

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年5月28日現在

機関番号：	17501
研究種目：	基盤研究 (B)・一般
研究期間：	2015~2017
課題番号：	15H04009
研究課題名 (和文)	光周波数同期伝送系における多値数適応 QAM 信号ホモダイン検波方式の研究
研究課題名 (英文)	Study of the homodyne detection for the optical M-ary QAM signal on the optical frequency synchronous network
研究代表者	
	古賀 正文 (KOGA, Masafumi)
	大分大学・理工学部・教授
	研究者番号：60448545
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費)：	12,800,000 円

研究成果の概要 (和文)：光位相同期の実用化に向けマイコン制御によるループフィルタを開発し自動的に周波数及び位相を引き込ませることを可能とした。光 16QAM 信号に対しその位相が QPSK 相当の信号を抽出する回路を開発し QPSK 信号用位相 4 倍回路と併用することで COSTAS ループを構成し光 16QAM 信号のホモダイン検波に成功した。
マルチコアファイバの 2 コアを使用した位相共役信号を伝送し、両者の I-Q ベクトル信号を幾何平均合成することで位相雑音が低減することを検証した。

研究成果の概要 (英文)：We demonstrated signal light carrier automatic phase-lock operation by our newly developed microcomputer-controlled phase-lock loop circuit. 16-QAM optical signal homodyne detection was demonstrated by extracting $\pm\pi/4$ and $\pm 3\pi/4$ -phase data symbols from 16-QAM signal, our decision-driven Costas loop for QPSK code achieved the LO light phase-locking to the signal carrier wave modulated at 16-QAM code.

We investigated approaches that can cancel nonlinear phase noise effectively for the phase-conjugate pair diversity transmission of 16-QAM WDM signals through multi-core fiber.

研究分野：光ファイバ伝送

キーワード：光位相同期，光ホモダイン検波

1. 研究開始当初の背景

デジタルコヒーレント光通信技術の現状；最近 10 年の光ファイバ伝送容量の拡大は、高速大規模デジタル信号処理 (DSP) 技術の貢献によるところが大きい。DSP をコヒーレント検波技術へ適用してコヒーレント技術を復活させただけに留まらず、偏波多重や精緻な線形分散補償を可能にしている①、すでに 100Gbit/s DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase-Shift Keying) 変調方式による伝送システムに対応した高速大規模 DSP が開発され、デジタルコヒーレント光通信システムの実用化が進んでいる。しかしながら、40nmCMOS プロセスにて 100M を超えるゲート規模となっており②、負荷の軽減は将来へ向けて取り組むべき課題となっている。また、高速 DSP の ADC/DAC (Analog-to-Digital Converter) 処理速度は CMOS プロセスによって律速されるの

で、symbol-rate は高々 20GSymbol/sec 程度となる。速度律速は伝送容量拡大における主要な課題となっており、この課題を回避する方式としてマルチキャリア光通信ならびに多値符号への期待が高まってきている。

(2) 光ホモダイン検波：光ホモダイン検波回路は、1980 年代から 90 年代中頃までコヒーレント光通信実現へ向けて精力的に研究されたが、“実現困難な技術”という認識が広まり、申請者の知る限り報告例は BPSK で 4、QPSK では 1 に留まる③④⑤。申請者は光周波数同期伝送系にて Decision-driven Costas Loop を用いて QPSK 信号ホモダイン検波動作を実証した。光ファイバ伝送による実証例は世界で初めての報告であり、それだけ安定であることの証左である。本申請では多値、すなわち M-ary QAM 信号ホモダイン検波技術へ展開する。その際、昨今の多くの装置が目指している Software-defined Optics (SDO)

受信機の思想に沿うように多値数に適應可能な検波技術を目指す。周波数オフセット・位相推定に対する信号処理量は不要となり、ADC 速度にも律速されない検波技術を確立できることになる。将来の中距離伝送系へ適した構成と言える。さらに、多値 QAM 信号に対する位相再生型 PSA の道も開けることになる。

2. 研究の目的

光ファイバ伝送容量は、デジタルコヒーレント光通信の登場によって飛躍的に拡大した。一方、デジタル信号処理に対する負荷増大が顕在化しつつある。本研究は、多値 QAM 信号のホモダイン検波を可能にすることによって、周波数オフセット・位相推定に関する処理を不要にしてデジタル信号処理負荷軽減を図るとともに、位相感応増幅器における励起光位相再生技術を確立すること目的としている。1990 年代に「実現困難な技術」とされた光ホモダイン検波を、Decision-driven 型 Costas Loop によって一昨年 QPSK 信号に対して成功させており、多値 QAM 信号へと展開を図るものである。

3. 研究の方法

(1) 送信側ではキャリア光源を光基準コムにヘテロダイン方式で位相同期させ、受信側では局発光を信号光にホモダイン方式で位相同期させることを可能とするマイコン制御型自動引き込みループフィルタを開発した。この自動化は光周波数同期伝送方式の実用化に向けての大きな布石となる。

(2) 伝送容量増大に対応するため、これまでの BPSK・QPSK 信号のホモダイン検波技術を 16 値 QAM 信号や偏波多重信号に対応できるようにする。16 値 QAM 信号に対してはその位相が QPSK 信号と同じである符号(内外輪 8 点)を抽出することで QPSK と同様に位相 4 倍して位相誤差を検出し、ホモダイン検波を実現する。偏波多重に関しては受信後に直交する偏波(X-Y)の片側に対してホモダイン検波することで両偏波とも検波できることを実証する。

4. 研究成果

(1) マイコン制御型ループフィルタ

光 QPSK ホモダイン検波において COSTAS 回路の出力は

$$V_{COSTAS} = [\sin 4(2\pi\Delta f t + \varepsilon)] \quad (1)$$

と表され、信号光キャリア周波数 f_{sig} と局発光周波数 f_{LO} との差 Δf は 4 倍として検出される。しかしながら COSTAS 回路には周波数弁別機能がなく、周波数を引き込ませる方向が不明である。CPU によりループフィルタを制御することで周波数引込を実現する方法を以下に説明する。

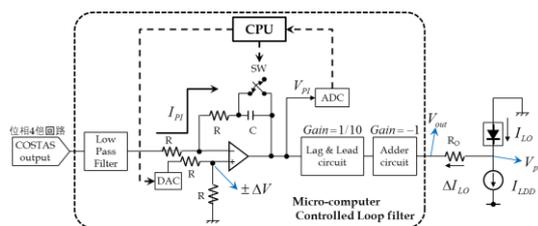
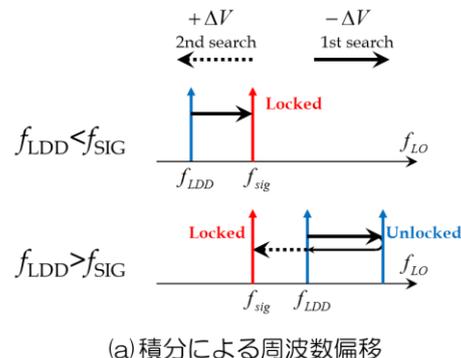
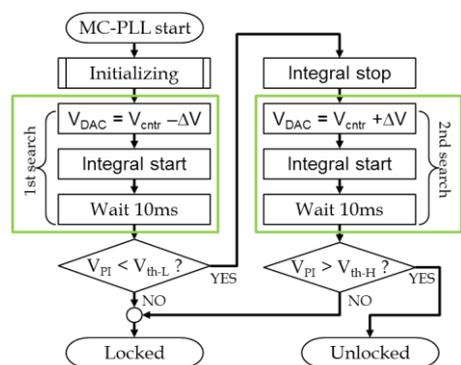


図 1. マイコン制御型ループフィルタ



(a) 積分による周波数偏移



(b) アルゴリズム

図 2. 自動引き込みのメカニズム

図 1 に示すようにループフィルタは LD に流す定電流に制御電流を付加するように接続されている。CPU により比例+積分回路にオフセット電圧 $\pm\Delta V$ を与え積分することで局発光周波数を偏移できることを式 (2) に示す。

$$f_{LO} = f_{LDD} + \alpha \cdot 0.1(\pm\Delta V)(1+t/\tau)/R_0 \quad (2)$$

ここで f_{LDD} は定電流ドライバによる初期周波数、 α は f_{LO} の FM 感度、 τ は積分時定数、 R_0 はループフィルタと f_{LO} の接続抵抗である。

図 2(a) に示すようにオフセット電圧が $-\Delta V$ の時 f_{LO} は増加し、周波数が一致しない時は $-\Delta V$ を与え f_{LO} を減少させ、信号光キャリア周波数に一致させることが可能となる。図 2(b) にそのアルゴリズムを示す。

局発光源に外部共振型半導体レーザー (E-LD) を用い、定電流ドライバにより信号光周波数 f_{sig} に対し離調周波数 $\pm 100\text{MHz}$ となるように駆動し、オフセット電圧 ΔV は 10mV とした。離調周波数を $\pm 100\text{MHz}$ とした結果を図 3 に光周波数の時間応答として示す。引込コマンド発生から自動引込が完了するまでの所要時間は 1ms 以内であった。

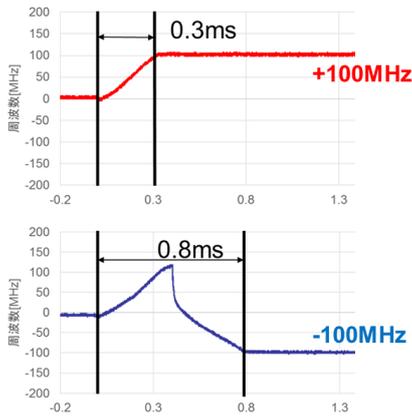


図 3. 光周波数の時間応答

(2) 光 16QAM 信号ホモダイン検波

受信した 16 値 QAM 信号から位相 $(\pi/4) + (n\pi/2)$ ($n=0, 1, \dots, 3$) のシンボル点を抽出できれば QPSK 用コスタスループを用いて位相誤差を検出できる. 16 値 QAM ホモダイン検波系の全体構成と適用しているシンボル点抽出回路の構成を図 4 に示す.

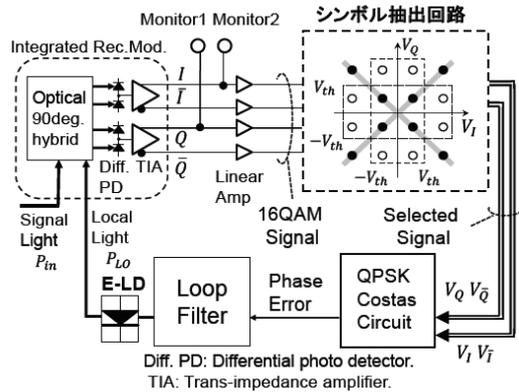


図 4. 16QAM ホモダイン検波系構成図

差動入力排他的論理和 (Ex-OR) 回路を使い、閾値処理と $(\pi/4) + (n\pi/2)$ 位相抽出クロックの生成を行っている. 抽出にはトラック&ホールド (T&H) 回路を用いた. 図 5 に示すように 2 つに分岐した受信信号の片側は T&H 回路への入力, もう一方はシンボル抽出タイミングクロック信号生成回路への入力である. T&H 回路が, 入力信号に対して $(\pi/4) + (n\pi/2)$ 位相の 8 つのシンボル点を抽出するタイミングでトラック動作を行い, それ以外の不要な点はホールド動作によって取り除く. 表 1 に 8 シンボル点抽出のためのクロック生成真理値表を示している. 信号 V_I と反転信号 $V_{\bar{I}}$ に閾値処理を行い, 閾値電圧 V_{th} と比較した A, B 信号をそれぞれ生成する. A, B は Ex-OR-1 の入力であり, その出力 X は表 1 左上の真理値表で表せる. Q 側に対しても同様の演算を行い Ex-OR-2 出力 Y と X とを Ex-OR-3 の入力とすることで, 表 1 右側の真理値表に示すようにシンボルを抽出するクロック信号を生成する. Ex-OR-3 が AND であれば中 4 点, OR であれば最外の 4 点のみを

抽出できる.

図 4 に示した構成においてホモダイン位相同期検波を行った. 4G Symbol/s 疑似ランダムパターン (PRBS) の 16 値 QAM 信号を使用し (16Gbps-16 値 QAM), 受光器の入力信号光パワー: P_{in} を -3.8dbm , 局部発光光 (LO 光) パワー: P_{LO} を $+9\text{dBm}$ とした. 図 6 に TIA 出力をオシロスコープ (OSC) によって観測したアイパターンを示す. ホモダイン同期検波が確認できる. OSC 帯域は 4GHz とした. 図 7 はホモダイン同期検波に対してデジタル信号処理を行い, コンスタレーションマップを描いた結果である.

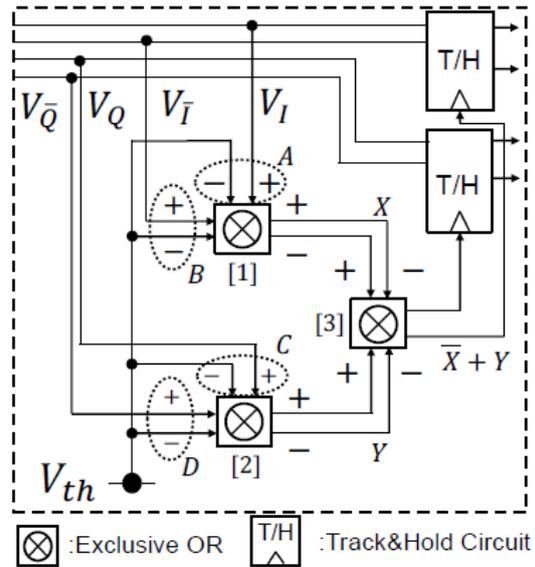


図 5. シンボル抽出回路

表 1. クロック生成の真理値表

$Ex-OR [1]$ $X = A \oplus B$	$V_I < -V_{th}$ (0)	$-V_{th} < V_I$ (1)	<table border="1"> <tr> <td>$Ex-OR[3]$ $\bar{X} \oplus Y$</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>●(1)</td> <td>○(0)</td> <td>○(0)</td> <td>●(1)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>○(0)</td> <td>●(1)</td> <td>●(1)</td> <td>○(0)</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>○(0)</td> <td>●(1)</td> <td>●(1)</td> <td>○(0)</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>●(1)</td> <td>○(0)</td> <td>○(0)</td> <td>●(1)</td> </tr> </table>	$Ex-OR[3]$ $\bar{X} \oplus Y$	0	1	1	0	1	●(1)	○(0)	○(0)	●(1)	0	○(0)	●(1)	●(1)	○(0)	0	○(0)	●(1)	●(1)	○(0)	1	●(1)	○(0)	○(0)	●(1)
$Ex-OR[3]$ $\bar{X} \oplus Y$	0	1		1	0																							
1	●(1)	○(0)	○(0)	●(1)																								
0	○(0)	●(1)	●(1)	○(0)																								
0	○(0)	●(1)	●(1)	○(0)																								
1	●(1)	○(0)	○(0)	●(1)																								
$V_I < V_{th}$ (1)	無し	0																										
$Ex-OR [2]$ $Y = C \oplus D$	$V_Q < -V_{th}$ (0)	$-V_{th} < V_Q$ (1)																										
$V_Q < V_{th}$ (1)	無し	0																										

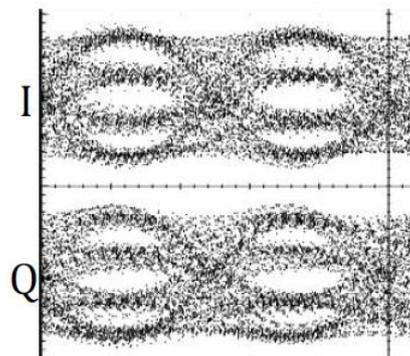


図 6. 位相同期時のアイパターン

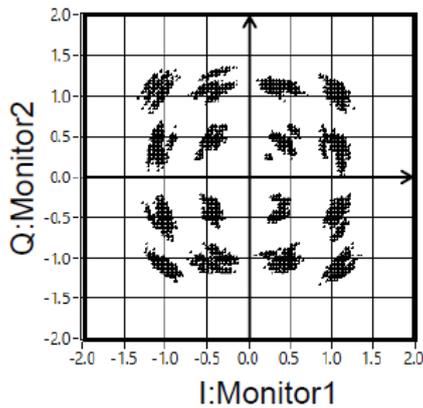


図 7. コンスタレーションマップ

(3) 偏波多重 QPSK ホモダイン検波

直交する X 及び Y 偏波の光搬送波が多重されて光ファイバへ入力され伝搬すると、光ファイバが有する複屈折性の影響を受けて偏光状態が変動する。ストークスパラメータに対応する偏光制御を施して X' ならびに Y' 直線直交偏波に分離し受信回路の偏波ビーム分離回路 (PBS) の偏光軸に合わせれば、それぞれの偏波モードに対するホモダイン受信が可能となる。

図 8 に実験系の構成を示す。X' 偏波に対してコスタスループを用いて局発 (L0) 光位相を搬送波位相に同期させて、ホモダイン検波を施す。Y' 偏波にも同じ局発光を用いてコヒーレント検波を試みる。PPG (Pulse Pattern Generator) から 10G Symbol/s, 23 段 PRBS の IQ の信号を生成し、DP 用 IQ 変調器へ印加する。X, Y 偏波間には数 bit 分の時間遅延を与えて両偏波間の変調信号のランダム化を行った。偏波多重光を 20kmSSMF で伝送させた後に、偏波多重光受信器 (DPREC) にてホモダイン受信を行った。搬送波ならびに L0 光のスペクトル線幅は 3kHz である。入力信号光強度 (P_{in}), L0 光強度 (P_{L0}) はそれぞれ -8.0dBm , $+9.0\text{dBm}$ であった。DPREC に入力する直前に信号光の偏光を $\lambda/4$ 波長板 2 枚, $\lambda/2$ の波長板 2 枚を用いて PBS の直交軸に合致するように手動制御した。

TIA 出力信号 ($I(X')$, $Q(X')$, $I(Y')$, $Q(Y')$) をサンプリングオシロによって分岐観測した。図 9 に観測したアイパターン ($I(X')$, $I(Y')$), 同図面 (b) にコンスタレーションマップを示す。両偏波ともに良好なダイアグラムが得られ、状態遷移の様子も確認できる。信号処理によって得られたシンボル点の様子も図 10 に示した。ストークスパラメータに学習制御を行えば、偏波多重信号光に対するホモダイン検波受信系を構築できることが期待できる。

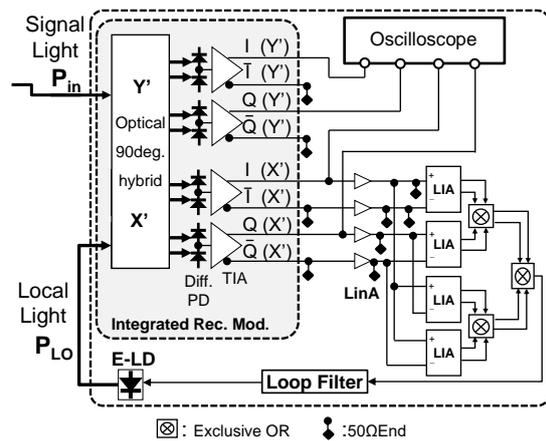


図 8. 偏波多重 QPSK ホモダイン検波系

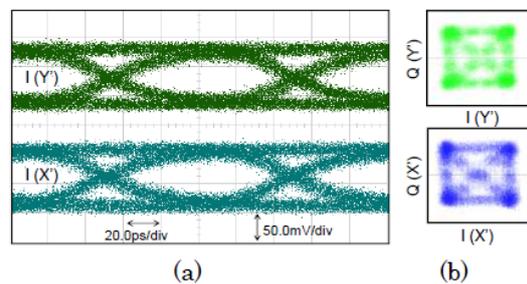


図 9. アイパターンとコンスタレーションマップ

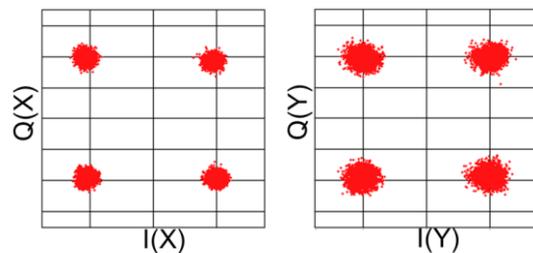


図 10. DSP 処理後のコンスタレーションマップ

(4) 位相共役光伝送による Q 値回復

図 11 に長さ 70km、分散 20.6ps/nm/km の 7-MCF の 2 コアを用いた 50Gb/s-16QAM 5chWDM 1050km (70km × 15) 周回伝送実験系の構成を示す。WDM 信号は観測チャネル周波数を 193.25THz とし 50GHz 間隔で 5ch 多重しており、各光源の線幅は 60kHz 程度である。多重化後、IQ 変調器を用いて WDM 信号を 12.5Gb/s-16QAM 変調した。変調後、20km の SMF を用いて 5 チャンネル間のビット列をランダム化している。伝送部では、ループへの入力部と出力部に音響光学変調器 (AOM) によるスイッチを設け、周回数を制御している。ループ内では MCF による損失を EDFA により補償し、分散補償ファイバ (DCF) を用いて分散補償を施す。ループ内に光バンドパスフィルタ (OBPF) を設けることで、余分な ASE 雑音を除去している。位相共役光は信号光と対極にあるコア # 2 を使って伝送する。変調部では Q 信号のみを反転した IQ バー変調として

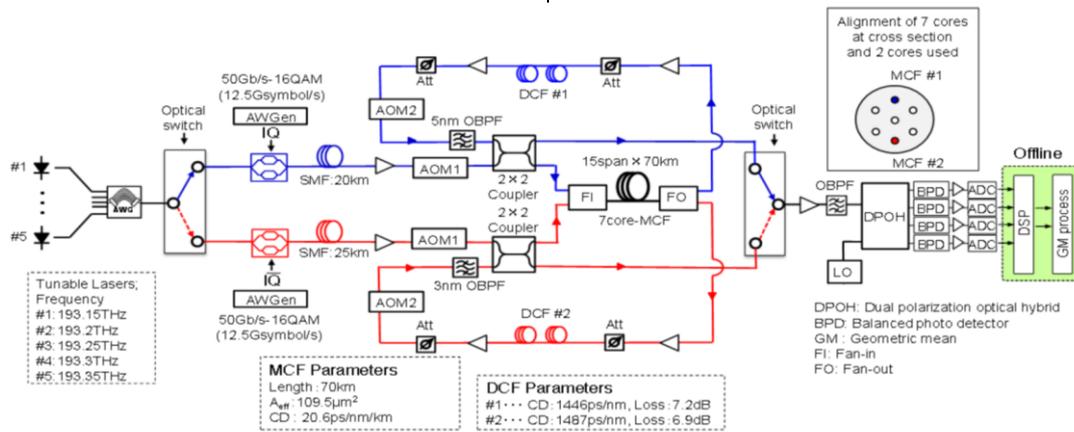


図 1 1. 位相共役光伝送による信号光非線形位相雑音相殺評価を行う周回伝送実験系

位相共役光を作り出す。伝送受信後に信号光と位相共役光から得られた電気信号よりオフラインで幾何平均合成を行った。コンスタレーションマップ上のヒストグラムから Q 値を推定した。

信号光と位相共役光，両者の幾何平均における受信時の Q 値を図 12 に示す。信号光及び位相共役光ではコア入力パワー P_{in} が -6dBm/ch を超えるとコア内で発生する非線形現象による自己位相遅延により Q 値が減少する。しかし，両者の幾何平均ではこの非線形位相シフトを相殺するため入力パワーが -6dBm/ch を超えても Q 値は増加する。結果として単一コアで最大の Q 値よりも $+4.1\text{dB}$ ，同じ入力パワーに対しては $+5\text{dB}$ の Q 値回復を示している。コア入力パワー -2.5dBm/ch での受信信号から得られたコンスタレーションマップを図 13 に示す。

16QAM-WDM 信号光の非線形位相シフト相殺をスパン毎分散補償 1050km 周回マルチコアファイバ伝送実験系にて評価し，幾何平均合成相殺により $+5\text{dB}$ の Q 値向上を確認した。

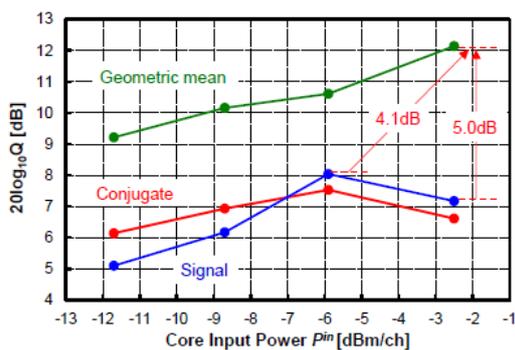


図 12. コア入力パワーに対する Q 値比較

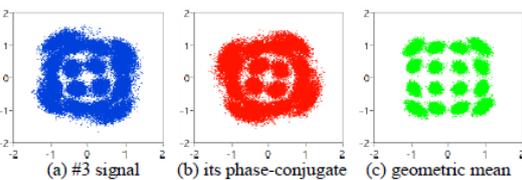


図 13. コンスタレーションマップ ($P_{in}=-2.5\text{dBm/ch}$)

<引用文献>

- ① K. Kikuchi, IEEE Selected Topics in QE. Pp. 563-570, 2006.
- ② 鈴木他, 信学会誌, pp. 1100-1116, 2012 年 12 月.
- ③ S. Norimatsu and K. Iwashita, Electronics Lett., vol. 31, No. 2, pp. 125-127, 1995.
- ④ S. Camatel, V. Ferrero and P. Poggiolini, Proc. OFC/NFOEC 2006, paper OTuI3, Mar 2006.
- ⑤ S. Norimatsu, et al., IEEE PTL. Vol. 4, No. 7, pp. 765-767, 1995.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. KODAMA, A. MIZUTORI, T. KOBAYASHI, T. MIZUNO, M. KOGA, "Nonlinear Phase-shift Cancellation by Taking the Geometric Mean of WDM-Signal Phase-conjugate Pair," IEICE TRANS. on Com., Vol. E101-B, 2018, DOI: 10.1587/transcom.2017EBP3351, 査読有
- ② M. Koga, M. Moroi, and H. Takara, "Optical diversity transmission using WDM signal and phase-conjugate lights through multicore fiber," OSA Optics Express, Vol. 24, No. 9, PP9340-9352, 2016, DOI:10.1364/OE.24.009340, 査読有.
- ③ Y. Hisata, A. Mizutori, and M. Koga, "Automatic Optical Heterodyne Phase Lock by Microcomputer-assisted Loop Filter," IEICE Com-EX., Vol. 5, No. 12, PP448-453, 2016, DOI:10.158/comex.2016XBL0152, 査読有
- ④ Y. OKAMURA, M. ABE, K. KONDO, Y. OHMACHI, T. KAZAMA, T. UMEKI, M. KOGA, AND A. TAKADA, "Optical pump phase locking to a carrier wave extracted from phase-conjugated twin waves for phase-sensitive optical amplifier repeaters," OSA Optics Express, Vol. 24, No. 23, PP26300-26305, 2016, DOI:10.1364/OE.24.026300, 査読有.

[学会発表] (計 12 件)

- ① Y. Okamura, K. Kondo, T. Okabe, M. Koga, and A. Takada, "Pump Phase-Locking to Phase-Conjugated Twin Waves with Heterodyne OPLL Assisted by Sum-Frequency and Second Harmonic Generation for ND-PSAs," 22nd Microoptics Conference (MOC2017), Tokyo, Japan, Nov. 19 - 22, 2017.
- ② 阿部, 小玉, 水鳥, 古賀, "偏波多重 QPSK 信号コストスループホモダイン検波," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 東京, Sep. 2017.
- ③ A. Mizutori, T. Abe, T. Kodama and M. Koga, "Optical 16-QAM Signal Homodyne Detection by Extracting $+\pi/4$ and $+\pi/4-3\pi/4$ -Phase Symbols," OFC2017, Th4C.6, Mar. 2017, 査読有
- ④ 大道, 阿部, 近藤, 岡村, 風間, 梅木, 古賀, 高田, "信号光位相共役光対光信号を利用した励起光位相同期ループ制御による非縮退パラメトリック位相感応型光増幅実験," レーザ学会, 徳島, Jan. 2017.
- ⑤ Y. Hisata, A. Mizutori, and M. Koga, "Signal Light Carrier Automatic Phase-Lock Operation to Optical Frequency Grid Comb," OECC/PS2016, WA2-35, 2016, 査読有
- ⑥ 久田, 水鳥, 古賀, "マイクロコンピュータ制御自動引き込みヘテロダイン位相同期ならびに QPSK ホモダイン検波の実証," 電子情報通信学会信学技法, OCS9-12, 2016.
- ⑦ Y. Okamura, K. Kondo, Y. Omachi, ..., M. Koga, and A. Takada, "First Demonstration of Non-Degenerate Phase-Sensitive Amplification with Pump Light Recovered by Optical Phase-Locked Loop," IPC2016, Waikoloa, Dec. 2016.
- ⑧ M. Koga, "Optical Phase-lock Technologies for Optical Communication, Sencors, and Measurements," Nano Science & Technology-2016, Singapore, Oct. 2016, 招待講演
- ⑨ 水鳥, 久田, 古賀, "CPU 制御ループフィルタによる 20Gbit/s 光 QPSK ホモダイン自動位相同期," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, Sep. 2016.
- ⑩ 阿部, 小玉, 水鳥, 古賀, "16 値光 QPSK 信号のコスタスループによるホモダイン検波," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, Sep. 2016.
- ⑪ 師井, 古賀, "多値 QAM-WDM 信号光とその位相共役光を用いた光ダイバーシティ伝送による Q 値向上," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 札幌, Sep. 2016.
- ⑫ Y. Okamura, ..., M. Koga, and A. Takada, "Optical phase-locking among phase-conjugated twin waves and free-running pump by using sum-frequency and harmonic generation assisted OPLL for

ND-PSA repeaters," CLEO2016, San Jose, June 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)
名称: 光位相同期回路
発明者: 水鳥明, 古賀正文
権利者: 国立大学法人 大分大学
種類: 特許
番号: 特願 2016-208746
出願年月日: 平成 28 年 10 月 25 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 正文 (KOGA Masafumi)
大分大学・大学院理工研究科・教授
研究者番号: 60448545

(2) 研究分担者

水鳥 明 (MIZUTORI Akira)
大分大学・理工学部・助教
研究者番号: 10190646