

# 光電気変換型コヒーレント光信号再生の研究

## Study on Opto-Electronic Coherent Signal Regeneration



松本 正行 (Masayuki MATSUMOTO, Dr. Eng.)

和歌山大学 システム工学部 教授

(Professor, Wakayama University, Faculty of Systems Engineering)

IEEE OSA 電子情報通信学会 レーザー学会

受賞：電気学会優秀論文発表賞 (1991)

著書：Optical Solitons in Fibers, 3rd Ed. (共著) Springer (2003)

研究専門分野：光通信 非線形光学

あらまし コヒーレント光受信<sup>1)</sup>における受信光信号の位相推定と偏波追跡がデジタル領域における信号処理によって可能になり、コヒーレント光信号伝送の実用化が進んだ。しかしながら、高速のアナログデジタル変換 (ADC) や、高サンプル速度のデジタル信号処理 (DSP) は、大きな電力消費を伴う。デジタル信号処理に頼らない、さらには、高速の電気信号処理を用いないコヒーレント信号伝送および信号処理への期待は大きい。本研究では、ADC や DSP を用いない四位相偏移変調 (QPSK) 光信号のホモダイン検波を行う際に必要な位相同期局部発振光生成手法と、QPSK 光信号のコヒーレント再生への応用について検討した。

### 1. まえがき

光ファイバ通信システムの容量の増大に飽和の兆しはなく、消費電力やコストの制約のもとで、より一層の高速・大容量化を目指して様々な技術の可能性が模索されている[1]。限られた光波長帯域を用いて情報の伝送速度を上げるためには、変調の多値化による周波数利用効率<sup>2)</sup>の向上が必須であるが、変調の多値度が上がるほど雑音や伝送路の非線形性による波形劣化への耐性が低下し、信号到達距離が短くなる。既存の標準的な光増幅器と伝送ファイバを用いるシステムにおいて、信号の到達距離を延長するためには、雑音や波形劣化の累積をリセットする機能をもつ信号再生器を伝送路中に配置することが必要になる。信号再生器は、

(1)光信号を電気信号に変換せず、光のままに雑音除去や波形整形を行う全光型の再生器と、(2)光信号を一旦電気信号に変換して再生処理を行い、その後再び光信号に変換する再生中継器に分類される。

(1)の全光型信号再生器については、多波長チャンネル一括信号再生が実現される可能性があることから、これまでに多くの研究が報告されてきた[2][3]。しかしながら、非線形光学媒体を用いて強い雑音除去特性を得るためには、高い信号光電力が必要になることや、多重化された光信号に重畳された雑音を信号間のクロストークなしに除去することは困難であり、多値変調信号の多波長一括信号再生の実現の目処は立っていないと言える[4]。一方、(2)の方法では、光受信機と光送信機のペアが伝送路途中に挿入され、チャンネルごとに電気信号領域で再生処理が施される。この方法によって、確実な信号再生効果が得られるが、再生中継回数、すなわち総伝送距離に比例して信号伝送コストが増大する。現在、実用化されているコヒーレント光信号伝送システムでは、高速のアナログデジタル変換 (ADC) およびデジタルアナログ変換 (DAC) と、電気信号領域におけるデジタル信号処理 (DSP) が光送受信器内で用いられる[5]。伝送途中に配置される信号再生器において、ADC、DAC やデジタル信号処理を省くことができれば[6][7]、低コストかつ低消費電力の長距離信号伝送が実現される。そこで本研究では、多値変調光信号伝送の長距離化を目的とした、高速デジタル信号処理を用いないコヒーレント光信号再生に関する検討を行った。

### 2. 多値位相変調光信号のホモダイン検波

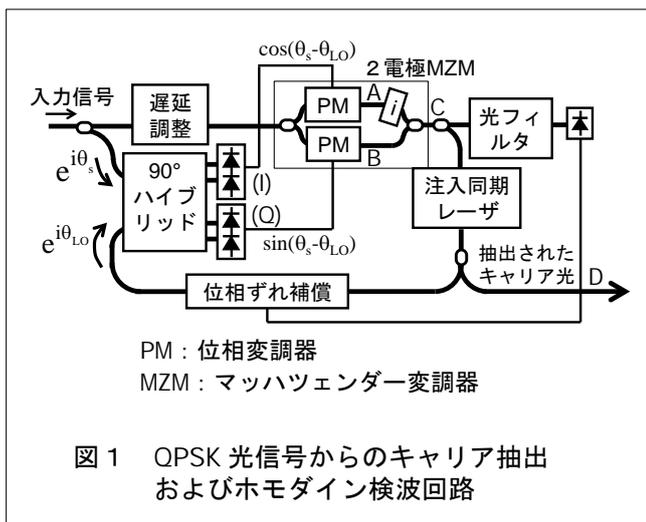
DSP を用いないコヒーレント光信号再生では、入力光信号のキャリアと周波数が同一で位相が同期した局部発振光 (LO 光) を信号再生器内で生成する必要がある[5]。信号光の位相が  $0 \sim 2\pi$  の間で偏りなく変調される場合、信号に含まれるキャリア成分がゼロになり、LO 光の位相を光源光に同期させるための基準がなくなる。この場合、光源光と位相同期した LO 光を生成するためには、光領域または電気領域において何らかの非線形な信号処理を行う必要がある。これまでに、(i)  $90^\circ$  ハイブリッドを用いたホモダイン検出における

# 光電気変換型コヒーレント光信号再生の研究

## Study on Opto-Electronic Coherent Signal Regeneration

同相検波出力と直交位相検波出力の積を位相同期ループのフィードバック信号として用いるコスタスループ法や判定駆動 (decision-driven) ループ法[8]、(ii)遅延検出したデータを電気領域においてデコーディングし、信号光を再変調してキャリア成分を回復する方法[9]、(iii)二位相偏移変調 (BPSK) 信号を光縮退パラメトリック発振器のポンプ光として用いることによってキャリア光を生成する方法[10]、(iv)ポンプ光と信号光、およびポンプ光と参照光との間の高次四光波混合光の差周波電気信号を分周し、その値に等しい周波数シフトを参照光に与える方法[11]、などが提案され、実験で検証されている。それぞれ優れた特徴を持つが、(i)および(ii)ではシンボル速度以上の速度の電気信号処理が必要であり、(iii)および(iv)では効率の良い光非線形媒質が必要になる。

本研究では、信号光のホモダイン検波、信号光に対する位相再変調によるデータ消去、および半導体レーザの注入同期<sup>3</sup> 発振による位相同期連続光の生成を、フィードバックループ内に組み込んだ光キャリア抽出方式を四位相偏移変調 (QPSK) 信号からのキャリア抽出とホモダイン検波に適用する[12]。図 1 に、提案するキャリア抽出/ホモダイン検波回路の概略を示す。



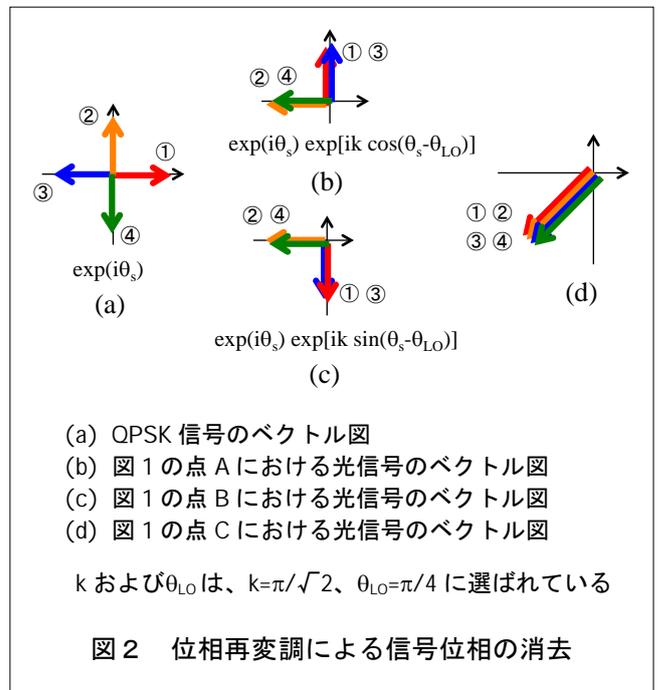
この回路では、90°光ハイブリッドと平衡検波器で検出した同相検波出力と直交位相検波出力のそれぞれを用いて、2 電極マッハツェンダー変調器 (MZM) の各アームを通過する光を位相変調する。各アームの位相

変調量は、それぞれ  $k \cos(\theta_s - \theta_{LO})$  および  $k \sin(\theta_s - \theta_{LO})$  となるので、2 つの位相変調器出力点 A および点 B における光の複素振幅は、それぞれ、

$$\exp(i\theta_s) \exp[ik \cos(\theta_s - \theta_{LO})] \quad (1)$$

$$\exp(i\theta_s) \exp[ik \sin(\theta_s - \theta_{LO})] \quad (2)$$

となる。ただし、 $\theta_s$  ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  のいずれかの値をとる) は信号光の位相、 $\theta_{LO}$  は LO 光の位相である。また、 $k$  は信号光および LO 光の振幅、平衡検波器の応答度、検波器出力を増幅する増幅器の利得、位相変調器の変調特性で決まる定数である。ここで、 $k = \pi/\sqrt{2}$ 、 $\theta_{LO} = \pi/4$  とすると、点 A および点 B における位相再変調された光信号のベクトル図は、図 2(b)、2(c) のようになる。したがって、点 A の光に  $\pi/2$  の位相シフトを与えて 2 つの光を合波すると、合波された光の位相は  $\theta_s$  の値に関わらず  $5\pi/4$  となり、位相変調が消去される (図 2(d))。位相変調が消去されキャリア成分が回復された光を注入同期半導体レーザに入力し、キャリア成分と周波数が等しく位相同期したレーザ光を出力光として取り出すことで LO 光が生成される。



上で述べた位相変調消去が成立するためには、局部発振光の位相  $\theta_{LO}$  を  $\pi/4$  (または  $-\pi/4$ ) に安定化する必要がある。図 1 の 2 電極 MZM 出力の光信号振幅は

# 光電気変換型コヒーレント光信号再生の研究

## Study on Opto-Electronic Coherent Signal Regeneration

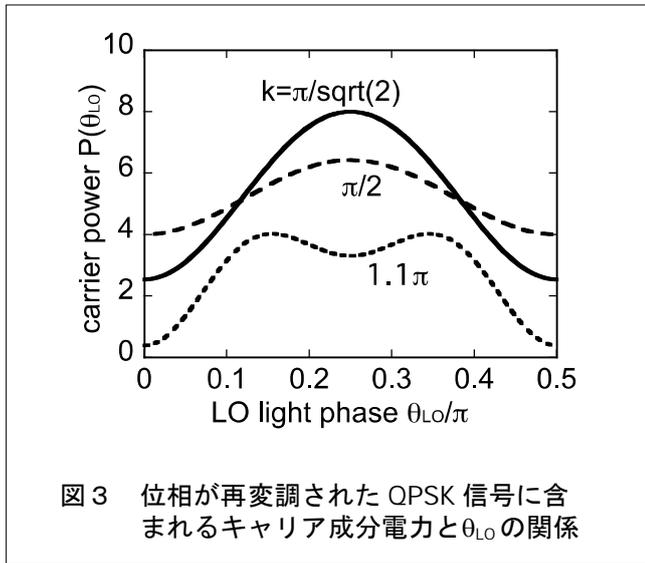
$$E(\theta_s, \theta_{Lo}) = \exp(i\theta_s) \{ i \exp[ik \cos(\theta_s - \theta_{Lo})] + \exp[ik \sin(\theta_s - \theta_{Lo})] \} \quad (3)$$

で与えられ、この信号のキャリア成分の電力は、QPSK 信号の位相偏移の値が等確率で  $0, \pi/2, \pi$ , または  $3\pi/2$  となるとき

$$P(\theta_{Lo}) = |E(0, \theta_{Lo}) + E(\pi/2, \theta_{Lo}) + E(\pi, \theta_{Lo}) + E(3\pi/2, \theta_{Lo})|^2 = [\sin^2(k \cos \theta_{Lo}) + \sin^2(k \sin \theta_{Lo})] \quad (4)$$

に比例する。

図 3 に、 $k$  をパラメータとした場合の  $P$  と  $\theta_{Lo}$  の関係を示す。 $k \leq \pi$  のとき、 $\theta_{Lo} = \pm\pi/4$  において  $P$  が最大になる。 $k = \pi/\sqrt{2}$  のときは、 $\theta_{Lo} = \pm\pi/4$  において  $P$  が最大になると同時に QPSK データ変調が完全に消去される。したがって、 $k = \pi/\sqrt{2}$  として 2 電極 MZM 後のキャリア成分電力が最大になるように LO 光位相  $\theta_{Lo}$  を制御することによって、変調雑音を含まないキャリア光成分が注入同期レーザ (ILLD) に注入され、光源光と位相同期した LO 光を発生させることができる。



### 3. 光 QPSK 信号からのキャリア抽出とホモダイン検波の実験

2 節で述べた方法に従って、QPSK 信号からのキャリア抽出/ホモダイン検波の実験を行った[12]。速度 10 Gbaud、デューティー比 50 % の RZ-QPSK 信号の光スペクトルを図 4(a)に示す。この RZ-QPSK 信号に対して、2 電極 MZM で位相再変調を加えた後の光信

号のスペクトルを図 4(b)に示す。位相データの除去は、不完全であるが、キャリア成分がある程度回復していることがわかる。この信号が ILLD に注入されて、LO 光が生成される。

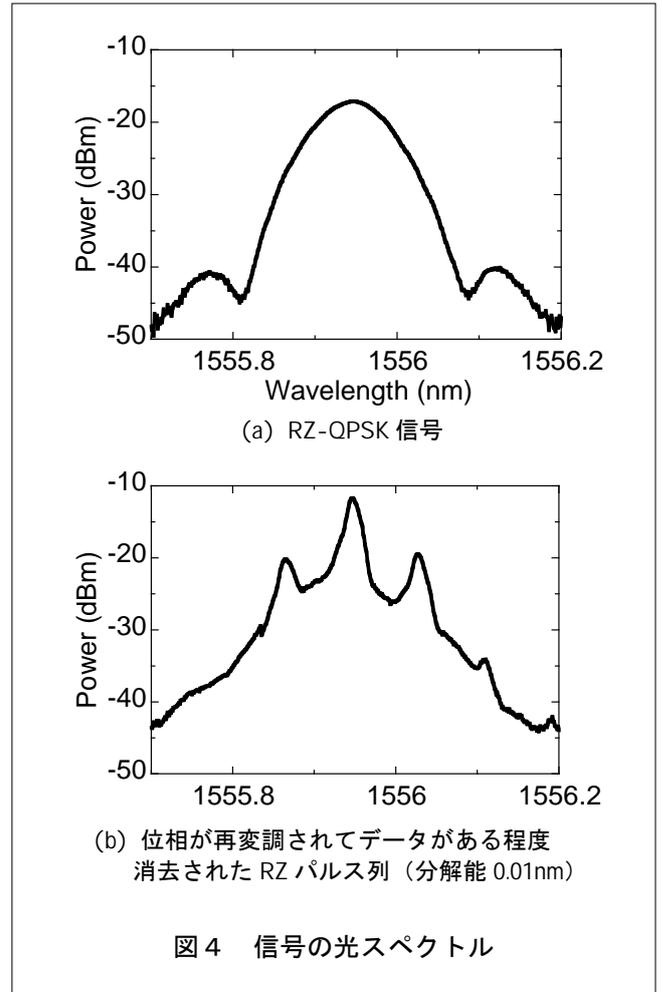


図 5 は、2 つの平衡検波器から出力される同相信号と直交位相信号のアイパターンである。短い時間内では、アイが開き、正しいホモダイン検波出力が得られることがわかる。しかしながら、QPSK 信号からの位相データ除去が完全に行えておらず、長時間にわたる安定な LO 光生成とホモダイン検波を達成することが困難であった。安定なキャリア抽出/ホモダイン検波を行うためには、できる限り正確な位相逆変調を行い、ILLD に注入される信号に混入する変調雑音を小さくするとともに、ILLD にも制御を加え、同期引き込み範囲を広げることが有効であると考えられる。

# 光電気変換型コヒーレント光信号再生の研究

## Study on Opto-Electronic Coherent Signal Regeneration

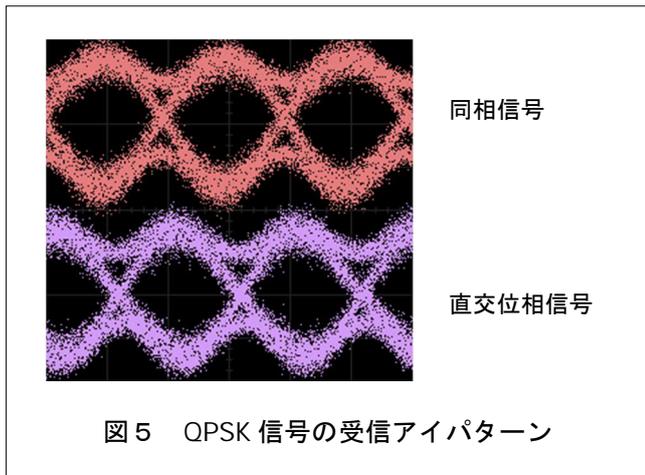


図5 QPSK 信号の受信アイパターン

### 4. 光 QPSK 信号のコヒーレント信号再生

3 節で述べたキャリア抽出においては、光キャリアの生成と同時に2つの直交振幅成分(IおよびQ成分)がホモダイン検波されて、電気信号として出力される。これらのデータに含まれる振幅揺らぎ、すなわち雑音をリミティング増幅器<sup>4</sup>で除去した後、この電気信号によって光直交振幅 (IQ) 変調器を駆動し、光キャリアを変調することによって再生光信号が得られる。リミティング増幅器は、正負2レベルの電圧の雑音を除去するので、本構成によって光 QPSK 信号再生が実現される。再生器の構成を図6に示す。リミティング増幅器を用いた光電気変換型信号再生については、ホモダイン検波ではなく、遅延検波によって光信号を電気信号に変換する構成に関して実験を行なった。10 Gbaud の差動四位相偏移変調 (DQPSK) 信号伝送において、リミティング増幅器を用いた雑音除去により受信感度が 8 dB 向上することを確認した[13]。

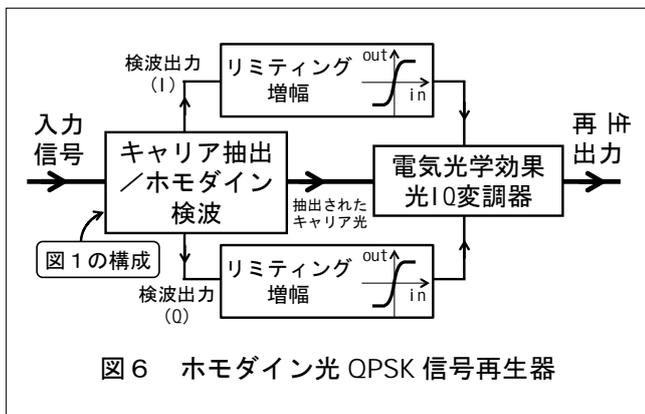


図6 ホモダイン光 QPSK 信号再生器

### 5. おわりに

高速 ADC、DAC および電気信号領域での高速デジタル信号処理 (DSP) を用いないコヒーレント光信号伝送は、信号劣化補償や信号多重分離の性能に限りがあるものの、消費電力やコストを抑制したシステムを作ることに適している。本研究では、ADC、DAC および DSP に頼らない電気光変換型コヒーレント信号再生器の実現をめざして、QPSK などの光多値信号からのキャリア抽出と、ホモダイン検波方式の検討を行った。このキャリア抽出/ホモダイン検波器と、リミティング増幅ならびに光 IQ 変調器を組み合わせることによって、光 QPSK 信号再生器を組み立てることができることを示した。

本研究では、単一偏波の QPSK 信号のホモダイン検波を取り扱ったが、光領域での偏波追跡と組み合わせることで偏波多重伝送に適用させることが必須である。4 値を超える多値度の変調形式の信号からの雑音除去への拡張なども含めて課題は多いが、最小限のアナログ電気信号処理を用いた低エネルギー消費で、コンパクトなコヒーレント信号伝送/処理方式の開発には意義があると考えられる。

### 用語解説

#### \*1 コヒーレント光受信

変調された光信号に参照光を加えたのちに信号強度を検出する受信方法。光信号の位相を読み取ることができる。光信号の搬送波 (キャリア) 周波数と参照光の周波数が等しい場合はホモダイン検波、光信号の搬送波周波数と参照光の周波数差が光信号の帯域幅よりも大きい場合はヘテロダイン検波と呼ばれる。

#### \*2 周波数利用効率

情報伝送速度 (ビット速度) を信号が占有する周波数スペクトル幅で除した値。bit/s/Hz という単位で表される。

#### \*3 半導体レーザの注入同期

半導体レーザに外部から光を入力した場合に、レーザ発振光の周波数が入力光の周波数と一致する現象。周波数の引き込みが生ずる周波数範囲は、外部から注入される光の電力の大きさに依存する。

# 光電気変換型コヒーレント光信号再生の研究

## Study on Opto-Electronic Coherent Signal Regeneration

### \*4 リミテイング増幅器

入力信号の大きさが正負両方向にある値以上になると、出力信号の大きさが一定となる特性を持つ増幅器

### 参考文献

- [1] P. J. Winzer and D. T. Neilson, "From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade", *J. Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 5, pp. 1099-1115 (2017).
- [2] J. Kakande, R. Slavík, F. Parmigiani, P Petropoulos, and D. Richardson, "All-optical regeneration of phase encoded signals: Phase sensitive optical regeneration", *Optical Fiber Telecommunications VI A*, I. Kaminow, T. Li, and A. E. Willner Eds., ch. 16, pp. 589-639 (2013).
- [3] L. Li, P. G. Patki, Y. B. Lwon, V. Stelmakh, B. D. Campbell, M. Annamalai, T. I. Lakoba, and M. Vasilyev, "All-optical regenerator of multi-channel signals", *Nat. Commun.*, vol. 8, article #884 (2017).
- [4] P. Guan, F. Da Ros, M. Lillieholm, N. -K. Kjølner, H. Hu, K. M. Røge, M. Galili, T. Morioka, and L. K. Oxenløwe, "Scalable WDM phase regeneration in a single phase-sensitive amplifier through optical time lenses", *Nat. Commun.*, vol. 9, article #1049 (2018). では毎秒 10 ギガビットのバイナリ位相変調光信号を 50GHz の周波数間隔で 16 波長チャンネルを多重した光信号の一括位相雑音除去方式の提案と実験が報告されている。しかしながら、群速度分散を有する実際の光ファイバ伝送系への適用可能性や、多値変調信号再生への拡張は検討されていない。
- [5] K. Kikuchi, "Fundamentals of coherent optical fiber communications", *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 157-179 (2016).
- [6] N. Nambath, R. K. Raveendranath, D. Banerjee, A. Sharma, A. Sankar, and S. Gupta, "Analog domain signal processing-based low-power 100-Gb/s DP-QPSK receiver", *J. Lightwave Technol.*, vol. 33, no. 15, pp. 3189-3197 (2015).
- [7] J. K. Perin, A. Shastri, and J. M Kahn, "Design of low-power DSP-free coherent receivers for data center links", *J. Lightwave Technol.*, vol. 35, no. 21, pp. 4650-4662 (2017).
- [8] S. Norimatsu, K. Iwashita, and K. Noguchi, "10 Gbit/s optical PSK homodyne transmission experiments using external cavity DFB LDs", *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 648-649 (1990).
- [9] S. K. Ibrahim, S. Sygletos, R. Weerasuriya, and A. D. Ellis, "Novel real-time homodyne coherent receiver using a feed-forward based carrier extraction scheme for phase modulated signals," *Opt. Exp.*, vol. 19, no. 9, pp. 8320-8326 (2011).
- [10] I. Kim, K. Croussore, X. Li, and G. Li, "All-optical carrier synchronization using a phase-sensitive oscillator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 13, pp. 987-989 (2007).
- [11] R. Slavík, J. Kakande, and D. Richardson, "Feed-forward true carrier extraction of high baud rate phase shift keyed signals using photonic modulation stripping and low-bandwidth electronics," *Opt. Exp.*, vol. 19, no. 27, pp. 26594- 26599 (2011).
- [12] M. Matsumoto and R. Nishimura, "Optical carrier extraction from carrier-less phase modulated optical signals", *IEICE Electronics Express*, vol. 12, no. 24, article #20150913 (2015).
- [13] M. Matsumoto, "Simple DQPSK signal regenerator using electrical limiting amplifier", *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 6, article #7802313 (2015).

この研究は、平成 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 28 年度に実施されたものです。