロップが実行される。ループバック構成によって、必要素子数、サイズが大幅に低減される。

本助成研究期間内に、(1)ループバック型構成アド／ドロップマルチプレクサの設計、作製、(2)測定評価系の構築、(3)特性評価、(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 1.5 か月遅れて平成 29 年 9 月中旬に完了し、(2)はほぼ当初の予定通り、平成 29 年 7 月に完了した。(3)については、(1)の遅れのため、約 2 か月遅れの 9 月中旬に開始した。光回路の特性設定、波長特性の評価を平成 29 年 12 月に完了したが、信号特性評価は完了せず現在も継続中である。(4)に関しては、

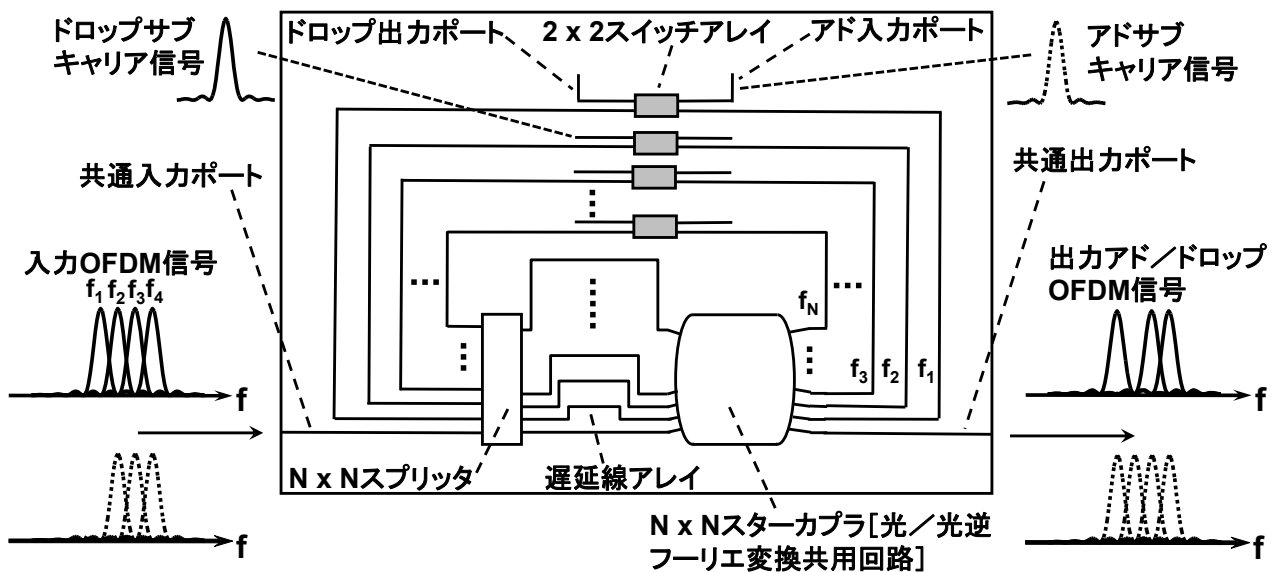


図1 集積光回路型 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサの構成、動作原理

平成 30 年 3 月までに、1 件の国際会議発表を行った。さらに論文投稿 1 件、国内学会発表 1 件を予定している。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)光回路に関しては、石英光導波路による設計、作製を行った。当初はシリコン光導波路を予定していたが、シリコン光導波回路のファウンドリの作製予定が、こちらの研究計画とは合わず、4 か月以上の作製の大幅な遅れが予想されたこと、また、シリコン光導波路を用いる場合、遅延線間の損失差が大きくなり、予定していた特性が得られない可能性があったためである。従って、サイズ、消費電力はある程度犠牲にして、光学特性の優れる石英光導波路を使用することに方針を変換した。チャンネル数 9、チャンネルあたりのシンボルレート 10 Gbaud、総容量 90 Gbaud のアド/ドロップ回路（比屈折率差 Δ : 1.2 %）を作製した。この方針転換が主な原因となり、当初線表からの遅れが生じた。
- (2)測定評価系の構築に関しては、光ファイバ増幅器型自然放出光源、光回路駆動用多チャンネル電源、回転微動台、光変調器、光学・RF 部品類を予定通り購入し、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、分解能 0.01 nm の波長特性評価系、および 10 Gbaud 信号ベースの時間信号評価系を、ほぼ予定通り構築することができた。
- (3)光回路の特性評価は、(1)が終了した 9 月中旬から開始した。先ず(2)で構築した測定評価系を用いて、波長特性の測定を行った。石英導波路の熱光学位相シフトを用いた 0.01π オーダの位相設定特性を活用して、損失 4.9 dB、消光比 ~ 30 dB の良好な特性を得た。損失の主要因は、スターカプラの過剰損失 3.1 dB、導波路・ファイバ間接続損失 1.0 dB であった。
信号特性測定による光回路の評価に関しては、現在も継続中である。
- (4)外部発表については、(3)の光回路の波長特性の評価結果に関して、国際会議（Photonics West 2018, 米国サンフランシスコ, 2018 年 1 月）で発表した。速報性を考慮して、当初予定していた OFC2018 への投稿から Photonics West 2018 への投稿に変更した。なお、信号の誤り率特性測定による光回路の特性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

図2に、比屈折率差 $\Delta=1.2\%$ の石英光導波路を用いて作製した、 10×10 スプリッタ、10 遅延線アレイ、スラスタカプラ型光 DFT/IDFT (Discrete Fourier Transform/Inverse Discrete Fourier Transform) 共用回路から構成される、光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサの概略構成を示す。長さが ΔL ずつ異なる 10 本の遅延線アレイを光 DFT/IDFT 共用回路の前段に配置し、それぞれに熱光学 (Thermo-optic: TO) 位相シフタを装荷している。位相シフタは遅延線部の位相誤差の補正、フィルタの中心周波数の調整に用いられる。スタカプラの半径、入出力導波路ピッチはそれぞれ 1.5 mm、12.6 μm 、 ΔL は 2.07 mm とし、9 ch \times 10 Gbaud 信号に対応可能とした。今回は初期検討であるため、図1の 2×2 スイッチアレイを集積化せず、光回路の入出力アレイ部にファイバアレイをバットジョイントし、アレイファイバ同士の接続の有無によって等価的にアド/ドロップ機能を実現する構成とした。アレイファイバ間には、バルク光学型の変調遅延線を配置し、適宜遅延調整を行った。

図3に、光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサの波長に対する強度透過特性を示す (含、共通出力ポート)。3 dB 帯域幅、損失はそれぞれ、9.5 GHz、4.9 dB であった。隣接チャンネルに対して 20 dB 程度、その他のチャンネルに対して 30 dB 程度の消光特性を示し、フィルタの 3 dB 帯域幅はほぼチャンネル間隔 (10 GHz) に一致した。損失 4.9 dB は主に、スタカプラの過剰損失 3.1 dB、導波路・ファイバ間接続損失 1.0 dB に起因している。また、波長領域でのアド/ドロップ動作も確認した。

図4に、光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサ用の信号特性評価実験系を示す。波長 1552.54 nm の分布帰還型 (Distributed Feedback: DFB) 半導体レーザの出力光を、LN (LiNbO₃) 位相変調器で 10 GHz の正弦波で位相変調することによって 10 GHz 間隔のコム周波数を生成し、必要な 9 チャンネルコム信号を矩形フィルタによって切り出す。9 チャンネルコムを FSR (Free Spectral Range) 20 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 Gbit/s、2 値 OOK (On-off Keying) 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 信号を光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサに入射し、その出力光信号を光電変換 [Optical-to-Electrical (O/E) Conversion] した後、オシロスコープ、誤り率測定器 (Error Detector: ED) を用いて評価する。なお、

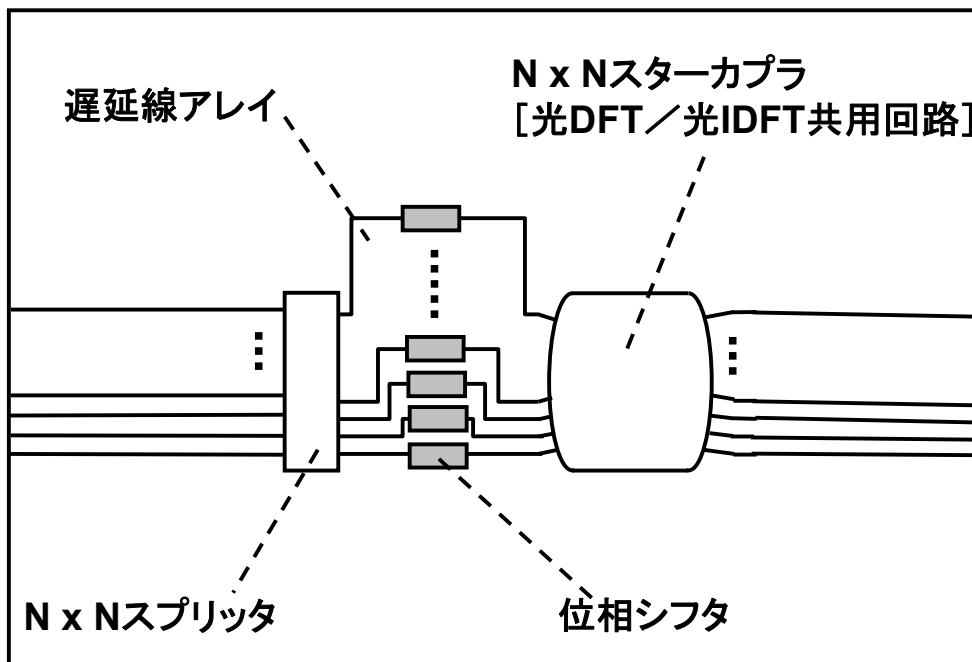


図2 作製した光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサの概略構成

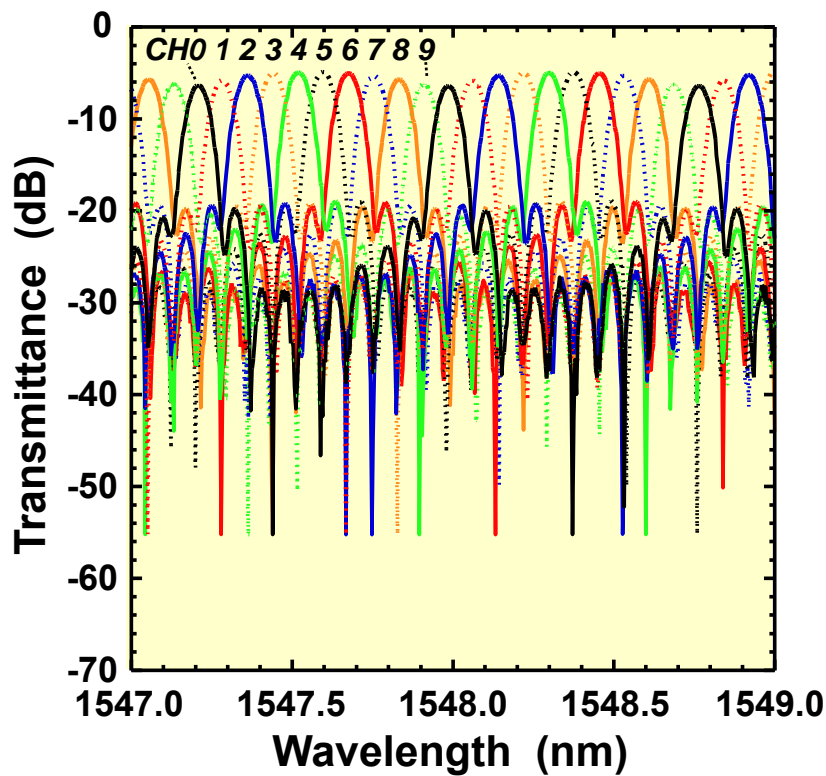


図3 光 OFDM 用アド／ドロップマルチプレクサの強度透過特性

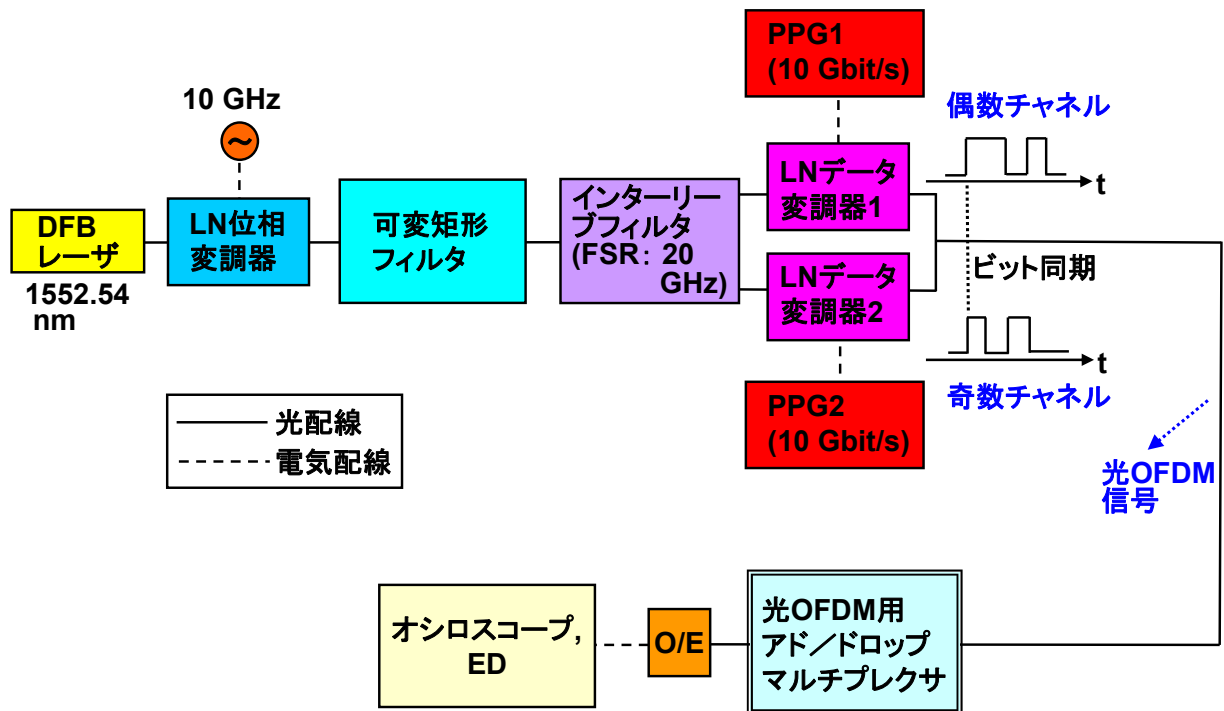


図4 光 OFDM 用アド／ドロップマルチプレクサ用信号特性評価実験系

オシロスコープを用いた時間信号の評価を行うためには、アド動作の場合、光 OFDM 信号生成系がもう 1 つ必要となる。また、アド動作の符号誤り率特性の評価を行うためには、光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサ後段にさらに光フーリエ変換手段が必要となる。そのため、今回の初期検討では、素子、機器の不足のため、ドロップ動作の評価のみが可能な実験系を構築した。図 4 の実験系を用いた信号測定による光回路の特性評価に関しては、現在も継続中である。

2-3 今後の展開

本研究期間終了後、将来の光ネットワークへの適用を想定して、アド/ドロップマルチプレクサの大規模化を主とした信号処理能力拡大の検討に移行する。本研究を通して得た知見、課題を基に、集積光回路の大規模化のための最適構成設計を行う。チャンネル数 16~32、チャンネルあたりのシンボルレート 20~40 Gbaud 程度の性能を持ち、多値信号も併用することによって Tbit/s クラスの信号のアド/ドロップが可能な光回路の実現を目指す。

アド/ドロップマルチプレクサの検討後、さらに高度な機能を持つ、光 OFDM 信号の各チャンネルを任意の組み合わせで任意の方路にルーティング可能な、波長選択スイッチ用集積光回路の実現に向けた検討に移行する。

小型・低消費電力化に適したシリコン、窒化シリコン、あるいは石英を用いた集積光回路を中心に研究を進める。近年、集積光回路を用いた高機能・大規模回路の報告は少なくなっているため、本助成研究で得られた内容、および将来の研究計画は、集積光回路分野の一層の活性化にも貢献できる。

3 まとめ

複数のサブキャリアチャンネル信号をチャンネル信号のシンボルレート間隔で高密度に直交させて周波数分割多重し、周波数利用効率を向上できる光 OFDM 通信用の全光処理型アド/ドロップマルチプレクサとして、ループバック型構成の光フーリエ変換/光逆フーリエ変換共用回路を新たに提案し、受動型の集積光技術を用いて実現を目指した。(1)ループバック型構成アド/ドロップマルチプレクサの設計、作製、(2)測定評価系の構築、(3)特性評価、(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)、(2)の項目をほぼ予定通りに完了することができた。(3)、(4)の項目の検討については、現在も継続中である。石英光導波路を使用し、チャンネル数 9、チャンネルあたりのシンボルレート 10 Gbaud、総容量 90 Gbaud のアド/ドロップ回路（比屈折率差 Δ : 1.2%）を作製した。構築した測定評価系を用いて作製した光回路の波長特性の測定を行った結果、損失 4.9 dB、消光比~30 dB の特性を得た。本研究成果に関して、1 件の外部発表を行った。

本検討によって、光 OFDM 用アド/ドロップマルチプレクサの大規模化、および光 OFDM 用波長選択スイッチの実現へ向けて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 **PDPD1**, San Diego (2010).
- [13] A. J. Lowery, *Opt. Express* **18**, 14129-14143 (2010).

- [14] J. Zhou, Photon. Technol. Lett. **22**, 1093-1095 (2010).
 [15] A. J. Lowery et al., Opt. Fiber Technol. **17**, 421-438 (2011).
 [16] S. L. Jansen, OFC'12 **OTh1B.1**, Los Angeles (2012).
 [17] K. Takiguchi et al., OFC'11 **OWM4**, Los Angeles (2011).
 [18] T. Richter et al., OFC'14 **Th5B.6**, San Francisco (2014).

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Integrated-optic tunable OFDM signal demultiplexer with small loss variation characteristics	Photonics West 2018	2018年1月