# デジタルコヒーレント方式物理暗号光通信

代表研究者 谷澤 健 玉川大学 量子情報科学研究所 准教授

### 1 研究の背景と目的

情報通信におけるセキュリティの担保は, IoT に代表される超情報化社会において喫緊の課題である.大容量・長距離の情報通信を支える光ファイバ通信システムにおいても,近年は,セキュリティの重要性が高まってきている.光ファイバ伝送路では,タッピング(一部の光パワーを分岐・観測すること)により,光信号が盗聴される危険性が潜在的に存在する.暗号技術を導入することが一つの解決策となる.

光の量子雑音(ショット雑音)の存在により安全性を担保する光ファイバ通信向けの物理暗号が 2000 年初 頭に提案された[1].この暗号は、アルファ・エータ(αη)[2],Y-00 光通信量子暗号[3]等と呼ばれている(以 下,Y-00 暗号と呼ぶ).図1に示すように、この暗号は、あらかじめ共有した短い鍵を用いて送りたいデー タ(平文)を直接暗号化する方式である.具体的な暗号化の方法としては、鍵の情報に基いて光の位相と振 幅、もしくはその一方をシンボル毎に「極めて」多値に変調(ランダム化)する.鍵を共有する正規の受信 者はこの多値変調信号をデータ変調に戻して平文を正しく受信・復調できる.一方で、鍵を持たない非正規 の受信者は、多値変調信号を受信する必要があるため、受信時に生じるショット雑音の影響により正しい受 信・復調ができない.つまり、鍵なしでは暗号化された光信号を正しく受信することができないことを特徴 としており、タッピングに対して有効な暗号化である.Y-00 暗号は、チャネル当たり Gbit/s 以上の伝送速 度、1,000km 級の伝送距離、古典システムと同様の波長多重化を実現できるため、既存の光ファイバ通信シ ステムと非常に相性が良い.



図1:Y-00暗号のシステム構成概要

Y-00 暗号は、光の位相を多値化してランダム化する位相変調 (PSK) 方式[2], [4], [5] 光の強度(振幅)を ランダム化する強度変調(IM) 方式[6]-[8],その両方を用いる直交振幅変調(QAM) 方式[9]-[11]にて実現する ことができる.本研究では、長距離の伝送に有利である PSK 方式の Y-00 暗号に焦点をあてる.PSK 方式の Y-00 暗号は、 (4) につて-12(622 Mbit/s)の伝送速度で 250-kmの伝送距離にて実験実証された[4]. この実験で は、鍵の情報に基いて暗号化とは逆の位相回転を施す復号化が、位相変調器を用いて光領域で実現されてい る.その後、差動の IQ 測定後にデジタル領域で復号化を行うシステムが、2.66Gbit/s のビットレートで実 証されている[5].最近、我々は、イントラダインのコヒーレント受信とデジタル信号処理を組み合わせる、 所謂、デジタルコヒーレント方式を利用して PSK Y-00 暗号を実現する方法を提案し、シミュレーションにて 10Gbit/s の伝送速度における検証を行った[12].

本研究では、デジタルコヒーレント方式との融合の核となる受信側のデジタル信号処理に焦点をあて、(a) 通信の安定化を実現するキャリア位相推定と(b)伝送により生じる波形歪を補償する波形等化を実験的に検 証することを目的とする.具体的には、以下の3つの課題に取り組む.

① シミュレーションによるキャリア位相推定方式の比較・検討

暗号のデジタルコヒーレント受信の数値シミュレーションを構築する.フィードフォワード型とフィードバック型の位相推定について暗号のデジタル復号化との関係を含めて検討し,最適な方式を確立する.

② シミュレーションによる波形等化方式の比較・検討

先のシミュレーションに波形等化を追加し,前段と後段で,周波数領域等化と時間領域等化,またその併用 など,どのような波形等化技術が適しているかを比較・検討する.特に前段の波形等化は暗号化された信号 に用いるという点に着目して検討を進める.

3 10Gbit/s 伝送実験による実験実証

10Gbit/s 位相変調方式の Y-00 暗号を実際に発生し、①②で検討した信号処理を用いてデジタルコヒーレン ト受信を行う. 信号処理の導入による通信性能の改善を評価する.

### 2 Y-00 光通信量子暗号

### 2-1 原理

PSK Y-00 暗号は、通常の M-ary PSK データ変調の位相を鍵の情報に従ってシンボル毎にランダムに回転す ることで実現される.以下、簡単のために M=2 である BPSK 変調をデータ変調として採用した場合の動作原理 を示す.(本稿で紹介する実験についてもデータ変調としては BPSK を採用している.)図 2 に暗号化されたシ ンボル点の IQ 平面での配置を示す.ここで、基底(basis)という概念を導入する.基底は IQ 平面においてあ る基準位相から位相がπ離れた信号のペアであり、BPSK 変調ではこの信号をデータの 0 と 1 に割り当てる. 基準位相は 0<sup>~</sup>πの間で任意に決めることができる.Y-00 暗号では、図に示すようにこの基準位相を等間隔に 2m 個用意する.「データ変調の位相を鍵の情報に従ってシンボル毎にランダムに回転する」ということは、 「シンボル毎に 2<sup>m</sup> 個の中からランダムに 1 つの基底を選んで BPSK 変調を行う」ということに対応する.そ の結果、コンスタレーションは 2<sup>m+1</sup> PSK 信号となる.m が十分に大きい場合、拡大図に示すように、ショッ ト雑音の広がり角度 Δφ<sub>shot</sub> が隣接するシンボル間角度 Δθ<sub>basis</sub> より大きくなり、受信時に避けられないショット 雑音により観測した信号に不確定性が生じる.これをショット雑音によるマスキングは、送信端直後でのタッピングにも有効、 真にランダムかつ除去できない(理論的に保証)という点において非常に重要である.



図 2: PSK Y-00 暗号における雑音マスキング

### 2-2 光位相のランダム化による暗号化

Y-00 暗号は,例えば,マッハツェンダ変調器で BPSK 変調を行い,その後段で位相変調器により位相を回転することで発生する.ショット雑音によるマスキング効果は,mが大きいほど大きくなる.つまり,位相変調器を駆動するデジタル・アナログ変換(DA変換)の分解能のビット数は大きいほど良い.しかしながら,DA変換のビット数とアナログ変調帯域にはトレードオフの関係があり,10Gbaudの変調に用いられるDA変換のビット数は10ビット程度である.そこで,より大きなマスキング効果を得るために,粗密位相ランダマイズ法を提案する.

図3に粗密位相ランダマイズ法の構成と動作原理を示す.マッハツェンダ変調器にて BPSK 変調を行い,後 段の2つの位相変調器で粗な位相回転 $\theta_{basis_c}$ と密な位相回転 $\theta_{basis_f}$ を組み合わせて目標とする位相回転 $\theta_{basis}$ を 実現する.それぞれの変調器を駆動する電気信号(電圧)は,疑似乱数発生器(PRNG)とマッパーからなる Y-00 数理暗号化部と DA 変換器から供給される.暗号化部では,典型的には 256 ビットの鍵が PRNG によって現実 的に繰り返しが生じない長さ,例えば 2<sup>256</sup> ビットに伸長され,その疑似乱数からシンボル毎に基底が選択さ れる.選択された基底とマッパーから位相回転量 $\theta_{basis}$ が決まる.それが粗な回転量 $\theta_{basis_c}$ と密な位相回転 $\theta_{basis_f}$ に分離され,対応する電気信号が出力される.粗な位相回転として K ビット(2<sup>K</sup>の位相レベル),密な位相回 転として L ビット(2<sup>L</sup>の位相レベル)が用意され, DA 変換の出力をそれぞれのピーク・ピーク位相回転量 $\theta_{pp_PM-1}$ と $\theta_{pp_PM-2}$ が以下の式を満たすように調整する.

$$\theta_{\rm pp\_PM-1} = \pi \left( 1 - \frac{1}{2^K} \right) \tag{1}$$

$$\theta_{\rm pp\_PM-2} = \frac{\pi}{2^{K}} \left( 1 - \frac{1}{2^{L}} \right) \tag{2}$$

このとき, m=K+L となり, 2<sup>K+L</sup>のレベルの位相のランダム化が実現できる. 例えば, K=L=8 とすることで, 8 ビットの DA 変換で 2<sup>16</sup>の基底数の Y-00 暗号を発生させることができる. なお, 前段の BPSK 変調について は, Y-00 数理暗号発生部でデータの極性がランダム化されている.



図 3: 粗密位相ランダマイズ法による PSK Y-00 暗号の発生

### 2-3 デジタル信号処理

暗号は、90度光ハイブリッド光回路とフリーランの局発光を用いたイントラダイン方式で受信される.典型的なデジタルコヒーレント受信器の構成と全く同一である.その後,デジタル信号処理により,波形等化,暗号の復号化,データの復調を行う.図4に信号処理のブロック図を示す.入力は,偏波・位相ダイバーシティコヒーレント受信器で得られる両偏波の信号の電界と正規受信者に共有されている鍵である.まず,有限インパルス応答(FIR)フィルタによって分散補償を行う[13].その後,偏波処理を行う.単一偏波の場合は,SOP法により偏波を調整する[14]. 偏波多重の場合は,バタフライ構成のFIRフィルタを CMA にて収束させることで偏波分離を行う.次に,鍵と送信側と同一のY-00数理暗号化部を用いてシンボル毎の位相回転角を のbasis 得て, exp(-jθbasis)を乗じる,つまり,位相の逆回転を与えることで暗号の復号化を行う.最後に累乗法によるキャリア位相推定を行い[15],データを復調する.本研究では,特に初段の分散補償とキャリア位相推定について,詳細な検討と実験での実証を行う.



図 4: Y-00 暗号受信のためのデジタル信号処理フロー

# 3 シミュレーション

# 3-1 シミュレーションの構築

実験にてターゲットとする 10Gbaud/s の数値シミュレーションを MATLAB 環境で構築して,受信信号処理の

動作を比較・検証した. AWGN チャネルを仮定した. また、レーザ線幅 $\delta f$ は 100kHz として、T=1/(baud rate)の間に変動するキャリア位相は、分散 $\sigma^2 = 2\pi\delta f T$ のガウス分布に従うと仮定した.

#### 3-2 キャリア位相推定方式の比較・検討

雑音マスキングによる位相変調方式の物理暗号をデジタルコヒーレント方式で受信するためには、時々 刻々と変動するキャリアの位相変動に追尾するためのキャリア位相推定技術が必要である.その候補となる フィードフォワード型とフィードバック型の信号処理について調査を行った.暗号のデジタル領域での復号 化との関係を含めて仔細に検討した結果、復号化の後段にてフィードフォワード型を採用することとした. この方式は、受信した信号の電界をデータ変調の次数 M 乗することで、データ変調の位相変化をキャンセル してキャリア位相の変動を取り出すという方式である.ビタビ・ビタビ位相推定とも呼ばれている.構築し た数値シミュレーション環境にて、暗号の復号化とフィードフォワード型の位相推定の組み合わせの有用性 を確認した.また、この方式を受信 SNR があまり高くない状態で使うには、キャリア位相の変動がシンボル レートに対して十分に遅いという仮定の下、平均化を行う必要があるため、暗号の復号化は位相推定の前段 で行う必要があるという知見を得た.

#### 3-3 波形等化方式の比較・検討

長距離・高速の光ファイバ通信では、光ファイバの波長分散による波形歪を等化する必要がある. デジタ ルコヒーレント方式の一つの特徴は、この等化を受信後のデジタル信号処理として実施できる点にある. 位 相変調方式の Y-00 暗号でもこれを導入する検討を行った. 先に提案した暗号の復号化とキャリア位相推定処 理の前段に有限インパルス応答フィルタを配置し、波長分散の逆特性を与えることで歪の補償を実現できる. シミュレーションにより、波長分散による歪を補償できることを確認した. また、周波数領域と時間領域の フィルタの比較を行い、波形歪の補償の特性面では相違がないこと、および、光ファイバ伝送路が長く補償 する波長分散量が大きい場合には、信号処理に要する時間が周波数領域でのフィルタのほうが短くなること を確認した.

#### 4 実験

### 4-1 10-Gbit/s の暗号化・復号化実験によるキャリア位相推定の実証

はじめに、10Gbit/sのPSK Y-00 暗号の暗号化・復号化の実験を行い、キャリア位相推定の有効性を示し た.図5に実験系を示す.オフラインで実装されるY-00数理暗号化部に、PRBS データと鍵を入力して暗号 化を行った.これをDA変換として用いる10Gsample/sの任意波形発生器(AWG)に入力して、対応する電圧 を発生した.AWGからの出力電圧を増幅器とアッテネータを用いて適切に調整して、粗密位相ランダマイズ 法のための3つの変調器を駆動した.可変波長レーザからのコヒーレント光は、まずマッハツェンダ変調器 によりBPSK変調される.その後、一段目と二段目の位相変調器にて、それぞれ6ビット、8ビットの分解能 で位相をランダム化する.こうして2<sup>16</sup>の基底のY-00暗号を発生させた.最初の段階では、キャリア位相推 定のみを実験検証するために、光ファイバ伝送路のない状態(所謂、バック・トゥー・バック構成)にて実 験を行った.可変アッテネータとエルビウム添加光ファイバアンプ(EDFA)によって、受信 OSNRを調整した. 受信では、フリーランの可変波長レーザを局発光として用いて、90度光ハイブリッド回路とバランスディテ クタにより、イントラダイン受信を行った.リアルタイムオシロスコープにて波形を取り込み、オフライン にて2.3.にて示したデジタル信号処理のうち波形等化である分散補償以外の処理を行った.

図6に実験の結果を示す.(a)の上段は暗号の復号化とキャリア位相推定前の受信コンスタレーションである.位相がランダム化されてコンスタレーションがドーナツのような形状であることがわかる.(a)の下段は, デジタル信号処理により暗号の復号化とキャリア位相推定を行った後のコンスタレーションである.デジタ ル信号処理が正しく動作して BPSK のコンスタレーションが回復している様子が確認できる.(b)には,受信 OSNR を変化させたときの BER の測定結果を示している.基底数の異なる Y-00 暗号 (2<sup>10</sup> と 2<sup>16</sup>)の結果に加え て,リファレンスとして同じビットレートで暗号化を行っていない BPSK 信号の測定結果も示している.この 結果より,暗号化と復号化によって生じる OSNR のペナルティはない,つまり,完全な暗号の復号化と復調が できていることを示している.さらに,基底数を変化させても信号品質に変化がないことも実験的に確認で きた.



図 5: 10-Gbit/s PSK Y-00 暗号の暗号化・復号化の動作実証のための実験系



図 6: キャリア位相推定の実験結果(a) コンスタレーション, (b) BER 特性

# 4-2 10-Gbit/sの Y-00 暗号の 400km 伝送による波形等化(分散補償)の実証

次に、10Gbit/sのPSK Y-00 暗号の伝送実験を行い、キャリア位相推定に加えて波形等化の有効性を実験 的に示した. 図7 に実験系を示す.オフラインで実装される Y-00 数理暗号化部に、PRBS データと鍵を入力 して暗号化を行った.これをDA 変換として用いる 10Gsample/sの任意波形発生器(AWG)に入力して、対応 する電圧を発生した.AWG からの出力電圧を増幅器とアッテネータを用いて適切に調整して、粗密位相ラン ダマイズ法のための 3 つの変調器を駆動した.可変波長レーザからのコヒーレント光は、まずマッハツェン ダ変調器により BPSK 変調される.その後、一段目と二段目の位相変調器にて、それぞれ6ビット、8ビット の分解能で位相をランダム化する.こうして発生した2<sup>16</sup>の基底の Y-00 暗号は、可変アッテネータでパワー を調整されたのちに光ファイバリンクを伝送する.光ファイバリンクは100km のシングルモード光ファイバ とエルビウム添加光ファイバアンプ(EDFA)により構成される.つまり、100km の伝送と増幅が繰り返される ようなリンクとなっている.今回は、伝送距離として400kmとした.受信では、フリーランの可変波長レー ザを局発光として用いて、90 度光ハイブリッド回路とバランスディテクタにより、イントラダイン受信を行 った.リアルタイムオシロスコープにて波形を取り込み、オフラインにて2.3.にて示したデジタル信号処理 を行った.

図8に実験の結果を示す.(a)の上段は伝送距離がない場合において,暗号の復号化とキャリア位相推定の 前の受信コンスタレーションである.位相がランダム化されてコンスタレーションがドーナツのような形状 であることがわかる.(a)の下段は,伝送距離がない場合において,デジタル信号処理により暗号の復号化と キャリア位相推定を行った後のコンスタレーションである.次に,(b)の上段は400-kmの伝送後に分散補償 のために波形等化を行った後のコンスタレーションである.波形等化を行うことで(a)の上段,つまり伝送距 離がなく分散の影響を受けていないときと同等のコンスタレーションが得られることがわかる.(b)の下段に は、波形等化後にさらに暗号の復号化とキャリア位相推定を行ったコンスタレーションを示す.デジタル信 号処理が正しく動作して BPSK のコンスタレーションが回復している様子が確認できる.(c)には、受信 OSNR を変化させたときの BER の測定結果を示している.基底数 2<sup>16</sup>の Y-00 暗号において伝送距離が 0 の場合と 400km の場合の結果に加えて、リファレンスとして同じビットレートで暗号化を行っていない BPSK 信号の測 定結果も示している.3 つのカーブに大きな違いは見られない.これは、光ファイバを伝送後でも適切な波 形等化を含むデジタル信号処理が実施されれば、OSNR のペナルティのない暗号通信が可能であることを示し ている.





図 8: 400-km 伝送実験の結果(a) 伝送距離無しのコンスタレーション, (b) 400-km 伝送後のコンスタレー ション, (c) BER 特性

# 4-3 10-Gbit/sの Y-00 暗号の実敷設光ファイバ 240km 伝送

4-2 における光ファイバ伝送路は、比較的安定した環境である実験室内に置かれた光ファイバスプールで あった.ここでは、温度や振動等の環境変動がある光ファイバ回線においても10Gbit/sのPSK Y-00 暗号の 伝送ができることを実証するために、実験を大学内に実際に敷設された240-kmの光ファイバ回線を用いて伝 送実験を行った.図9に実験系を示す.オフラインで実装されるY-00数理暗号化部に、PRBS データと鍵を 入力して暗号化を行った.これをDA変換として用いる10Gsample/sの任意波形発生器(AWG)に入力して, 対応する電圧を発生した.AWGからの出力電圧を増幅器とアッテネータを用いて適切に調整して、粗密位相 ランダマイズ法のための3つの変調器を駆動した.可変波長レーザからのコヒーレント光は、まずマッハツ ェンダ変調器によりBPSK 変調される.その後、一段目と二段目の位相変調器にて、それぞれ6ビット、8ビ ットの分解能で位相をランダム化する.こうして発生した2<sup>16</sup>の基底のY-00 暗号は、可変アッテネータでパ ワーを調整されたのちに光ファイバリンクを伝送する.光ファイバリンクは図に示すように大学構内に実際 に敷設されているシングルモード光ファイバ回線でる.40kmのシングルモード光ファイバとエルビウム添加 光ファイバアンプ(EDFA)が6段連なる構成となっており、伝送距離は240kmとなる.受信では、フリーラン の可変波長レーザを局発光として用いて、90度光ハイブリッド回路とバランスディテクタにより、イントラ ダイン受信を行った.リアルタイムオシロスコープにて波形を取り込み、オフラインにて2.3.にて示したデ ジタル信号処理を行った.

図10に実験の結果を示す.(a)は伝送後のコンスタレーションである. 左側は,波形等化を行った後のコ ンスタレーションであり,波形等化によりドーナツ形状のコンスタレーションになる. 右側は,波形等化後 にさらに暗号の復号化とキャリア位相推定を行ったコンスタレーションを示す. デジタル信号処理が正しく 動作して BPSK のコンスタレーションが回復している様子が確認できる.(b)には,光ファイバリンクへの入 カパワーを変化させたときに信号の品質を示すQ値がどのように変化するのかを測定した結果(赤実線)で ある. 光入力パワーが増加するとQ値が上がる,つまり信号品質が改善する様子がわかる. 青実線で示され るのは,ショット雑音によりマスクされる信号数である. この値は大きいほど鍵を持たない非正規の受信者 の観測の不確定性が大きくなるため,暗号として安全になる. マスク数はQ値とは逆に光入力パワーが大き くなるにつれて小さくなる. この結果は受信した暗号の伝送品質とマスク数にトレードオフがあることを示 している. 図中には一例として硬判定の誤り訂正符号でエラーフリーを実現できるQ値の限界を示している が,必要とされる信号品質を満たす範囲において光入力パワーを下げることで,安全かつ十分な信号品質の 暗号伝送が実現できる.



図 9: 10-Gbit/s PSK Y-00 暗号の実敷設回線 240km 伝送の実験系



図 10: 10-Gbit/s PSK Y-00 暗号の実敷設回線 240km 伝送の実験系

# 5まとめと今後の展望

本助成による研究により、デジタルコヒーレント方式を PSK Y-00 暗号と融合するためのデジタル信号処理 の基盤を構築することに成功した.また、光ファイバ伝送実験の結果から、高い安全性と信号品質を両立で きる可能性を見出した.伝送距離については、本実験の範囲では 400km 程度であるが、波長分散を適切に補 償できることからこれに制限されることはなく、所用 OSNR から考えると数 1,000km の伝送が可能であると見 込まれる.また、伝送速度についても現状 10 Gbit/s であるが、偏波多重や多値データ変調の採用、さらに シンボルレートの高速化により 100Gbit/s 級の飛躍的な向上が期待できる.さらに、Y-00 暗号は波長多重が 適用できることから、高密度に波長多重を行い暗号伝送システムとして 1Tb/s など、現在商用で実運用され ている光ファイバ通信システム並みの通信容量を実現できる可能性がある.

# 【参考文献】

- 1. G. Barbosa, E. Corndorf, P. Kumar, and H. P. Yuen, "Secure communication using mesoscopic coherent states," Phys. Rev. Lett. 90, 227901 (2003).
- 2. E. Corndorf, C. Liang, G. S. Kanter, P. Kumar, and H. P. Yuen "Quantum-noise randomized data encryption for wavelength-division-multiplexed fiber-optic networks," Phys. Rev. A. 71, 062326 (2005).
- 3. O. Hirota, M. Sohma, M. Fuse, and K. Kato, "Quantum stream cipher by Yuen 2000 protocol: Design and experiment by intensity modulation scheme," Phys. Rev. A, 72(2), 022335, 2005.
- 4. C. Liang, G. S. Kanter, E. Corndorf, and P. Kumar, "Quantum Noise Protected Data Encryption in a WDM Network," IEEE Photon. Technol. Lett, 17, 1573-1575, (2005).
- G. S. Kanter, S. X. Wang, R. A. Lipa, and D. Reilly, "Self-Coherent Differential Phase Detection for Optical Physical-Layer Secure Communications," in Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper JW2A.41.
- Y. Doi, S. Akutsu, M. Honda, K. Harasawa, O. Hirota, S. Kawanishi, K. Ohhata, and K. Yamashita, "360 km field transmission of 10 Gbit/s stream cipher by quantum noise for optical network," in Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC), OWC4, 2010.
- F. Futami and O. Hirota, "100 Gbit/s (10 × 10 Gbit/s) Y-00 Cipher Transmission over 120 km for Secure Optical Fiber Communication between Data Centers," in Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2014), paper MO1A2.
- 8. F. Futami and O. Hirota, "100 Gbit/s (10 × 10 Gbit/s) Y-00 Cipher Transmission over 120 km for Secure Optical Fiber Communication between Data Centers," in Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2014), paper MO1A2.
- 9. K. Kato and O. Hirota, "Quantum quadrature amplitude modulation system and its applicability to coherent state quantum cryptography," Proc. SPIE 5893, 589303 (2005).
- 10. M. Nakazawa, M. Yoshida, T. Hirooka, and K. Kasai, "QAM quantum stream cipher using digital coherent optical transmission," Opt. Express 22, 4098-4107 (2014).
- 11. M. Yoshida, T. Hirooka, K. Kasai, and M. Nakazawa, "Single-channel 40 Gbit/s digital coherent QAM quantum noise stream cipher transmission over 480 km," Opt. Express 24, 652-661 (2016).
- 12. K. Tanizawa, F. Futami, and O. Hirota, "Digital feedforward carrier phase estimation for PSK Y-00 quantum-noise randomized stream cipher," IEICE Communications Express, 7, 1-6 (2018).
- 13. Seb J. Savory, "Digital filters for coherent optical receivers," Opt. Express 16, 804-817 (2008).
- B. Szafraniec, B. Nebendahl, and T. Marshall, "Polarization demultiplexing in Stokes space," Opt. Express 18, 17928-17939 (2010).

15. D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation," J. Lightwave Technol., 24, 12-21 (2006).

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Digital coherent PSK Y-00 quantum stream cipher with 2 <sup>17</sup> randomized phase levels	Optics Express	2019年 1月
Digital Coherent 20-Gbit/s DP-PSK Y-00 Quantum Stream Cipher Transmission over 800-km SSMF	<i>Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC 2019)</i>	2019年 3月
Digital-coherent PSK Y-00 quantum stream cipher for secure fiber-optic transmission	Proc. SPIE 10946, Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links II	2019年 2月
PSK Y-00 Quantum Stream Cipher with $2^{17}$ Levels Enabled by Coarse-to-Fine Modulation Using Cascaded Phase Modulators	44 <sup>th</sup> European Conference on Optical Communications (ECOC 2018)	2018年 9月
Digital Coherent Detection with Decryption in PSK Y-00 Quantum Stream Cipher	23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2018)	2018年 7月
偏波多重 PSK Y-00 光通信量子暗号の デジタルコヒーレント受信	電子情報通信学会 2019 年総 合大会	2019年 3月

〈発表資料〉