

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06050

研究課題名(和文) 多値光変調信号の品質劣化を補償する偏光マニピュレーションの提案と実証

研究課題名(英文) Polarization manipulation for quality compensation of deteriorated advanced-modulation-format lightwave

研究代表者

千葉 明人 (Chiba, Akito)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：30435789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、変調を施した光波に残留する搬送波を抑圧する手法に関するものである。変調信号を重畳した光波・無変調の光波の偏光を互いに直交させて合波し、搬送波の偏光のみを選択的に操作する。提案手法により、変調された光波に含まれるキャリアを20dB以上抑圧した。またこの手法に双方向光変調を適用し、低次の光サイドバンドを抑圧する手法に発展させた。32dB以上の抑圧および、フィードバック制御を用いることなくこの状態を8時間以上持続させることに成功した。この知見をまとめた論文は、掲載号巻頭記事" in Brief"にて論文誌編集者による紹介をうけるとともに、その後2件の国際会議招待講演に繋がっている。

研究成果の概要(英文)：In this project, we developed a technique to suppress a residual carrier component within the modulated lightwave. By combining the linearly-polarized modulation lightwave with the unmodulated lightwave in perpendicular polarization, only polarization of the carrier can be selectively manipulated. Using the proposed technique, we achieved 20-dB suppression of parasitic carrier in a modulation lightwave. Also, this technique is further developed to suppress low-order optical sidebands, by applying bidirectional optical modulation into counterpropagating lightwaves. By the developed technique, we succeeded in suppressing the undesired sidebands with the degree of more than 32 dB during more than 8 hours. The paper reporting this scheme and the result is highlighted at "in Brief" on the beginning of the issue, and leads to two invited talks at international conferences.

研究分野：光工学

キーワード：偏光マニピュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

携帯端末の普及に伴い、ネットワークを経由する情報伝送量は年々莫大な増加が続いている。これを支えるものとして、光の特長やパラメータの総活用による通信方式が多々提案されている。一度の変調で複数ビットを重畳する光信号の変復調（多値光変復調）は、その一つである。変調信号の電気帯域の増加を抑えてビットレートを増大できる。同じ変調レートで比較すると、従来のデジタル光変調（オンオフキーイング：OOK）に比べて、占有周波数帯域の増大が生じない。これに因り、周波数利用効率の増大ならびに分散耐性の向上が期待できる。現在では、光の同相成分・直交成分に複数のビットを重畳した信号の生成・伝送も示されている。これは光直交振幅変調（QAM）と呼ばれ、原理上搬送波成分を有しない変調方式のひとつとしても知られている。

しかし実際には、高周波領域における光消光比の劣化等により、いわゆる「漏れ光」として搬送波成分が重畳する懸念がある。この影響は、局部発振源の位相ずれや伝送路中の非線形光学効果・光/電気変換における非線形性や飽和など複合的な過程を経て所要光信号/雑音比（誤り率）の増大をもたらし、多値度の増大に伴い顕著となる。そのため搬送波成分の効果的な除去を実現する手法は有用なものとなり得る。適応フィルタリング等の受信後処理に基づくアプローチも検討されているが、現時点では相応の処理時間を要するため、その実時間動作はハードルの高い課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、変調を施した光波に残留する搬送波を抑圧する手法を提案し、その実証を目指した。光の高速変調にあたって不可欠となる進行波型電極構造の特長を利用する。進行波型電極に高周波信号を入力して電気光学効果を誘起し、光波を伝搬させると、光波は変調される。その変調度は光/電気信号間の速度整合（相対的な伝搬方向）に依存する。そのため、結晶内に光を互いに逆方向に伝搬させると、一方の光波のみに変調信号が重畳され、もう一方は無変調（搬送波のまま）となる。両者の偏光を直交させて合波し、搬送波の偏光のみを選択的に操作するという着想が基本となる。

2光波の偏光を直交させた合波は、偏光回転操作を具備する偏光保持サニャック干渉計を利用する事により可能で、研究代表者

が独自に見出したものである。その構成を図1に示す。この構成を利用すると、出力光に偏光子を通すことにより、搬送波の成分のみを選択的に抑圧する事が可能となる。

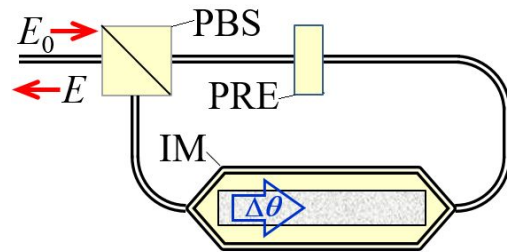


図1 光変調デバイスにアームを含む偏光保持サニャック干渉計。入力光  $E_0$  を斜め直線偏光とすると、光波は PBS（偏光ビームスプリッタ）で2分され、それぞれ反時計回り・時計回りに伝搬する。光を変調する信号を IM（光変調器）の左から右に伝搬させると、反時計回りに伝搬する光波のみに変調がかかる。IMを伝搬する光波の偏光は、PRE（偏光回転素子）の作用により、伝搬方向によらずに共通となることに注意。反時計回りに伝搬する光波が残留搬送波成分を含む場合でも、時計回り伝搬光との合波により得られる出力光  $E$  を偏光子に通すと、残留搬送波のみをカットする事が可能。

### 3. 研究の方法

提案手法の有用性の実証に向けてまず、モデルを構築し、アナログ光変調における定量的な評価および最適動作条件の検討を進めた。アナログ光変調を対象としたのは、そのスペクトルが離散的なものとなり、残留搬送波と所望の光周波数成分とを容易に区別できる点に因る。また提案する光学系のプロトタイプを構築した。この際、構築した光学系の動作を安定的に得るべく、光学系のドリフトを補償するフィードバック系等の構成をも視野に入れた。そして構築した光学系により、デジタル光変調信号に対する検討も進め、提案手法の妥当性の実証を試みた。

### 4. 研究成果

まず、構築したモデルによる解析を進めた。その結果、無変調のままとする光波に対して、変調がかかる光波の強度比を2.6以上とするように入力光の偏光を調整すると、変調度が2.3-2.95の範囲に於いて所望の変調成分の振幅を大きくとれ、相応のキャリア抑圧も得られることを確認した。

この結果を踏まえて、実験的検討を進めた。研究代表者が保有する外部共振器型半導体レーザを光源として用い、残留キャリアの抑圧比を、主に光周波数領域に於いて評価した。その結果、提案手法により、変調された光波

に含まれるキャリアを 20dB 以上抑圧できる事を実験により裏付け、所望の変調成分に対して -25dB 以下に抑えることに成功した。

上述の実験的検討を経て、低次の光サイドバンドをも安定して抑圧できる着想も派生的に見出した。具体的には、偏光保持サニャック干渉計を伝搬する光波の両方に、異なる強さでかつ逆相の変調を加える。垂直・水平成分の振幅が同じ直線偏光を入力光とすると

$$J_1(\Delta\theta) = J_1(|\eta|\Delta\theta) \quad (1)$$

が満たされる時、 $\pm 1$  次光側帯波の偏光方向が入力光に対して直交する。但し  $\Delta\theta$ ,  $\eta\Delta\theta$  はそれぞれ、反時計回りの光波に対する変調度・時計回りの光波に対する変調度である。また  $\eta$  は -1 以上 0 以下で、RF 信号の位相反転を負号として含んでいる。この着想を裏付けるべく、偏光子で抑圧した  $\pm 1$  次光側帯波強度の時間変化を実験的に検討した。その結果、32dB 以上の抑圧を実証するとともに、フィードバック制御を用いることなく、この状態を 8 時間以上持続させることに成功した。その結果を図 2 に示す。この成果により、当初予定していた「光学系の更なる安定動作の確保」も、提案手法の実証に於いて十分な程度

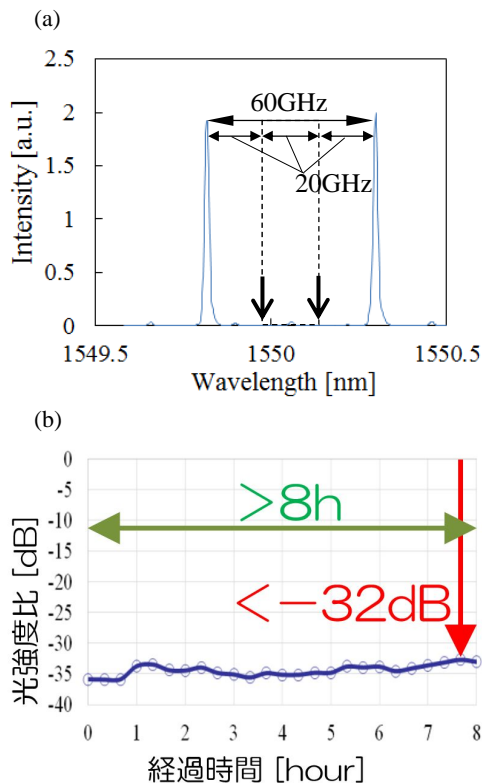


図 2 (a)提案手法により生成した光 2 トーン信号の光スペクトルおよび(b)提案手法により抑圧された光周波数成分(図 2(a)の下向き矢印)の光強度の時間変化。

達成されたと言える。更に、偏光子を利用するメリットの一つとなり得る、中心波長可変性についても検討した。MZM の駆動条件を 1550nm の光波に対して設定した後、光源の波長を掃引し、 $\pm 1$  次光側帯波の光強度を測定した。光源の波長変動に伴う MZM のバイアス点変動により、入力光波長が 1550nm から離れると、抑圧比が若干減少したものの、 $\pm 10$ nm の波長変動に対しても 24dB 以上  $\pm 1$  次光側帯波を抑圧できた。以上の通り、低次の光サイドバンドに対しても、本提案手法の拡張により実験・モデル解析の両面から実証できた。この成果を公表した論文は掲載号巻頭の記事"in brief"にて論文誌編集者による紹介を受け、その後 2 件の招待講演に繋がった(うち 1 件は平成 30 年夏に発表予定)。この点からも、相応のインパクトを与える成果である事が裏付けられたものと言える。

上述の知見を踏まえて、デジタル光変調信号に対する搬送波成分の除去を試みた。本手法における対象は主に光位相変調信号となるが、準備できたデバイスの都合に加えて提案手法の原理実証という観点にたち、OOK とした。偏光保持サニャック干渉計への入力光は  $45^\circ$  の直線偏光に調整した。偏光保持サニャック干渉計の光出力を偏光子を通して、EDFA・光バンドパスフィルタを介し、光強度の時間波形を光サンプリングオシロスコープで測定した。その結果、偏光子角度の適切な調整を経て、偏光保持サニャック干渉計の反時計回り伝搬光に起因する、明瞭なアイ開口を有するアイパターンを確認した。またこの状態から偏光子を  $90^\circ$  回転させると、アイが閉じ無変調となる時間波形を確認できたものの、変調信号のクロックと非同期のランダムな光強度揺らぎが重畳し、端面反射の影響等が原因として考えられる。更に、偏光子を回転させると、上記の 2 波形が重みづけされて重畳された波形を観測できた。これらの事から、変調信号に重畳させる搬送波を適切に準備する事により、デジタル光変調信号の搬送波成分についても選択的な偏光回転を経た抑圧が得られる事を示唆できたものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. A. Chiba, et al. (他 2 名), Optical two-tone signal generation without use of optical filter for photonics-assisted

- radio frequency quadrupling, *Optics Letters* **40** (15), pp.3651-3654 (2015). 査読有.
2. A. Chiba, et al. (他 2 名), RF frequency sextupling via an optical two-tone signal generated from two modulation lightwaves from one Mach-Zehnder optical modulator, *Optics Express* **23** (20), pp.26259-26267 (2015). 査読有.
  3. A. Chiba, et al. (他 2 名), Long-term stable 60-GHz optical two-tone signal by destructive optical interference obtained from RF phase adjustment, *Electronics Letters* **52** (9), pp.736-738 (2016). 査読有.
  4. 千葉 明人, 光側帯波に対する偏光マニピュレーションに基づく光 2 トーン信号の安定生成とその波長無依存動作(解説), *TELECOM FRONTIER* **91**, pp.1-8 (2016) 査読有.
  5. T. Sakamoto and A. Chiba, Multiple-frequency-spaced flat optical comb generation using a multiple-parallel phase modulator, *Optics Letters* **42**, pp. 4462-4465(2017). 査読有.
- [学会発表](計 13 件)
1. A. Chiba, et al.(他 2 名), RF Frequency Sextupling Utilizing a Single Mach-Zehnder Optical Modulator possessing external-load RF terminals, *CLEO/IQEC 2016*, 2016 年 6 月 10 日, San Jose, California, U.S.A., June (2016).
  2. 千葉他(他 2 名), 偏光操作を用いる光 2 トーン信号生成における安定性の向上, 第 63 回応用物理学関係連合講演会, 2016 年 3 月 21 日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区).
  3. 赤松, 千葉他(他 1 名), 変調度が異なる光波の合成と偏光操作により抽出された高次光側帯波の評価, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2016 年 1 月 29 日, 神戸市産業振興センター(兵庫県神戸市).
  4. A. Chiba, et al. (他 2 名), Wavelength-independent optical two-tone signal generator composed of one single Mach-Zehnder optical modulator and a polarizer, 2016 IEEE Photonics Conference, 2016 年 10 月 4 日, Waikoloa, U.S.A., October (2016).
  5. A. Chiba, et al.(他 5 名), Generation of Wide Frequency-Spacing Optical Frequency Comb Composed of Odd/Even Multiple Harmonics, *CLEO-PR, OECC & PGC 2017*, 2017 年 8 月 2 日, Singapore, August (2017).
  6. T. Sakamoto and A. Chiba, Even/Odd Mode-Selective Double Frequency-Spaced Optical Comb Generation By Quad-Parallel Phase Modulator, *CLEO-PR, OECC & PGC 2017*, 2017 年 8 月 3 日, Singapore, August (2017).
  7. A. Chiba, et al. (他 2 名), Phase measurement of high-frequency RF signal using optical phase modulation and frequency down conversion by photo mixing, The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24), 2017 年 8 月 22 日, Shin-juku, Tokyo, Japan, August (2017).
  8. 須長, 千葉他(他 1 名), 2 電極型単一 MZM を用いた光変調による RF 位相計測, *Optics and Photonics Japan 2017 (OPJ2017)*, 2017 年 11 月 1 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京都文京区).
  9. Y. Sunaga, A. Chiba, et al. (他 1 名), Proposal of RF phase measurement utilizing two-electrodes optical phase modulator and low-speed photodiode, *International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2017*, 2017 年 11 月 29 日, Kiryu, Japan, November (2017).
  10. A. Chiba, Optical two-tone signal generation based on bidirectional optical modulation in one polarization mode of polarization-maintaining Sagnac interferometer (invited), *International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2017*, 2017 年 11 月 30 日, Kiryu, Japan, November (2017).
  11. A. Chiba, et al. (他 4 名), Numerical analysis on double frequency-spacing optical comb for optimization of RF signals driving I-Q MZM, *CLEO Pacific Rim 2018*, 2018 年 8 月(発表予定), Hong Kong, August (2018).
  12. T. Sakamoto and A. Chiba, Frequency Spacing and Offset Tunable Multiple-Frequency-Spaced Optical Comb Generation Using Multiple- Parallel Phase Modulator, *CLEO Pacific Rim 2018*, 2018 年 8 月(発表予定), Hong Kong, August (2018).
  13. A. Chiba, et al.(他 2 名), Generation of wide frequency-spacing optical two-tone signal utilizing polarization and optical phase shift induced by RF phase (invited), *Progress in Electromag-*

netics Research Symposium (PIERS)  
2018, 2018 年 8 月(発表予定), Toyama,  
Japan, August (2018).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://takadalab.ei.st.gunma-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

千葉 明人 (Chiba Akito)

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：30435789

### (2) 研究分担者

呂 国偉 (Lu Guo-Wei)

東海大学・創造科学技術研究機構・准教授

研究者番号：30599709

### (3) 連携研究者

なし