

可変容量光 OFDM 信号用波長選択スイッチに関する研究

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

図1に示すように、現在の波長分割多重による固定グリッド・ポーレート光ネットワークと異なり、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を削減し、トラヒック、伝送距離の変動に応じてチャンネル数、各チャンネルのポーレート・変調フォーマットを自在に変化させることによって必要最小限の帯域を使用し、ネットワーク資源を節約する[1]。図2に示す光直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM、簡単のためチャンネル数4の場合を例示) は、互いに直交する複数のサブキャリアチャンネルをチャンネルポーレート間隔で高密度に周波数分割多重する (周波数利用効率: 1 baud/Hz) [2]-[7]。そのため、適応型光ネットワークでのガードバンド削減に適する[8]-[10]。

適応型光ネットワークで使用される可能性のある可変容量光 OFDM 信号の処理に関して、受信側での単純なチャンネル分離から、ノードで使用される、複数経路に任意チャンネルの組合せを出力する波長選択スイッチ (Wavelength Selective Switch: WSS) を全光型で実現する段階に進展させ、適応型光ネットワークの進展に資することは重要である。本研究では、拡張性に優れ小型・安定・低消費電力の集積光回路を用いることによって、可変容量範囲 20~100 Gbaud 程度の光 OFDM 信号を処理可能な全光型 1 x 2 (1 入力 2 出力) WSS の実現を目指した。

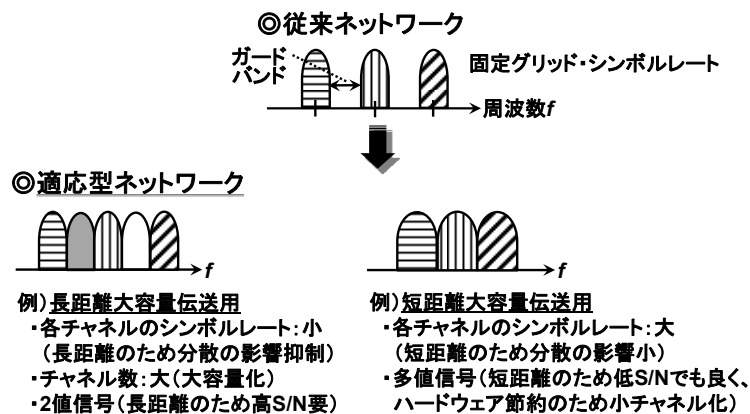


図1 光ネットワークの進展

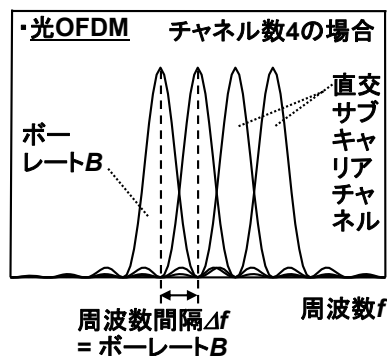


図2 光 OFDM

2 研究内容

2-1 研究方法

研究期間内に、可変容量光 OFDM 信号用波長選択スイッチ (WSS) 用光回路に関して、(1)最適構成設計・作製、(2)特性・波長スイッチング実験評価系の構築、(3)特性評価・波長スイッチング実験を行った。また、成果の外部発表を行った。(3)の内、波長スイッチング実験については現在も継続中である。

上記の研究項目(1)に関しては、当初予定していた窒化シリコン光導波路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、窒化シリコン光導波路あるいはシリコン光導波路を用いる場合には、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あったためである。加えてシリコン光導波路を用いる場合には、損失特性も増加する可能性があったためである。従って、サイズ、消費電力特性の増加が生じるが、最重要性能の光学特性(クロストーク、損失)を優先して石英光導波路(比屈折率差 Δ : 1.5%)を使用することとした。光回路は、2つのスラブ型スターカプラ、ゲート光スイッチアレイ、遅延線アレイから構成される(チャンネル数可変範囲 2~10、チャンネル毎のポーレート可変範囲 10~50 Gbaud、総可変容量範囲 20~100 Gbaud の 1 x 2 波長スイッチング性能)。

研究項目(2)については、分解能 1 GHz 程度で WSS 用光回路の周波数特性を測定でき、チャンネルあたり 20 Gbaud までの QPSK (Quadrature Phase Shift Keying: 4 位相偏移変調) 信号の評価が可能な測定評価系を構築した。

研究項目(3)に関しては、WSS 光回路の特性評価、および光回路を用いた波長スイッチング実験を主に実施した。光回路の機能を検証するため、光回路の 1 入力・多出力、多入力・1 出力の特性を評価した。OFDM 信号のシリアル/パラレル変換用遅延線アレイにおいて、隣接遅延線長差より時間的コヒーレンス長の短い低コヒーレンス光源(光ファイバ増幅器の自然放出光)を用いることによって、特性可変用ゲート光スイッチの特性把握を行った後、その情報と高コヒーレンス光源(半導体レーザ)を用いることによって遅延線部の位相シフト量を最適値に調節した。光スイッチがオンの遅延線のみ光が通過し、この使用遅延線数がチャンネル数に相当する。使用遅延線の長さの差が光回路の FSR (Free Spectral Range) を決める。全 10 個の遅延線を用いる場合、10 ch x 10 Gbaud 用の光回路を実現できる。使用遅延線の数を変化させることによって、可変光 OFDM 信号 (2~10 ch、10~50 Gbaud) の処理に必要な特性が得られた。

2-2 研究成果

OFDM 信号のチャンネル分離には、フーリエ変換が必要である[8]。これまで、光フーリエ変換回路構成の 1 入力多出力型の光フィルタを用いて、光領域直接で光 OFDM 信号のチャンネル分離を行ってきた[7], [9], [10]。今回、可変光 OFDM 信号の WSS 用として、多入力・多出力ポートの集積型光フィルタを設計、作製した。その構成を図 3 に示す。 Δ 1.5%の石英導波路を用いて作製し、サイズは 20 x 40 mm²である。2 個の 20 x 20 スラブスターカプラ、10 個のマッハツェンダ干渉計型光スイッチ、10 本の導波路遅延線アレイ(隣接遅延線長差 ΔL : 2.07 mm) から構成される。入力ポート後のスターカプラはスプリッタ、出力ポート前のスターカプラは光 OFDM 信号分離用の光 DFT (Discrete Fourier Transform) 回路として動作する[7]。スターカプラの半径、隣接導波路間のピッチは、それぞれ 1.5 mm、12.6 μ m に設定した。遅延線アレイ部では、後段の光 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。遅延線上には位相誤差補正用の熱学位相シフトが設置されている。使用遅延線の本数、長さの差が、それぞれフィルタの処理可能チャンネル数、FSR を決めるため、スイッチで使用遅延線を選択することによってフィルタの特性を変化させることができる。全遅延線を使用した場合、10 ch x 10 Gbaud の光 OFDM 信号を処理することができる。

図 4, 5 に光 OFDM フィルタの透過特性の測定結果を示す。隣接遅延線長差よりコヒーレンス長の短い低コヒーレンス光源(光ファイバ増幅器の自然放出光)を用いてスイッチの特性調整を行った後、その情報と高コヒーレンス光源(半導体レーザ)を用いて遅延線の位相シフト量を最適値に調節した [11]。機能を検証するために、1 入力(入力ポート No. 10)・多出力 [図 4]、多入力・1 出力(出力ポート No. 11) [図 5] の特性を評価した。(1)、(2)、(3)、(4)、(5)はそれぞれ、オンのスイッチが全て (10 ch x 10 Gbaud 光 OFDM 信号処理用)、S4-8 (5 ch x 20 Gbaud 処理用)、S5, 6 (2 ch x 50 Gbaud 処理用)、奇数番号のスイッチ (5 ch x 10 Gbaud 処理用)、S3, 8 (2 ch x 10 Gbaud 処理用) の場合の特性を示す。全特性において、各チャンネルの中心波長で他チャンネルの特性が消光し、所望チャンネルポーレートに等しい周波数間隔の特性が得られ、可変光 OFDM 信号 (2~10 ch、10~50 Gbaud) の処理に必要な特性が得られていることがわかる。特性可変に伴うフ

ファイバ・ファイバ間の損失が 8.2~19.5 dB と大きく変動したのは、スプリッタで等分配した光をゲート光スイッチで選択することによって可変特性を実現しているためである。スプリッタとスイッチ部分をマトリクス光スイッチ[12]に置き換えることによって、損失変動を低減できる。現在、当初の目標（実際の光 OFDM 信号を用いた、総可変容量範囲 20~100 Gbaud の 1 x 2 波長スイッチング）を達成できるように研究を継続している。

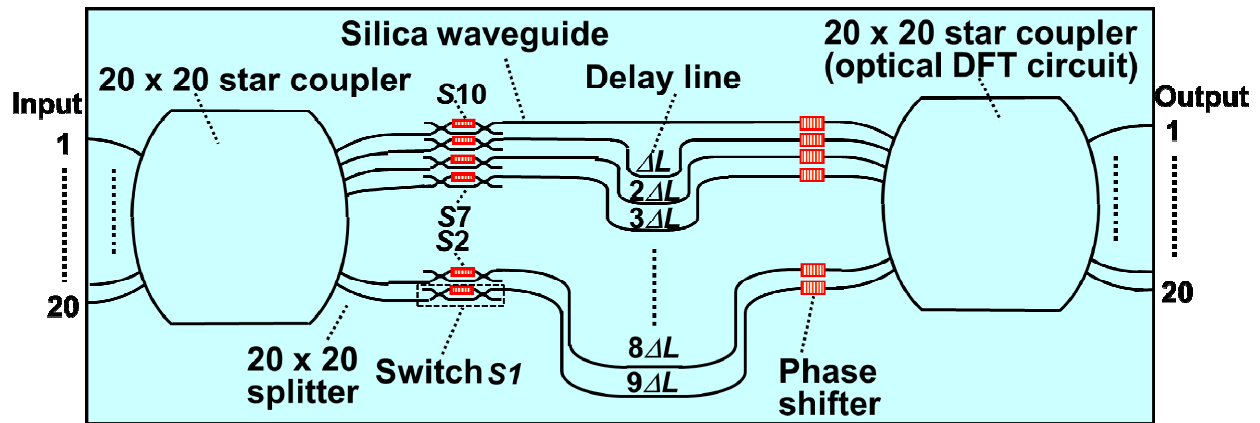


図3 多入力・多出力ポートの集積型光 OFDM 用フィルタの構成

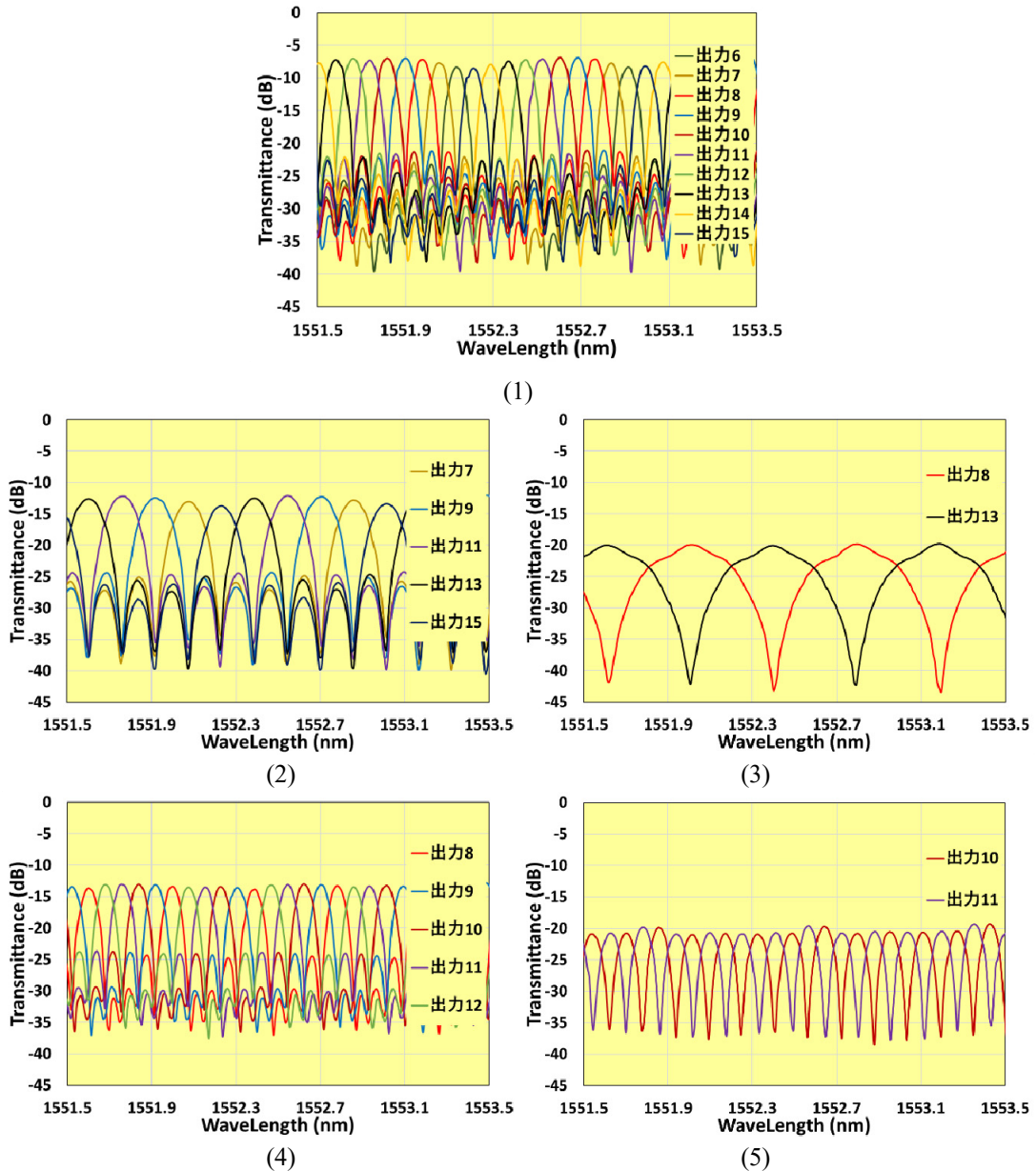


図4 光 OFDM フィルタの透過特性 (1 入力・多出力)

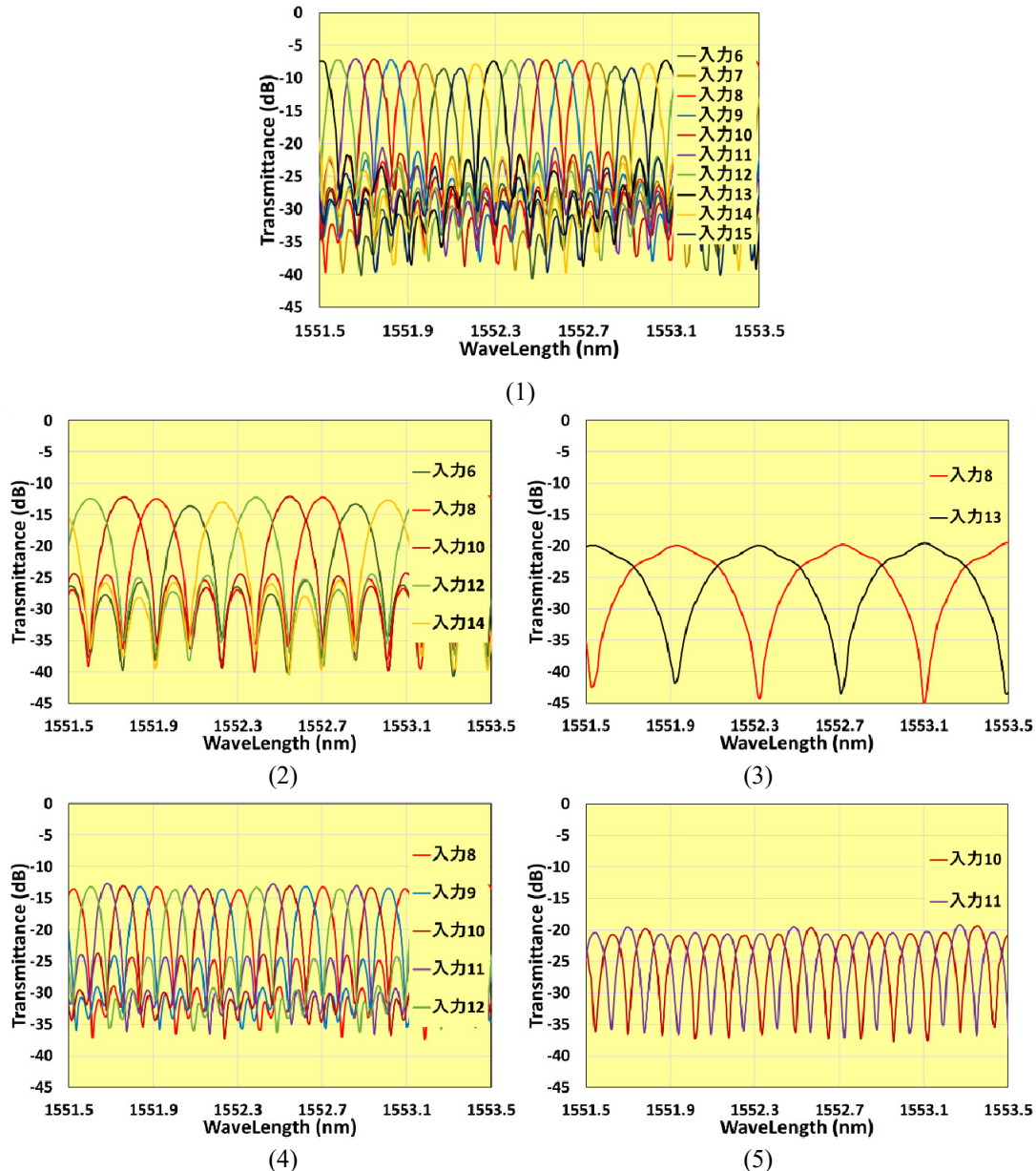


図5 光 OFDM フィルタの透過特性 (多入力・1 出力)

2-3 今後の展開

本研究内容の終了後は、さらに高機能・大規模な $1 \times N \cdot N \times N$ 可変容量 WSS、応答速度 μs 以下の高速スイッチングが可能な可変容量 WSS 実現に向けた検討に移行する。

本研究によって、ネットワーク資源を有効利用可能な適応型光ネットワークの進展に光回路面から貢献できる。長期的には、ストレスなく情報を扱えるユビキタス社会、持続可能な脱炭素社会の実現に資するため、学術・社会的意義は大きい。

3 まとめ

本研究では、可変容量範囲 20~100 Gbaud 程度の光 OFDM 信号を処理可能な、集積光回路型 1×2 WSS の実現を目指した。WSS 用の多入力・多出力ポートの集積型光フィルタを実現し、可変光 OFDM 信号 (2~10 ch、10~50 Gbaud) の処理に必要な特性が得られた。

【参考文献】

- [1] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. B. Yoo, “Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. S12-S20, Feb. 2012.
- [2] 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,” *OFC (Optical Fiber Communication Conference) 2002*, paper ThD1, Anaheim, USA, Mar. 2002.
- [3] W. Shieh, “OFDM for adaptive ultra high-speed optical networks,” *OFC 2010*, paper OWO1, San Diego, USA, Mar. 2010.
- [4] 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.
- [5] S. L. Jansen, “Multi-carrier approaches for next-generation transmission: why, where and how?,” *OFC 2012*, paper OTh1B.1, Los Angeles, USA, Mar. 2012.
- [6] X. Liu and S. Chandrasekhar, “Superchannel for next-generation optical networks,” *OFC 2014*, paper WIH.5, San Francisco, USA, Mar. 2014.
- [7] K. Takiguchi, T. Kitoh, M. Oguma, A. Mori, and H. Takahashi, “Integrated-optic demultiplexers for optical OFDM signals,” *OFC 2011*, paper OWM4, Los Angeles, USA, Mar. 2011.
- [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] K. Takiguchi and H. Masaki, “Gate-free integrated-optic tunable filter for demultiplexing various capacity optical OFDM signals,” *OSA Continuum*, vol. 4, no. 8, pp. 2319-2329, Aug. 2021.
- [11] K. Takiguchi, S. Suzuki, and T. Shibata, “Method for adjusting lattice-form optical devices and its use in realizing low-loss variable chromatic dispersion compensator,” *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 4, pp. 355-356, Feb. 2003.
- [12] T. Goh, M. Yasu, K. Hattori, A. Himeno, M. Okuno, and Y. Ohmori, “Low loss and high extinction ratio strictly nonblocking 16 x 16 thermo-optic matrix switch on 6-in wafer using silica-based planar lightwave circuit technology,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 371-379, Mar. 2001.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Integrated-optic chromatic dispersion slope compensator with wide operational bandwidth	<i>Optics + Photonics</i> 2023	2023年8月
Fully passive integrated-optic chromatic dispersion compensator and its use to PAM4 signal compensation	<i>Optical Fiber Communication Conference (OFC)</i> 2023	2023年3月
Integrated-optic chromatic dispersion compensator composed of arrayed-waveguide gratings and delay lines	<i>Photonics West</i> 2023	2023年1月
Integrated-optic signal cipher circuit using two-dimensional code	<i>OptoElectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC)</i> 2022	2022年7月
光 OFDM 信号アド/ドロップマルチプレクサ用多入出力集積型光フィルタ	電子情報通信学会総合大会	2023年3月
光ゲートを除去した集積型光フーリエ変換回路を用いた光 OFDM 信号分離実験 (II)	電気関係学会関西連合大会	2022年11月
時間・波長領域 2 次元符号化用の集積型光信号暗号化回路	電気関係学会関西連合大会	2022年11月