

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02134

研究課題名（和文）光単側波帯変調の楕円様電界複素振幅軌跡を利用した多重技術の研究

研究課題名（英文）Multiplexing techniques by using elliptic electric-field trajectory of single sideband modulation signal for optical communication systems

研究代表者

高野 勝美（Takano, Katsumi）

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60302303

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：光ファイバ通信の大容量化のために光の属性に依存しない手法が求められている。本研究では、光単側波帯（SSB）変調の光電界複素振幅の時間的な楕円軌跡を利用して通信容量を増やす方式を検討した。位相シフト型光SSB変調で使われるヒルベルト変換を高域通過型とすることで、光SSB変調信号の光電界複素振幅軌跡が楕円から円様に変化できることを示し、その円様軌跡を活用して側波帯が抑圧された光QPSK符号を生成できることを明らかにした。複素平面上に複数シンボルを配置する一種の多重に関して知見が得られたが、今後は受信方式にも工夫を行い、複素平面上のより柔軟な多重化が可能となるよう研究を発展させていく予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ファイバ通信の大容量化は光の属性を用いることを特徴としてこの20年間歩んできた。一層の大容量化のために、信号の時間的な変化に着目し、光単側波帯（SSB）変調の光電界の複素平面上の軌跡に着目した。楕円状の軌跡を円様に変化させ、複数の円の交点で複素平面上の複数のシンボル点を表現することで多値符号を実現する可能性を引き出した。これは、狭い周波数帯域で多くの情報を伝送できることを意味する。この本研究の学術的な意義は、情報技術を活用した安全安心でスマートな社会を構築する情報通信基盤に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to increase the capacity of optical fiber communication, a method that does not depend on the attributes of light is required. In this study, we investigated a method to increase the capacity by using the temporal elliptical trajectory of the optical field complex amplitude of optical single sideband (SSB) modulation.

By using the high-pass type of Hilbert transform used in optical SSB modulation, we find that the trajectory the optical SSB modulated signal can be changed from an ellipse to a circle. Taking advantage of the circular trajectory, we also show that we can generate optical QPSK codes with suppressed sideband.

We obtained knowledge about optical multi-symbol signaling with optical SSB, in other words, a kind of multiplexing in the optical complex plane. Our future plan is the improvement on the demodulation scheme for more flexible multiplexing on the complex plane.

研究分野：通信工学

キーワード：光ファイバ通信 変復調 単側波帯 楕円 多重

### 1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信の分野では、波長分割多重(WDM)技術が成熟しつつある。WDM に利用できる帯域幅は中継器である光ファイバ増幅器の利得帯域幅(1.55 $\mu\text{m}$  帯 C・Lバンドで約 10THz)によって制限される。通信容量拡大のために新たな多重方法が模索されつつある。偏波多重、マルチモード光ファイバを前提としたモード多重、1本の光ファイバ中に複数のコアを収容する空間多重などである。これらは、光電界の向きや光路の違いといった搬送波の物理的パラメータを多重に利用し、同じ方式を数多く並列化できる点で産業上も適ししやすい方法である。一方で、偏波モードは直交する2つしかないのであり、長距離伝送中では複雑な偏波変動や偏波クロストークが発生する。マルチモード光ファイバといっても現実的に利用できるモードは数モードしかなく、これらは容易にモード結合によりクロストークが生じ、MIMO 処理のためのパイロット信号により実効的な通信容量は頭打ちとなろう。ひとたび高次モードへ変換されれば、クラッドへの放射損による SNR 劣化は回復できない。

### 2. 研究の目的

光ファイバ通信の通信容量拡大のために現在検討されている多重方式の多くは、光の属性に依存して並べる方式であり、限界が見えている。それに備えた新しい多重化技術を検討する。デジタル伝送の時分割多重は時間軸を上手に利用する技術である。アナログ的な発想で多重を見直せば、時間的变化に新しい多重が可能と思われる。光単側波帯(SSB)変調信号の光電界複素振幅は時間に対して楕円様の軌跡を描くことがわかってきている。このことを巧みに利用する多重化と大容量化を検討する。

### 3. 研究の方法

これまでの申請者らの検討によって、2値光 SSB 変調の光電界複素振幅は時間の関数として複素平面上で楕円様軌跡を描くことが理論的にも実験的にも明らかになった。当初、この現象は光多値変調に光 SSB 変調を用いる際の弊害と思われた。しかし、光 SSB 変調信号発生過程で使われるヒルベルト変換に工夫を加えれば、光 SSB 変調信号の光電界複素振幅の軌跡は、楕円から円様に形を変えることが予想された。この円様の光電界複素振幅軌跡を活用することで、2値信号だけでなく、より大容量な光符号の利活用につなげていく。光多値符号は、複素平面上の一種の多重化とも考えることができる。

研究の手法としては、まず2値光 SSB 変調の光電界複素振幅軌跡を円様にする手法を提案し、より円に近くなる条件を探索する。その後、円様軌跡を活用した4値光符号のSSB変調に挑戦する。具体的には、楕円軌跡を円様にするために、光SSB変調に用いるヒルベルト変換器の特性修正を試みる。4値光符号としては光QPSKを念頭に検討を行い、その際の問題点を明らかにしつつ、さらにその改善を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 光 SSB 変調の変調スペクトルと光電界複素振幅軌跡

2値信号を光 SSB 変調する送信器構成を図1に示す。光 SSB 変調器はマツハツェンダー(MZ)干渉計を2つ並列化したものとし、一方のMZ干渉計で光をベースバンドで変調して光同相信号となし、他方はベースバンド信号をヒルベルト変換した波形で光を変調し光直交成分となす。このようにしたとき、位相シフト型光 SSB 変調が可能となり、その変調スペクトルを図1右に示す。このとき、ベースバンド信号は10 Gbps、PN7段疑似ランダム NRZ 符号とした。定義的なヒルベルト変換を前提にすれば、片側側波帯はきれいに抑制され、下側波帯のみの変調スペクトルとなることがわかる。

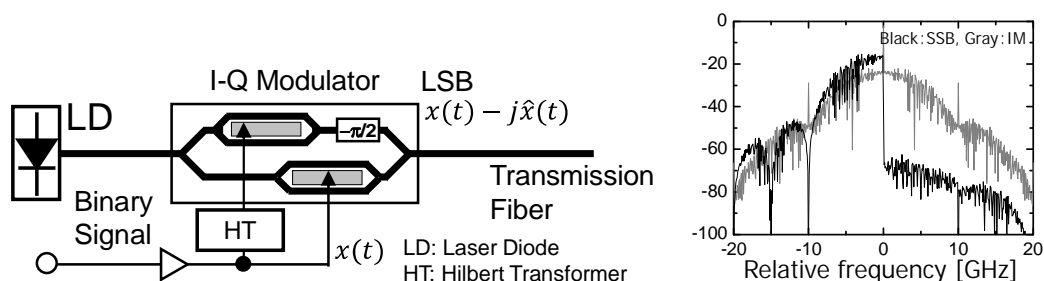


図1. 位相シフト型光 SSB 変調送信部の概略と変調スペクトル

図2は、このときの光変調器に印加するベースバンド信号波形ならびにヒルベルト変換波形で

あり、ここに示されるベースバンド信号波形とそのヒルベルト変換波形から容易に想像できるように、変調器出力の光電界複素振幅の時間的な軌跡は図2右のように縦長の楕円を重ねたような波形となる。光SSB変調の光電界複素振幅は、単に2値信号を送ろうとするだけでも、その時間的な軌跡は複素平面上で面的に広がる。複素平面上で4値、8値と多値シンボルを配置して周波数利用効率を上げる符号を光SSB変調するのは直感的には困難と思われていた。

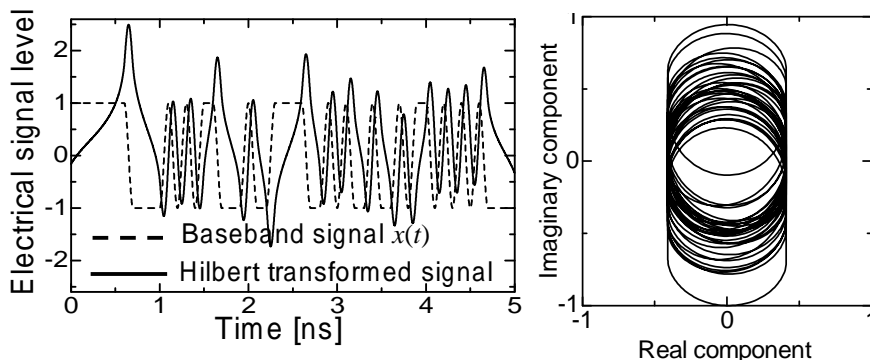


図2. 光SSB変調器印加信号波形と変調器出力の光電界複素振幅軌跡

### (2) 高域通過型ヒルベルト変換による光SSB変調光電界複素振幅軌跡の円様化

前節では、ヒルベルト変換の定義にしたがったヒルベルト変換を行った結果を示したが、ヒルベルト変換の振幅特性を高域通過型とすることで、直交成分のピークを持つ波形は改善される。高域通過型ヒルベルト変換器の振幅特性が周波数に対して正弦関数で立ち上がり、ピークに到達した以降の周波数では振幅が維持されるような高域通過型ヒルベルト変換を仮定した(図3)。ベースバンド信号を10 Gbps、PN7段疑似ランダムNRZ符号とし、遮断周波数を3 GHz(ビットレートの3/10倍の周波数)としたときの変調スペクトルとその光電界複素振幅軌跡を図4に示す。このように、ヒルベルト変換振幅特性を高域通過型とすることで、上側波帯の搬送波付近の周波数成分は抑圧されずに残ることになるが、光電界複素振幅軌跡を円様にする事ができることが数値計算によって明らかになった。

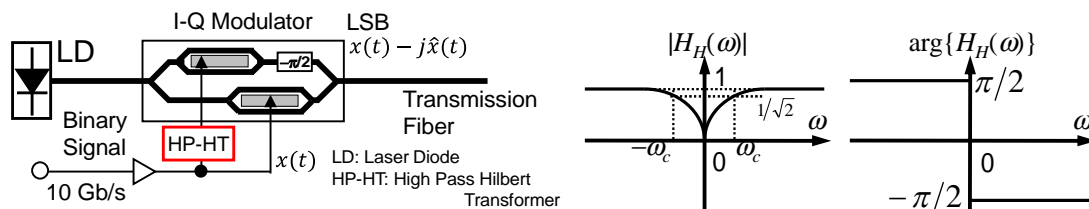


図3. 高域通過型ヒルベルト変換光SSB変調送信部と高域通過型ヒルベルト変換伝達関数

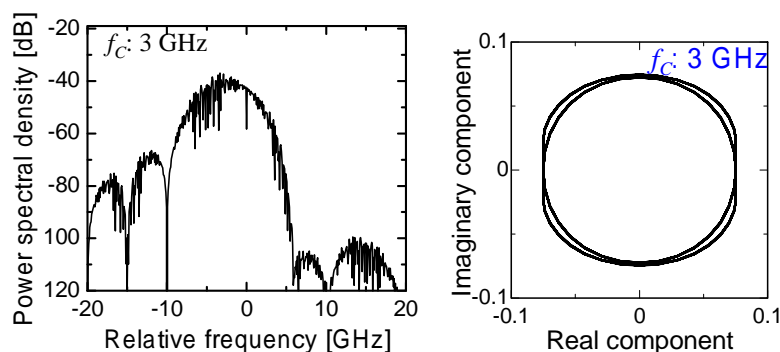


図4. 高域通過型ヒルベルト変換光SSB変調スペクトルと光電界複素振幅軌跡

ヒルベルト変換器を高域通過型とすることで、変調器出力の光電界複素振幅軌跡が円様になることを実験で実証するために、図5のような実験系で実験を行った。このときのベースバンド信号は、機器の都合で2.5 Gbps、PN10段疑似ランダムNRZ符号を用いた。光SSB変調器に印加する信号波形はオフラインで作成し、任意波形生成器AWGで発生させた。したがって、ヒルベルト変換器の遮断周波数の変更は、オフラインで行っている。ヒルベルト変換器の遮断周波数を変えて、その影響を変調アナライザにより光電界複素振幅軌跡と変調スペクトルで評価した。実験結果を図6に示す。図6(a)は理論的に求めた変調器出力の光電界複素振幅軌跡であり、同図(b)は実験で得られた光電界複素振幅軌跡であり、両者はよく一致する。同図(d)は変調スペクトルであり、遮断周波数が高くなるほど上側波帯が残留することも観測された。同図(e)は遮断周波数に対する光電界複素振幅軌跡の楕円率を表している。ほぼ円となるのは0.75 GHzであり、この値はビットレートの3/10の周波数であり、前節で述べた10 Gbps信号に対する遮断周波数

3GHz とよく一致する .

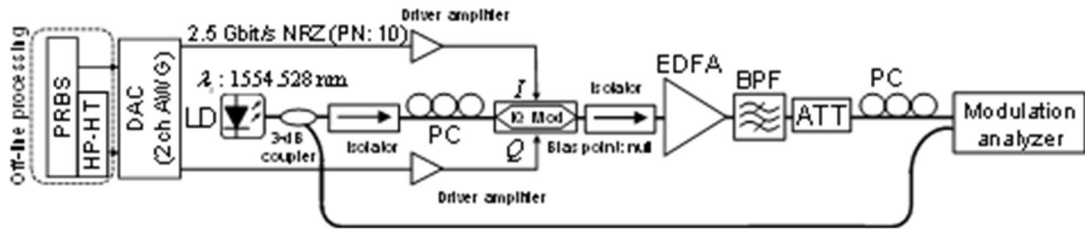


図 5 . 高域通過型ヒルベルト変換光 SSB 変調の実験系

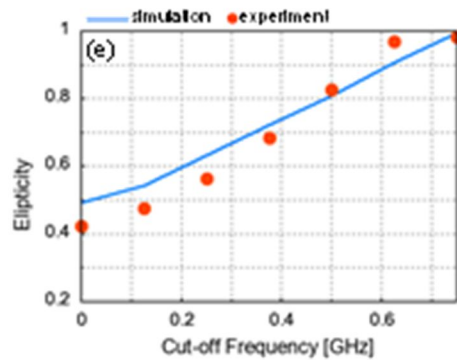
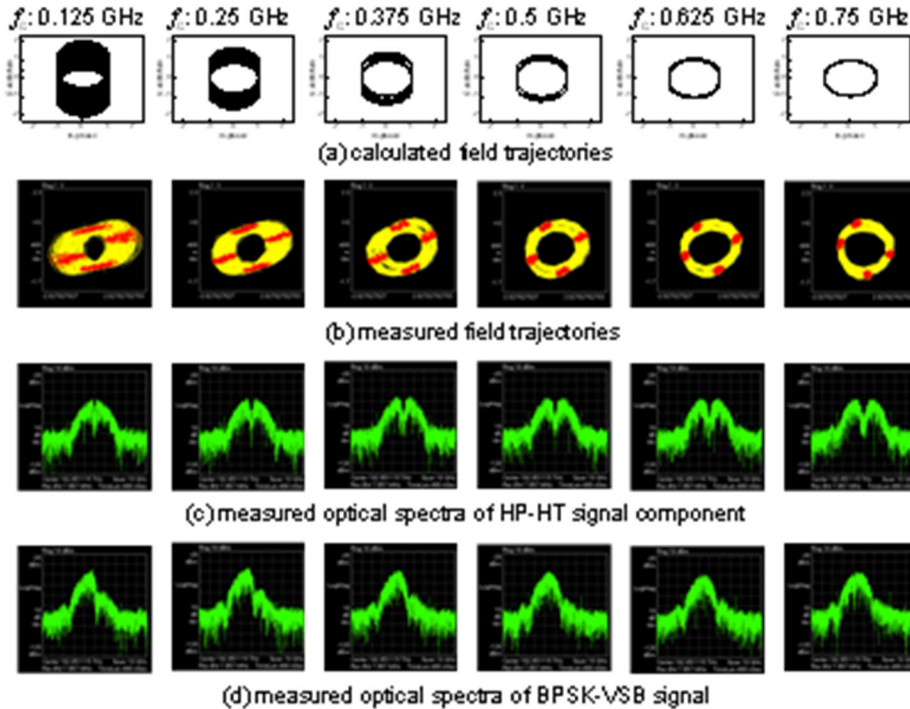


図 6 . 高域通過型ヒルベルト変換光 SSB 変調の実験結果

### (3) 光 VSB 変調の楕円様光電界複素振幅軌跡を利用した光 QPSK 符号の原理

複素平面上の一種の多重化である多値符号光 SSB 変調に円様の光電界複素振幅軌跡を利用する方法について述べる . まず 4 値である光 QPSK 符号の SSB 変調に対して検討を行った . 提案する送信器の構成を図 7 に示す . 上下 2 つの IQ 変調器からなる . 図中上の IQ 変調器は , 複素平面上の実軸に沿ったシンボル点までの移動  $x(t)$  のための変調器であり , その光電界変化の片側側波帯を抑制するためのヒルベルト変換成分  $\hat{x}(t)$  の変調も合わせて行う . 図中下の IQ 変調器は , 複素平面上の虚軸に沿ったシンボル点までの移動  $y(t)$  のための変調器であり , その光変化の片側側波帯を抑制する機能も持つ . 2 つの IQ 変調器出力光を合流して送信器出力とする . 変調器出力の複素振幅の実部と虚部の関係は , ヒルベルト変換の線形性によって維持されるため , 片側側波帯は抑圧される . 高域通過型ヒルベルト変換を用い , その遮断周波数を調整することにより , 上下それぞれの変調器出力光電界複素振幅の複素平面状における時間軌跡は円軌道にすることができる . 2 つの IQ 変調器による複素平面状の軌跡の模式図を同図右に示す . 4 つの円が主たる時間軌跡を構成する . 信号のサンプリングのタイミングではこれら 2 つの円の交点の光電界複素振幅となる . それ以外の時刻では , 光 VSB 変調の高域通過ヒルベルト変換の寄与で , 光の状態は円上で , 交点以外の点となる . なお , 高域通過型ヒルベルト変換の振幅特性は周波数に対して正弦波の二乗で立ち上がるものとした . その遮断周波数を 3 GHz としたときのシンボル点計算結果を同図右に示す . 光 QPSK の符号が明

確に存在することがわかるが、シンボル位置に若干の揺らぎがあり、この時の EVM 値は 8.27% であった。この EVM 値を改善するために、高域通過型ヒルベルト変換器の最適化を行った。具体的には、遮断関数は変えずに、ロールオフ係数と遮断周波数を変化させながら EVM 値を評価するシミュレーションを行った。その結果を図 8 に示す。ロールオフ係数が 1 で遮断周波数が 3.75 GHz のとき、EVM 値は最も小さくなり 2.0% であった。このときのシンボル状態と変調スペクトルを図 9 に示した。

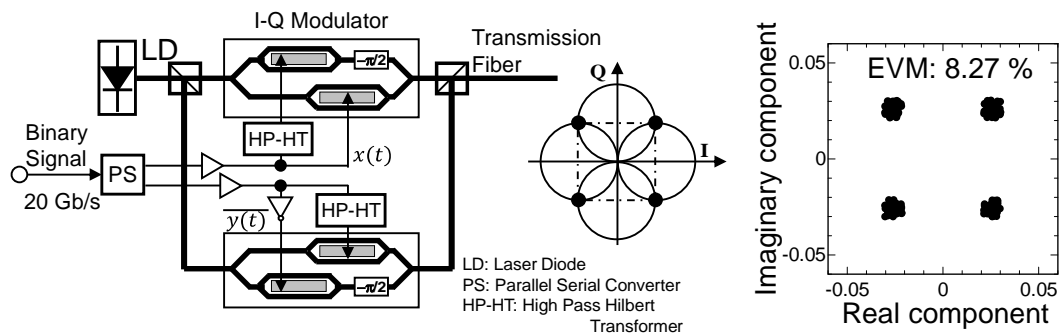


図 7 . 円様軌跡を利用した光 QPSK-SSB 変調の原理および数値計算で得られたシンボル点

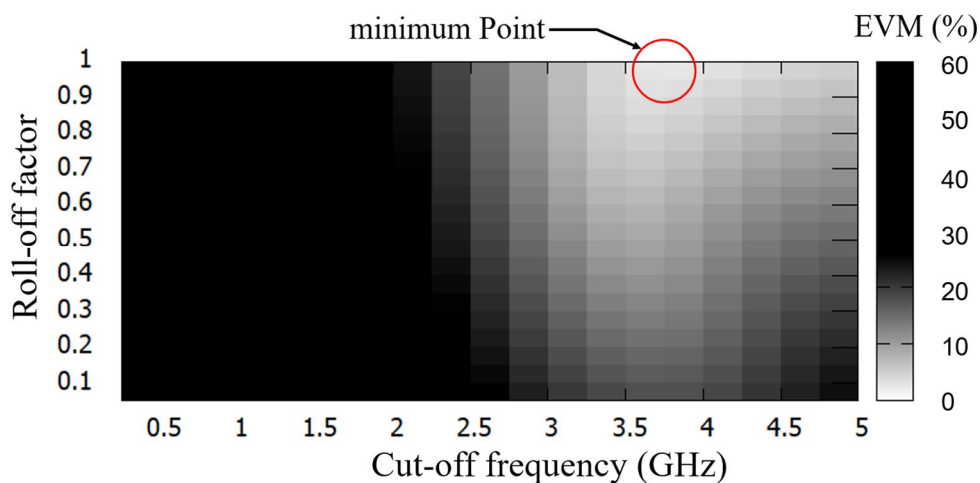


図 8 . 高域通過型ヒルベルト変換器の遮断周波数・ロールオフ係数と EVM 値の関係

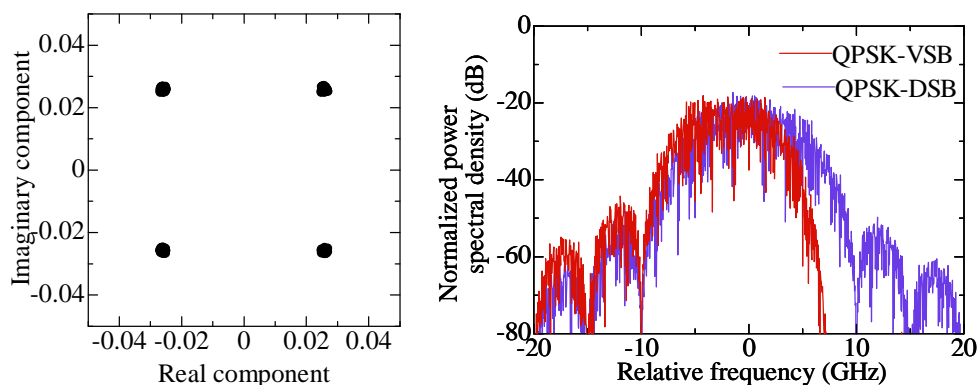


図 9 . 最適高域通過型ヒルベルト変換器光 QPSK-SSB 変調のシンボル点と変調スペクトル

#### (4) まとめ

光ファイバ通信の大容量化のための多重化技術として新しい軸を開拓する目的で光 SSB 変調の光電界複素振幅軌跡に着目した。楕円軌跡を詳細に検討し円様化することができた。その円様軌跡を巧みに利用し、2 値光符号から 4 値光符号へと光複素平面上での多重化が可能であることが本研究により示された。今後は受信方式にも工夫を行い、複素平面上のより柔軟な多重化が可能となるよう研究を進展させていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Amila Kariyawasam, Masaki Shiraiwa, Yoshinari Awaji, Katsumi Takano, and Joji Maeda	4. 巻 10
2. 論文標題 Optical field trajectory shaping of phase-shift method based optical BPSK-VSB signal; an experimental study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 570-575
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0100	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 Kentaro Toba, Takaha Fujita, Enzo Tsukui, Kariyawasam Indipalage Amila Sampath, Joji Maeda	4. 巻 39
2. 論文標題 A Study on Sampling Penalties Reduction of Kramers-Kronig Receivers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 6054-6062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2021.3099938	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 K. I. Amila Sampath, Katsumi Takano, and Joji Maeda	4. 巻 8
2. 論文標題 Peak-to-average power ratio reduction of carrier-suppressed optical SSB modulation: performance comparison of three methods	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Photonics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics8030067	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Amira Kariyawasam, Tomoya Asano and Joji Maeda
2. 発表標題 Experimental Demonstration of OSSB+C Generation using EML and LN Phase Modulator
3. 学会等名 OSA Advanced Photonics Congress 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤貴紀, 高野勝美
2. 発表標題 マツハツェンダ形光SSB変調器並列化の残留側波帯低減効果変調度依存性
3. 学会等名 2022年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayumi Nakazawa, Masataka Kasai, Tomohiro Ito, and Katsumi Takano
2. 発表標題 Influence of digital Hilbert transformers on digital-coherent-detected optical SSB quadrature component for data-center networks
3. 学会等名 The 9th International Conference on Smart Systems Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高野勝美, カーリヤワサム アミラ
2. 発表標題 搬送波抑圧光単側波帯変調技術とその展開
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江端健, 高野勝美
2. 発表標題 エルビウム添加光ファイバ増幅器を含む光ファイバリング中の光パルスの計算
3. 学会等名 令和4年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飴野亨, 高野勝美
2. 発表標題 キャリア抑圧光SSB 変調光ファイバ伝送のXPM によるスペクトル変化の観測
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kota Suzuki, Masaki Tasugi, Kenji Nozawa, K. I. Amila Sampath, and Katsumi Takano
2. 発表標題 Optically filtered VSB modulation for data-center networks
3. 学会等名 The 8th International Conference on Smart Systems Engineering 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takanori Sato, Kenji Nozawa, K. I. Amila Sampath, and Katsumi Takano
2. 発表標題 Harmonics mitigation by parallelization of optical SSB modulators for high capacity communications
3. 学会等名 The 8th International Conference on Smart Systems Engineering 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三浦史章, 高野勝美
2. 発表標題 振幅スクランブル光通信とそのシンボル誤り率
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 飴野亨, 高野勝美
2. 発表標題 2波WDM搬送波抑圧光SSB変調信号伝送のXPMによるスペクトル変化
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jubee Tada, Keiichi Sato
2. 発表標題 An Implementation of a Grid Square Codes Generator on a RISC-V Processor
3. 学会等名 2020 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daichi Sato, Kariyawasam Indipalage Amila Sampath, and Katsumi Takano
2. 発表標題 Optical QPSK signal generation based on the circular trajectory of phase-shifted optical VSB modulation using high-pass Hilbert transformers
3. 学会等名 The 24th OptoElectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高野勝美, 平井貴也
2. 発表標題 光パルス符号位相シフト型単側波帯変調のパルス幅に関する一検討
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kariyawasam Indipalage Amila Sampath, Yushin Hayashi, and Joji Maeda
2. 発表標題 Experimentally observed stimulated Brillouin scattering and optical parametric amplification in a radio-over-fiber link
3. 学会等名 14th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飴野亨, 高野勝美
2. 発表標題 光単側波帯信号の波長分割多重伝送ファイバ非線形歪みの検討
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村知輝, 高野勝美
2. 発表標題 EDFA とクラッド励起マルチコアEDFA のステップ応答解析
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎克海, 高野勝美
2. 発表標題 FDTD法における正方形グリッドを用いた円柱2次元フォトニック結晶の分割方法
3. 学会等名 令和2年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 櫻井美咲, 高野勝美
2. 発表標題 光PAM4信号の非対称帯域制限の影響
3. 学会等名 令和2年度情報処理学会東北支部研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 高野勝美, カーリヤワサム アミラ	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 628
3. 書名 次世代高速通信に対応する光回路実装、デバイスの開発	

1. 著者名 K. I. Amila Sampath, Katsumi Takano, and Joji Maeda	4. 発行年 2022年
2. 出版社 MDPI Books	5. 総ページ数 124
3. 書名 Advanced Technique and Future Perspective for Next Generation Optical Fiber Communications	

〔産業財産権〕

〔その他〕

山形大学高野研究室 <a href="http://www.takanolab.yz.yamagata-u.ac.jp/">http://www.takanolab.yz.yamagata-u.ac.jp/</a>
--

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
研究 分 担 者	K a r i y a w a s a m A m i l a  (Kariyawasam Amila)  (90801192)	九州大学・システム情報科学研究院・助教   (17102)	
研究 分 担 者	多田 十兵衛  (Tada Jubee)  (30361273)	山形大学・大学院理工学研究科・准教授   (11501)	

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