

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04366

研究課題名(和文)モード分割多重伝送における体積ホログラムを用いたモード交換技術

研究課題名(英文) Mode-exchange technology using volume holograms in mode-division multiplexing

研究代表者

岡本 淳 (OKAMOTO, ATSUSHI)

北海道大学・情報科学研究所・准教授

研究者番号：40224068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：1チップのホログラム素子により、同時並行的に空間モードを交換する方法論の提案とその理論的および実験的検証を行った。モード間クロストークの低減手法を新たに確立し、ホログラム素子の性能向上を実現した。次に、ホログラム素子と空間光変調器を組み合わせることで、可変的なモード交換が可能であることを示し、空間光変調器に表示する信号を工夫することで、性能を改善する手法を開発した。これらの成果は、光システム構成の新たな手法を提示・検証した点において学術的意義が高い。また、光通信技術の高度化に貢献する点で社会的意義が高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モード交換素子の性能評価指数であるモード間クロストークを改善する新たな方法として、信号光に位相板による空間変調を加えて、強度分布を変化させる方法を提案した。結果として、モード間クロストークが大きく改善されることを示した点に大きな意義がある。また、ホログラム素子と空間光変調器の組み合わせによって、可変的なモード交換が可能であることを示したことは、重要な実験結果であり、学術的意義が高い。さらに、これらの成果は、光通信技術の高度化に貢献する点で社会的意義が高い。

研究成果の概要(英文)：A methodology for simultaneous spatial mode exchange by a single-chip hologram element was proposed and theoretically and experimentally investigated. A new method for reducing inter-mode crosstalk was established to improve the performance of the hologram element. Next, we showed that variable mode exchange is possible by adding a spatial light modulator, and developed a method to improve the performance by changing the signal to be displayed on the spatial light modulator. These results have high academic significance in that they present and verify a new method of optical system configuration. They also have high social significance in that they contribute to the advancement of optical communication technology.

研究分野：光電子工学

キーワード：光通信工学 ホログラム 空間光変調器 モード分割多重通信

1. 研究開始当初の背景

通信トラフィックの増大に対応するため、最近では高密度空間分割多重(DSDM)を適用した伝送技術が検討されている[宮本・川村, NTT 技法ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.8-12 (2017)]。その中でも、MPLC (Multi-Plane Light Conversion) [Philippe Genevaux et al., OFC 2015, W1A.5]を用いた実用レベルのモード分離器が製品化されるなど、空間モード伝送技術は注目度が極めて高い。MDM 伝送における計算コスト低減に向けて、群速度が速いモードと遅いモードを伝送途中で交換するモード交換技術が提案されている[Y. Wakayama et al., OFC 2016, M3E.6]。しかし、この技術では、交換の前後にモードの合分波を行う必要があり、システムの規模やコストの増大が問題となっている。このため、本応募研究の進展によって、多重ホログラム素子により簡易・低価格な構成でのモード交換が実現すれば、MDM 伝送の大幅な高性能化が期待できると考えた。一方、今後、SDN(Software Defined Networking)などの進展に伴い、単純に通信容量の増大だけでなく、DSDM においてより柔軟にネットワークを制御することが不可欠になると予測されている。このため、最近では、空間モード独立で切替が可能な波長クロスコネクットの検討が進められている。例えば、SPOC(Spatial and Planar Optical Circuit)プラットフォームによる複数 WSS の集積例が報告されている[K. Suzuki et al., IEEE J. Lightwave Technol., Vol.35, pp.596-606 (2016)]。しかし、現状では、MCF(Multi-Core Fiber)での各コアに対するクロスコネクットが検討されているに留まり、各コア内の空間モードを独立かつ可変的に交換できるシステムは存在しない。このような状況下において、応募者は、時代にさきがけて、MCF の各コア内の空間モードを独立かつ可変的に交換できる独自の技術を立ち上げるための先進的研究を行おうとしたものである。

2. 研究の目的

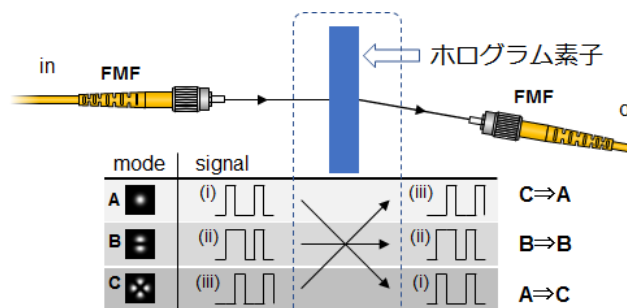
本研究では、ファイバ中を多重化されて伝搬する複数の空間モードを自在に交換することのできるモード交換機能(多重化された空間モードの相互変換)を如何にして実現できるかについての答えを、多重体積ホログラムをベースとした独自の方法から検討し、次世代通信システム構築に関する新知見を得ることを全体目的とする。具体的目標としては、以下の2点となる。

1. モード交換機能の実現により、群速度が速いモードと遅いモードを伝送途中で容易に交換することを可能とし、DMD(Differential Mode Delay)の大幅低減により、MDM 伝送の高性能化ならびに小型化・低価格化を実現につながる新技術を創出すること。その実現に向けて、ホログラムチップの多重化機能に着目し、簡易かつシンプルな構成により空間モード交換を実現すること。
2. 将来の光伝送基盤ネットワークへの高密度空間分割多重(DSDM)の適用において不可欠となる、従来の WSS(波長選択スイッチ)に代わる空間モードでのスイッチングエンジンを提供すること。こちらは可変的なモード交換を実現する必要があるため、多重化ホログラムチップと SLM(Spatial Light Modulator)の組み合わせによる柔軟なモード交換技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

前記した研究目的を実現するために、以下に示す A,B 二つの研究を実施した。

- A. 図に示すように、1チップのホログラム素子により、同時並行的に空間モードを交換する方法論の提案とその理論的・実験的検証を行う。特に、中核となるホログラムの構成条件を、物理的およびシステムの観点の両面から検討し、ホログラムモード変換素子の実現法を明らかにする。



多重ホログラムによる交換器の基本構成

- B. 前記Aの結果を踏まえ、ホログラム素子とSLMを組み合わせることで、如何にして可変的なモード交換を実現するのか、その方法論の提案とその理論的・実験的検証を行う。

4. 研究成果

- (1) 1チップのホログラム素子により、同時並行的に空間モードを交換する方法論の提案とその理論的検証を行った。特に、中核となるホログラムの構成条件を、物理的およびシステムの観点の両面から検討し、ホログラムモード変換素子の実現法を明らかにすることは、本研究目的を達成する上で重要性が高い。具体的には、信号に含まれる特定の空間モード成分を、他の空間モード成分に影響を与えずに、異なる空間モードに変換するホログラム記録法を提案した。従来のホログラム記録とは異なり、強度分布の偏りなどを考慮して、最適なホログラム記録条件を、ホログラム記録媒質内の3次元光伝搬解析により明らかにした。さらに、モード交換素子の性能評価指数であるモード間クロストークを評価し、これを改善する新たな方法として、信号光に位相版による空間変調を加えて、強度分布を変化させる方法を提案した。結果として、モード間クロストークが大きく改善されることを示した。
- (2) ホログラム素子と空間光変調器を組み合わせることで、如何にして可変的なモード交換を実現するのか、その方法論の提案と基礎的な実験を行った。具体的には、信号光をホログラム素子で分離した後に、空間光変調器に与え、変調パターンの電子的な制御により、信号光の出射回折角の変更が可能であることを実験的に確認した。本実験は、ホログラム素子と空間光変調器の組み合わせによって、可変的なモード交換が可能であることを示す上で、重要な基礎実験であり、学術的な意義が高い。
- (3) ホログラム素子におけるクロストーク低減に向けて、体積ホログラムとランダム拡散板を組み合わせた空間モード交換技術を考案した。また、提案方式の基本動作を、モード分割多重システムにおける数モードファイバに結合したクロストーク成分を考慮して検証した。シミュレーションの結果、ランダム拡散板の最適な拡散角を明らかにし、最大クロストークが-15.8dBまで抑制できることを確認した。これらの結果は、ランダム拡散板を用いて信号光の強度分布を一樣に散乱させることで、対象外のホログラムの影響を低減し、高い交換性能を得ることができることを示した点で学術的な意義が高い。
- (4) ホログラム素子と空間光変調器を組み合わせることで、可変的なモード交換を実現する方法に関して、(2)の発展的な研究として、まず、空間光変調器に逆畳み込み法により求めた位相を表示し、ホログラム回折において散逸したパワーを回収することをシミュレーションにより試みた。その結果、SMFに対して最大1.72dBの結合パワー向上がみられ、信号パワーの補償が行えることを明らかにした。
- (5) (4)の手法の適用には高解像度のSLMが必要であるためコスト面で劣る。本研究では補償波面の解像度耐性を評価することにより、当初設定の1/8の解像度でも十分な補償動作が見込めることを明らかにした。(4)-(5)の結果は、ホログラム素子と空間光変調器の組み合わせによって、可変的なモード交換を行う場合に、空間光変調器に補正用の信号を付加することで、モード交換の大幅な性能向上を可能にする点で大きな意義を有する。
- (6) 前記(2)-(4)の結果を踏まえ、ホログラム素子の性能向上に関する実験を進めた。具体的には、従来の2倍の厚さ1mmを有するホログラム材料を用い、露光量と回折効率の関係を実験的に明らかにした。厚さ1mmの材料においては、露光量の大幅な拡大が可能であり、その結果として、50%以上の回折効率を実現できることを示した。
- (7) (6)に続き、ホログラム記録後の後露光時間と回折効率との関係性を実験的に明らかにした。3種類の空間モードLP01, LP11a, LP11bを厚さ1mmの記録媒質に角度多重記録を行い、後露光量を変化させながら、異波長法により波長1550nmの読み出し光を照射し、回折光強度の時間変化を測定した。その結果、露光量15mJ/cm²、露光量18mJ/cm²の場合においては約600秒、露光量20mJ/cm²の場合においては約400秒の後露光で回折効率が最大値を取ることが明らかになった。これらの結果は、モード交換機に用いるホログラム素子の性能向上を可能にする点で、大きな意義を有する。
- (8) 前記(2)に示すSLMによる基礎実験の結果を踏まえて、複数コアの光信号を一括して経路制御するための、マルチコア・マルチモード・ジョイントスイッチの実証実験を行った。実験を行った結果、6モード19コアの信号経路を、SLMの制御によって、異なる出力ポートに同時に切り替えることに成功した。また、マルチコア・マルチモードファイバから出射される空間モードフィールドパターンが、ポートの切り替え後にも保持されていることを確認した。特に、出力ポートの空間配置を工夫することによって、最大ポートクロストークが-11.6dBから-25.1dBに減少することを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shuanglu Zhang, Atsushi Okamoto, Yuta Abe, Ryo Watanabe, Akihisa Tomita, Daiki Soma, Yuta Wakayama	4. 巻 29
2. 論文標題 Spatial-light-modulator-based optical-fiber joint switch for few-mode multicore fibers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 39096-39106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.443033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shuanglu Zhang, Atsushi Okamoto, Taijun Shiba, Hotaka Hayashi, Kazuhisa Ogawa, Akihisa Tomita, Taketoshi Takahata, Satoshi Shinada, Yuta Goto, Naoya Wada	4. 巻 28
2. 論文標題 Spatial mode exchange technique using volume holograms with a random optical diffuser for reduction of crosstalk	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 181-189
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-021-00648-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hotaka Hayashi, Atsushi Okamoto, Tomohiro Maeda, Taijun Shiba, Kazuhisa Ogawa, Akihisa Tomita, Taketoshi Takahata, Satoshi Shinada, Yuta Goto, and Naoya Wada	4. 巻 11309
2. 論文標題 Mode-selective switch for ROADMs using volume holograms and spatial light modulator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE Photonics West 2020 (PW2020)	6. 最初と最後の頁 1130908(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2544685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuya Kuroda
2. 発表標題 Improvement in diffraction efficiency of volume holographic mode de-multiplexer with dual wavelength method by using thick medium
3. 学会等名 31th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (ISOM '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Okamoto
2. 発表標題 Complex Amplitude Control Technology for Mode-Multiplexing Optical Communication
3. 学会等名 12th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒田裕也
2. 発表標題 体積ホログラムの記録時における後露光時間の変化が回折効率に与える影響
3. 学会等名 映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhang Shuanglu
2. 発表標題 Improving the reconstruction quality of spatial mode exchange technique by adjusting the diffusion angle of diffuser
3. 学会等名 30th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (ISOM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 穂高
2. 発表標題 体積ホログラム分波器の出力信号の波面補償方法
3. 学会等名 光通信システム研究会11月研究会 (OCS研究会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 穂高
2. 発表標題 体積ホログラム分波器における補償波面の解像度に対する特性
3. 学会等名 光通信システム研究会1月研究会 (OCS研究会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuanglu Zhang
2. 発表標題 Spatial Mode Exchange Technique Using Volume Hologram with a Phase Plate
3. 学会等名 29th International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (ISOM '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 穂高
2. 発表標題 体積ホログラムを用いたモード選択スイッチの基礎実験
3. 学会等名 令和元年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 モード選択スイッチ	発明者 岡本 淳, 前田 智弘, 柴 泰純, 高畠 武敏, 品田 聡, 和田	権利者 北海道大学、情報通信研究機構、株式会社才
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-125212	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------