

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation



千葉 明人 (Akito CHIBA, Ph. D.)

群馬大学大学院 理工学府 電子情報部門 助教

(Assistant Professor, Faculty of Science and Technology, Gunma University)

応用物理学会 日本光学会 電子情報通信学会 米国光学会 (OSA) 米国電気電子学会フォトニクスソサイエティ (IEEE-PS)

受賞：吉町先生記念賞 (1999 年度)

研究専門分野：光工学

あらまし 光技術と無線技術を相補的に活用する「光一無線融合技術」の検討が進んでいる。この技術では、周波数（波長）差が安定し位相も同期している 2 波長の連続光が必須となる。この連続光のペアは「光 2 トーン (Optical Two-Tone: OTT) 信号」と呼ばれ、本稿ではこの生成について述べる。電気光学光変調器により生成した光側帯波に対して、光の自由度のひとつである「偏光」を操作し、任意の波長に対する光 2 トーン信号の生成を実現した。その基本原理および光学系の実装を提案し、安定動作が得られることを実験的に裏付けた。この手法は光フィルタを要しないため、シンプルな構成で波長や周波数差の可変性が得られるものとして有用性が期待できる。

1. 研究の目的

本研究の目的は、OTT 信号の生成における、波長や周波数差の制約を払拭する手法の開拓である。電気光学光変調器を用いる信号生成の場合、所望の波長成分に付随して生じる不要波長成分の抑圧が具体的課題となる。帯域除去光フィルタを用いると、これは容易に可能であるものの、これが波長や周波数差を制約する元ともなる。そこで、光の自由度のひとつである「偏光」の利用を提案する。異なる変調度で垂直偏光・水平偏光の各々を変調して合波すると、不要となる波長

成分の偏光のみが選択的に傾く。これにより不要波長成分を偏光子で抑圧することができ、これを基本原理とする。偏光子の消光比は広い波長範囲に対して得られるため、波長や光周波数差の可変性を有する OTT 信号生成が実現できる。

2. 研究の背景・動向

近年、無線通信におけるミリ波帯の利活用が加速している。2013 年に標準化された 60GHz 帯無線通信 (IEEE 802.11ad) は、その動向を端的に示している。搬送波周波数が更に上となる 120GHz を利用した非圧縮高精細テレビ (HDTV) のデータ伝送も、北京オリンピックで示されている[1]。

ミリ波帯の通信応用については、1950 年代後半から既に検討されていた。日本発の試みのひとつとして、50GHz 帯のミリ波をキャリアとする、中継区間長 8.4km の 2 中継伝送[2]が知られている。当時の最先端技術を駆使してそのポテンシャルは示されていたものの、この帯域を利活用する試みはその後停滞した。その主な背景として、デバイス開発が発展途上にあった点に加え、次の 2 点に要約できる[3]。

1 点目は「伝送路の課題」である。マイクロ波帯に比べて、ミリ波帯の電波は大気中での減衰を強く受ける。これは導波管により回避できたものの、低い伝搬損失と単一モード動作との両立が困難であった。これが、導波管の接続や曲げに起因するモード変換・逆変換と相まって、電波の干渉による波形歪みをもたらしていた。

2 点目は「代替技術の台頭」である。同時期に発明されたレーザ[4]を端として、伝送路 (光ファイバ) も実現された。その低損失化が急速に進むとともに、半導体レーザや光ファイバ増幅器等の要素技術も揃い、ミリ波帯の電波より 3-4 桁周波数が高い光波をキャリアとする通信の実現に焦点がシフトした。これらを礎とする光ファイバ通信は、現在、基幹通信網のみならず、メトロ・アクセスネットワークの基盤としても不可欠となっている。

最近進んでいるミリ波帯の「返り咲き」は、上述した 2 点の側面から整理できる。前者 (伝送路の課題) については「発想の転換」ともいえる。初期の検討に

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

おける位置づけは「マイクロ波による基幹通信網を代替するもの」で、長距離伝送の実現が求められていた。一方現在は、自由空間を伝搬路として「ケーブルレスで近距離間的高速情報伝送を実現」する点に主眼が置かれている。長距離間や、障害物がある場合の対策が、後者（光ファイバ通信）となる。端末における送受信では無線信号を用い、無線信号を光に重畳して伝送を行う。この形態をとると、既存の光通信網を利用でき、距離や障害物による制約を回避できる。無線端末間を「光通信網で」つなぐこの形態は **Radio over Fiber (RoF)** と呼ばれており、光—無線融合通信の物理的基盤となる。この形態では、大気（水蒸気）による無線信号の減衰を積極的に利用して、電波の送受信エリアを区切る事も可能となり、混信を回避できるメリットもある。

光波に重畳した信号を無線に戻す際には、別の光波とのビートを光検出器（フォトダイオード）で検出する。即ち、無線の搬送波周波数と同じ周波数差を有する2光波が **RoF** では必要となり、各光波の位相も同期している必要がある。この2光波は「光2トーン (Optical Two-Tone: OTT) 信号」と呼ばれている。この **OTT** 信号のうち、一方の波長成分に無線信号を重畳させる事になる。バイナリの変調フォーマットは勿論のこと、近年の多値光変復調^{*1}[5]の進展とも相まった試みもある。**OTT** 信号を構成する一方の波長成分に偏波多重[6]や直交周波数分割多重 (**OFDM**) [7]を併用して、16値直交振幅変調 (**16QAM**) 信号を **W** 帯 (75-110GHz) で伝送した実験は、その一例で、200GHzを超えた搬送波周波数による100Gbit/sのデータ伝送[8]も報告されている。通信のアシストのみならず、レーダ計測[9]や、2013年に運用が開始された広帯域・高空間分解能電波望遠鏡の構成要素となる多数のアンテナに対する同期信号の配信[10]等の応用も示されている。

OTT 信号を生成する方法は幾つかある。複数のレーザに対する注入同期を利用するアプローチ[11]は、先駆的な代表例であるが、所望の周波数差が安定的に得られる動作パラメータの最適化を要し、外乱によりカオスやパルス動作等の不安定動作に至る場合もある。ビート信号の一部をフィードバックして活用する位相

同期ループ[12][13]等も知られているが、ループ帯域による制約を伴う。高い非線形光学効果を有する光ファイバ[14]や、半導体光増幅器[15]における縮退4光波混合を利用する手法も示されているが、光フィルタの利用を伴う。これらに対し、得られる周波数差の自由度およびその安定性も高いアプローチとして、強誘電体の電気光学効果に基づく光の外部変調による手法[16]が1990年代初頭に示された。いわゆる搬送波抑圧両側波帯変調を光波に適用して、外部変調器を駆動する **RF** 信号に対して周波数が2倍のビートを得たものである。外部変調器における光波の干渉を利用してキャリアを抑圧するため、光フィルタによる波長の制約は生じない。8kmのシングルモードファイバ伝送後も、ビート信号の線幅がほぼ不変である事が実測により確認されている。高次の光側帯波のペアを利用できると、周波数間隔が広い **OTT** 信号を低周波信号源から生成でき、一種の周波数通倍が可能となる。これはデバイスの駆動周波数の抑制に繋がり有用性が高いため、高次の光側帯波のみを抽出する手法を課題として多々検討が進んでいる。光フィルタ[17][18]による所望波長成分の抽出は、最も直接的なアプローチとなるが、変調を施す搬送波の波長を変化させる場合、それに応じて光フィルタの中心波長の追従も要し、構成が複雑となる。また、**OTT** 信号の光周波数間隔の可変性を得るためには、光フィルタの帯域制御も必要となる。狭い光周波数間隔を得るためには、特に狭帯域性に加え、急峻な透過スペクトル変化も求められ、実現のハードルはより高くなる。また、複数の **OTT** 信号を同時に得ようとする場合、それに対応するスペクトル形状の光フィルタを要する。光フィルタの利用を回避する手法として、導波路型光干渉計を利用するものもある[19]。光側帯波の位相差を利用して、次数の低い光側帯波や搬送波を選択的に抑圧するものであるが、所望とする側帯波の次数が高くなる程、**RF** 信号で駆動する光変調器の台数が増大し、各々の制御も複雑になるという実用上の課題が顕在している。これらの制約を回避できるアプローチとして、光波の偏光制御に着目した[20]-[22]。偏光子の消光比は、広帯域に渡って確保できるため、搬送波の波長や波長数の制約を緩和した **OTT** 信号生成を実現するポテンシャルがある。一

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

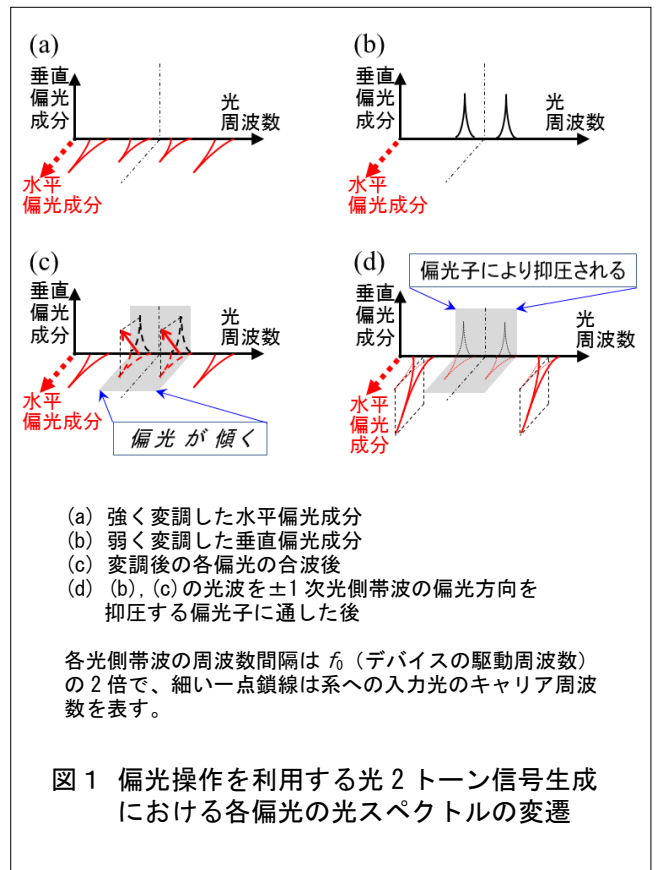
方で、光ファイバ中では、特に安定動作の実現が懸念される。これを実現する光学系の実装を見出し、モデル解析・実験の両面から OTT 信号生成を裏付けた。以降では、その詳細として、特に実験的検討について述べる。

3. 研究の方法と成果

図 1 に、偏光操作を利用する光 2 トーン信号生成における各偏光のスペクトルの変遷を示す。斜めの直線偏光を偏光ビームスプリッタ (PBS) に入射させて、水平・垂直偏光に分離し、周波数が f_0 の正弦波電圧により異なる強さの変調を各々に施す。光の変調は、プッシュプル動作^{*2} のマッハツェンダー型光変調器 (MZM) により行い、そのバイアス点はヌル点^{*3} とする。この状態の MZM を正弦波で駆動すると、キャリアおよび偶数次数の光側帯波は干渉により抑圧され、奇数次光側帯波のみが生成される。水平偏光・垂直偏光の変調度 (誘導位相量) をそれぞれ $\Delta\theta, \zeta\Delta\theta (0 < \zeta < 1)$ とすると、各偏光のスペクトルの模式図は図 1(a), (b) のように表すことができる。変調がかかった各偏光を再度同相で合波させると、 ± 1 次光側帯波の偏光方向のみが回転する。その様子を図 1(c) に示す。この ± 1 次光側帯波を遮るように偏光子を配置すると、 ± 3 次光側帯波を主成分とする光波が図 1(d) のように得られ、それらの光周波数間隔は $6f_0$ となる [20]。また 2 台の MZM をともにトップ・バイアス点^{*4} の状態とし、 $\zeta = 0$ (垂直偏光が無変調) とすると、同様の操作によりキャリアを偏光子でカットでき、 ± 2 次光側帯波を主成分とする光波の生成も可能となる [21]。

上記の偏光操作に対応する光学系を図 2 に示す。図 2(a) は、上記の動作を直接実装したものとなり、 P_1 - P_4 がそれぞれ、図 1(a)-(d) のスペクトルに対応する各光路となる。しかしながら図 2(a) は、MZM を各アームに含むマッハツェンダー干渉計となり、その光路長差の安定化が課題となる。これを解決するものとして、各アームを単一の偏光モードに集約させた図 2(b) の構成を見出した。図 2(b) に斜めの直線偏光を入射させると、偏光の水平成分・垂直成分はそれぞれ PBS を透過・反射し、MZM を伝搬して再度 PBS に戻り、光波が入射した PBS のポートから出力される。MZM は偏

光依存性を有するが、両偏光成分をこれに対応させるものが「偏光回転素子 (PRE)」である。これは偏光面を 90° 回転させるものである。PRE により、MZM を伝搬する光波の偏光は、光波の周回方向によらず常に同じ向きとなる。この向きは、PRE と MZM との位置関係により選択でき、偏光依存性を有する光変調デバイスへの対応が実現される。また、周回ループを伝搬する時計回り・反時計回りいずれの光波も、伝搬する偏光モードは (ループ中で垂直/水平偏光の交換が生じるものの) 同一となり、伝搬方向のみが異なる。



その結果、ループを構成する偏光保持光ファイバ (PMF) の偏光モード分散 (PMD) に起因する光路長の変動を回避できるという、実用上の利点が生じる。また、光学系の出力に含まれる不要波長成分の抑圧比が、PBS や MZM 等の構成要素の偏光消光比に影響されなくなる利点も、この構成に於ける特筆すべき点である。構成要素の偏光消光比が劣化した場合の影響は、PBS の空きポートに現れる。

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

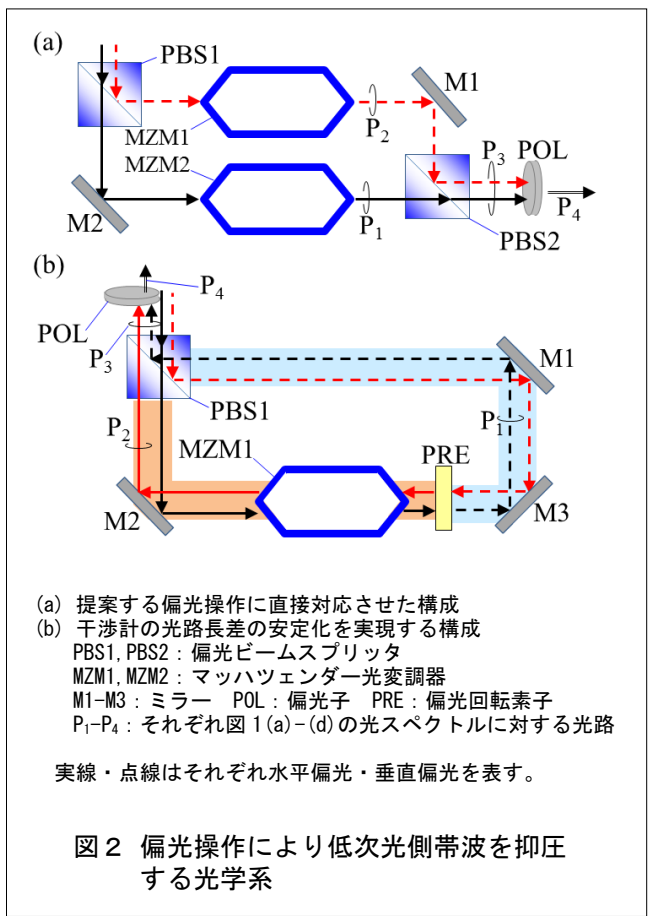


図 2(b)に含まれている MZM は 1 台のみであるが、これを 2 台分として機能させる点も特長である。これは、MZM における光波と高周波信号との「速度整合」を利用したものである。高速の光変調に利用される MZM には、光波を変調する高周波信号の伝搬速度と、変調がかかる光波の伝搬速度とのミスマッチを抑制する工夫が施されている。進行波型電極構造やリッジ型導波路構造等は、代表的な具体例である。この点を裏返すと、高周波信号の伝搬方向が光波の伝搬方向と逆の場合、殆ど変調がかからない事になる。即ち、異なる振幅の高周波信号を対向伝搬させた MZM に光波を対向入射すると、各々には異なる変調がかかる。この「MZM の電極を対向して伝搬する高周波信号」の信号波形が同じ場合、必ずしも信号源が 2 台である必要はない。例えば、片方向に伝搬した信号の反射や、2 電極型の MZM を用いて高周波信号伝送路の周回ループを構成する等によっても可能となる。その構成例を図 3 に示す。

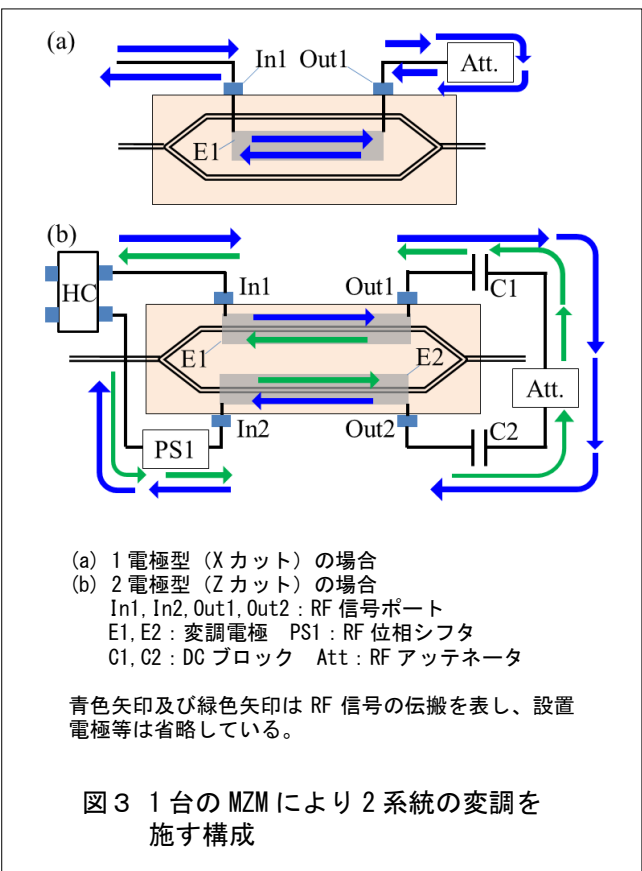


図 2(b)の光学系は、入力光と出力光が同じ光路を伝搬する。そのため、系への入出力となる光路に偏光子を配置する場合、入力光の偏光に対して、出力光に含まれる ± 1 次側帯波 (不要となる成分) の偏光方向が直交する必要がある。この状態を得るために、変調をかける 2 つの RF 信号の位相差に着目した。MZM の駆動系を図 3 の構成とした場合、図 2(b)の光学系における偏光は、図 4 のベクトル図で表すことができる。図 4(a)は入力とする直線偏光で、図 4(b), (c)は ± 1 次側帯波 (不要となる成分) の偏光方向を表す。図 4(b)は、時計回り・反時計回りの伝搬光を変調する RF 信号の位相が同じ場合である。また図 4(c)は、それらの位相が互いに逆の場合を示し、数学的には $\zeta < 0$ として扱える。光波の各偏光 (垂直・水平) 成分の位相に着目すると、変調の前後で垂直・水平成分が入れ替わるものの、図 4(b)の場合、ともに正方向のままである。そのため、変調度のアンバランス (ζ) に起因する偏光回転が多少生じるのみで、出力光の ± 1 次光側帯波の偏光が入力光に対して直交することはない。

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

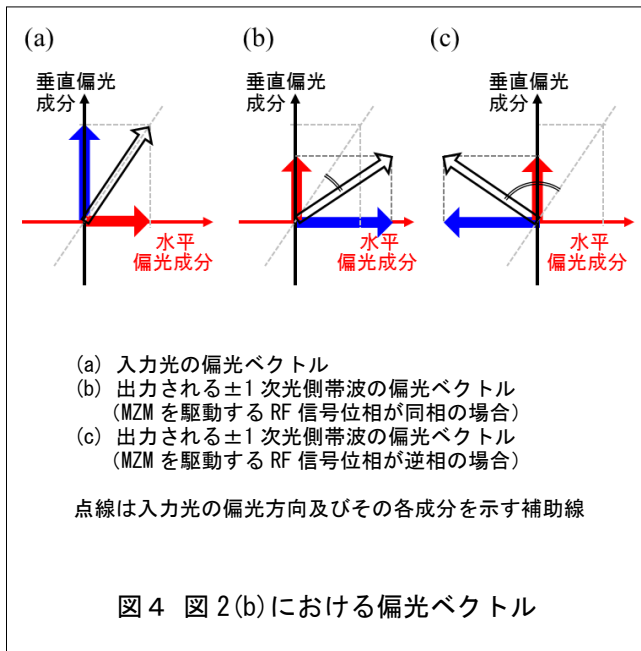


図4(a)は入力とする直線偏光で、図4(b), (c)は±1次側帯波(不要となる成分)の偏光方向を表す。図4(b)は、時計回り・反時計回りの伝搬光を変調するRF信号の位相が同じ場合である。また図4(c)は、それらの位相が互いに逆の場合を示し、数学的には $\zeta < 0$ として扱える。光波の各偏光(垂直・水平)成分の位相に着目すると、変調の前後で垂直・水平成分が入れ替わるものの、図4(b)の場合、ともに正方向のままである。そのため、変調度のアンバランス(ζ)に起因する偏光回転が多少生じるのみで、出力光の±1次光側帯波の偏光が入力光に対して直交することはない。そのため、出力光を入力光から分離した後に偏光子に通す必要が生じる[20]。しかし、この偏光子配置では、PBSと偏光子をつなぐPMFのPMDの変動に影響されやすい難点が残る。一方、図4(c)では、光波の垂直偏光は水平偏光に変換された後、変調信号の位相シフトに起因して逆相となり、負方向を向く偏光ベクトルとなる。所望となる±3次光側帯波の偏光方向については、RF信号の位相差によらず、水平・垂直偏光ともに正方向のままとなる。そのため、 $|\zeta|$ を適切に定めると、入力光に対して出力光の±1次光側帯波の偏光を垂直にでき、前述のリタデーシヨンの影響を回避できる[22]。この条件は、図4(a)の入力偏光の各成分の大きさに無依存で、次式で表される。

$$J_1(\Delta\theta) = J_1(|\zeta|\Delta\theta). \quad (1)$$

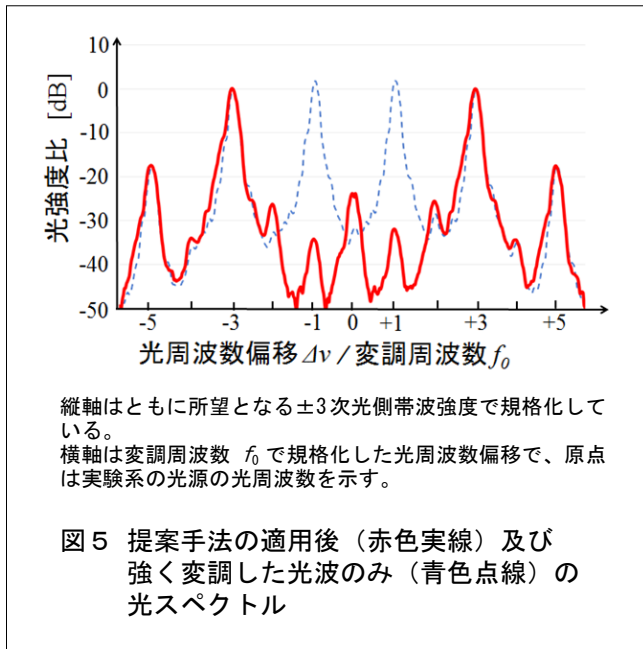
(1)式の条件は、定性的に次の通り説明できる。偏光回転素子の作用により、偏光の垂直/水平は、入力光と出力光とで入れ替わる。変調度のアンバランス $\zeta = -1$ (負号はRFの位相シフトに起因)であれば、変調後も偏光比は不変となるため、出力偏光が入力光に対して垂直となる。 $\zeta \neq -1$ の場合でも、光側帯波の振幅を決定する1次のベッセル関数の値が等しくなると同様の偏光状態となり、両者の偏光を直交させる事ができる。モデル解析の詳細は、文献[20][21]を参照されたい。上記は、RF信号の位相差を π として得られる結果であるが、位相差を $\pi/2$ とすると単側帯光変調となり、光周波数シフトとして機能する[23]ことを付記しておく。

上述の原理について実験的検討を進めた。光源として、Cバンド帯の外部共振器型半導体レーザ(線幅<1MHz)を用い、図2(b)の光学系の入力とした。偏光消光比が20dBのPBSおよびZカットのニオブ酸リチウムを基板とするMZMをPMFで接続して、光学系を構築した。MZMは、アームとなる光導波路毎に1つの電極を有する2電極型で、電極端面全てにRF端子(Kコネクタ)を有する、いわゆる外部終端型を用いた。また、MZMの駆動信号として、10GHzの信号源出力をクロックアンプで増幅したものを用いた。偏光子モジュールの消光比は35dBで、光が入出力されるPBSのポートの直近に配置した。偏光子モジュールを通過した光波を光サーキュレータで分離して、エルビウムドープ光ファイバ増幅器で増幅し、3dB光カプラで分割した。分割した光波のうち一方は、光スペクトラムアナライザ(Ando, AQ6317)で光スペクトルを観測した。もう一方の光波には、フォトダイオード(帯域>70GHz)で光/電気変換を施し、RFスペクトラムアナライザ(HP, 8563E)で観測した。所望の周波数となる60GHzおよび高次のスプリアスは、RFスペクトラムアナライザの測定範囲外であるため、高調波ミキサ(HP, 11970U)を併用して評価を行った。測定により得た光スペクトルを図5に示す。実線は、偏光子を通過した光波のスペクトルを表す。 $\Delta\theta$ および ζ の値は、それぞれ2.9, 0.08(11dB)とし、前述の(1)

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

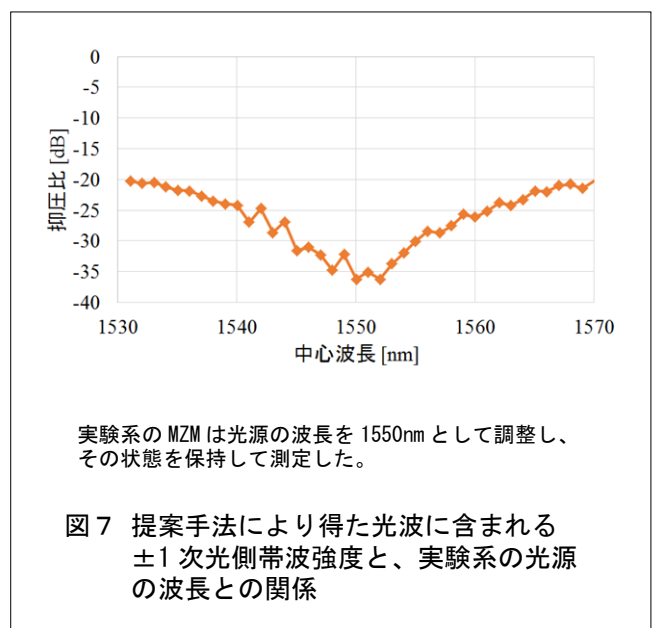
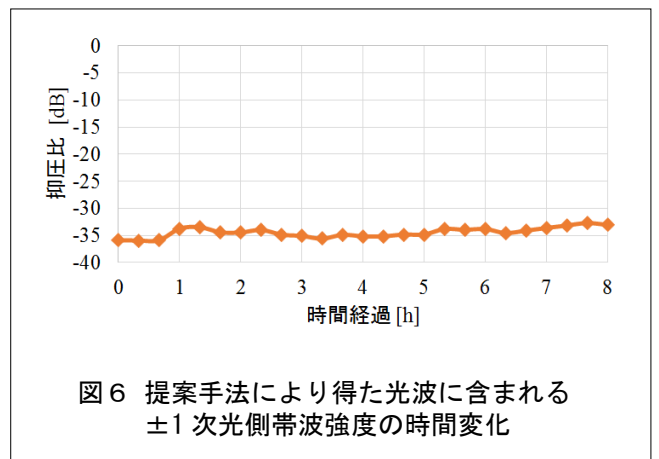
式を満たす状態とした。比較のために、強い変調のみを施した光波（図 2(b)の光学系を反時計回りに伝搬する光波）のみの光スペクトルを点線で表している。



共に所望となる±3次光側帯波の強度で規格化しているため、偏光子を通過した光波の光強度は、偏光子により減衰していることを付記しておく。両者を比較すると、±1次光側帯波が33dB以上抑圧されていることが見てとれ、偏光子を通過した光波の主要成分が±3次光側帯波であることを明確に示している。得られたOTT信号をフォトダイオード(3dB帯域>70GHz)でRF信号に変換したところ、所望の周波数(60GHz)に対する1次(10GHz)、1次(10GHz)、2次(20GHz)、4次(40GHz)のスプリアスは、それぞれ-27dB、-7dB、-30dBと評価され、 $\Delta\theta$ が2.66-2.94の範囲でほぼ同様の結果を示した。2次のスプリアス強度が目立つものの、その周波数は所望の周波数に対して十分低く、RFフィルタによる抑圧が可能と見込まれる。また、得られた±3次光側帯波の光強度0.1mWあたり、所望の周波数成分のRF強度として-46dBm前後がフォトダイオード単体から得られた。

図 6 に、偏光子で抑圧した±1次光側帯波強度の時間変化を示す。フィードバック制御を用いることなく、8時間に渡って32dB以上の抑圧を継続する事に成功

した。また、波長可変性について、図 7 に示す実験結果を得た。光源の波長を1550nmとしてMZMの駆動条件を設定し、その後、光源の波長を掃引して測定した±1次光側帯波の光強度である。光源の波長変動に伴ってMZMのバイアス点を実質的に変動するため、MZMの動作点を得た波長である1550nmから離れると、抑圧比が若干減少している。しかしながら、±10nmの波長変動に対しても±1次光側帯波の抑圧比は24dB以上を示しており、波長可変性を実験的に示唆するものである。この結果は、複数の連続光を光源として複数対のOTT信号を一括生成できる可能性も示すもので、周波数間隔に対する柔軟性をも有する手法としての発展も期待できる。



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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

4. 将来展望

本稿では、偏光の自由度を利用する不要波長成分の抑圧に基づく、光2トーン信号の生成について述べるとともに、その基盤となる光学系や光変調器の駆動系の構成についても触れた。紹介した手法により、任意波長の連続光から OTT 信号を生成する事が可能となり、波長の自由度を利用する多重・分離や経路制御等との併用による大容量・高機能化が期待できる。また、本手法により、光周波数差が狭い複数の連続光から複数の OTT 信号を一括で生成する事も可能となり、計測用光源としての応用も見込まれる。

謝 辞

本稿で紹介した研究の一部は、総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE, 142103013)、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業 (15K06050)、一般財団法人群馬大学科学技術振興会、群馬大学学長裁量経費の支援により行われたものです。また、本稿で紹介した実験結果は、群馬大学大学院理工学府電子情報部門の高田和正教授に師事していた博士前期課程 (当時) 赤松洋介君の協力により得られたものです。実験で用いた光変調デバイスは、住友大阪セメント株式会社の日隈薫様のご厚意により利用できたものです。この場をお借りして、関係各位に深く感謝いたします。

用語解説

- *1 一度の変調で複数ビットの情報を重畳する変調方式。具体的には、16 値 (4 ビット) の情報を光波の複素振幅および位相 (光波の正弦成分・余弦成分の各振幅) に重畳する 16 値直交振幅変調や、8 値 (3 ビット) の情報を光波の位相に重畳する 8 値位相偏移変調 (8PSK) などがある。
- *2 MZM に電圧を入力すると、符号が互いに逆となる電気光学効果が各アームに誘起される動作。
- *3 MZM の各アームの光路長差が波長の半整数倍となるバイアス電圧。MZM への入力に直流電圧のみの場合、MZM の透過光強度が最も小さくなるので、ボトム・バイアス点と呼ぶ場合もある。

- *4 MZM の各アームの光路長差が波長の整数倍となるバイアス電圧。MZM への入力に直流電圧のみの場合、MZM の透過光強度が最も大きくなる。

参考文献

- [1] A. Hirata, *et al.*: "10-Gbit/s wireless link using InP HEMT MMICs for generating 120-GHz-band millimeter-wave signal," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **57**, pp. 1102-1109 (2009).
- [2] 昭和 44 年版科学技術白書 [第 3 部第 7 章 3(1)]
- [3] 熊谷信昭「私の研究者歴」、電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン、No.9 (2009 年夏号)、pp.4-11 (2009).
- [4] T. Maiman, "Stimulated Optical Radiation in Ruby," *Nature* **187**, pp.493-494 (1960).
- [5] A. Chiba, *et al.*: "16-level quadrature amplitude modulation by monolithic quad-parallel Mach-Zehnder optical modulator," *Electron. Lett.* **46**, 3, pp. 220-221 (2010).
- [6] X. Pang, *et al.*: "100 Gbit/s hybrid optical fiber-wireless link in the W-band (75-110GHz)," *Optics Express* **19**, 25, pp. 24944-24949 (2011).
- [7] L. Deng, *et al.*: "42.13 Gbit/s 16QAM-OFDM Photonics-Wireless Transmission in 75-110 GHz Band," *Progress in electromagnetics research* **126**, pp. 449-461 (2012).
- [8] S. Koenig, *et al.*: "100 Gbit/s Wireless Link with mm-wave Photonics," *Proc. OFC/NFOEC 2013*, PDP5B.4 (2013).
- [9] P. Ghelfi, *et al.*: "A fully photonics-based coherent radar system," *Nature* **507**, pp.341-345 (2014).
- [10] H. Kiuchi, "Highly stable millimeter-wave signal distribution with an optical round-trip phase stabilizer," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **56**, 6, pp.1493-1500 (2008).

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

Stable optical two-tone signal generation based on manipulating polarization of optical sidebands and its wavelength-independent operation

- [11] L. Goldberg, *et al.*: "Microwave signal generation with injection locked laser diodes," *Electron. Lett.* **19**, 13, pp.491–493 (1983).
- [12] J. Harrison, *et al.*: "Linewidth and offset frequency locking of external cavity GaAlAs lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **25**, 6, pp.1252–1255 (1989).
- [13] K. J. Williams, "6-34 GHz offset phase locking of Nd:YAG 1319 nm nonplanar ring lasers," *Electron. Lett.* **25**, 18, pp.1242–1243 (1989).
- [14] A. Wiberg, *et al.*: "Microwave-photonic frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber bragg gratings," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **24**, 1, pp.329–334 (2006).
- [15] T. Wang, *et al.*: "High-spectral-purity millimeter-wave signal optical generation," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **27**, 12, pp.2044–2051(2009).
- [16] J. J. O'Reilly, "Optical Generation of very narrow linewidth millimeter wave signals," *Electron. Lett.* **28**, 25, pp. 2309–2310 (1992).
- [17] T. Kawanishi, *et al.*: "Reciprocating optical modulation for harmonic generation," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13**, 8, pp.854–856 (2001).
- [18] M. Mohamed, *et al.*: "Analysis of frequency quadrupling using a single Mach-Zehnder modulator for millimeter-wave generation and distribution over fiber systems," *Optics Express* **16**, 14, 10786–10802 (2008).
- [19] C.-T. Lin, *et al.*: "Optical millimeter-wave up-conversion employing frequency quadrupling without optical filtering," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **57**, 8, pp.2084–2092 (2009).
- [20] A. Chiba, *et al.*: "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).
- [21] A. Chiba, *et al.*: "Optical two-tone signal generation without use of optical filter for photonics-assisted radio frequency quadrupling" *Optics Letters* **40**, 15, pp.3651-3654 (2015).
- [22] A. Chiba, *et al.*: "Long-term stable 60-GHz optical two-tone signal by destructive optical interference obtained from RF phase adjustment," *Electronics Letters* **52**, In press (DOI: 10.1049/el.2015.4365) (2016).
- [23] M. Izutsu, *et al.*: "Integrated optical SSB modulator/frequency shifter," *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-17**, 11, pp.2225-2227 (1981).

この研究は、平成23年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成24～26年度に実施されたものです。