

# 次世代データセンタ光ネットワークを結ぶ光中継ノードにおける低消費電力光変調フォーマット変換技術に関する研究

代表研究者 小玉□崇宏 □ 山梨大学 大学院総合研究部工学域□特任助教  
共同研究者 埴 雅典□ □ 山梨大学 大学院総合研究部工学域□教授

## 1 はじめに

Fiber to the x (FTTx) サービスの更なる高速化・効率化に伴い、異種光ネットワーク間光ノードにおける通信トラヒックのボトルネックを解消するために、光短距離用ネットワークと光長距離用ネットワークを一体化したヘテロジニアスネットワークゲートウェイノード (HNGN : Heterogeneous Network Gateway Node) が求められる [1, 2]. 現在、光短距離用ネットワークでは OOK をはじめとした強度変調・直接検波方式、光長距離用ネットワークでは QPSK をはじめとする IQ 変調・コヒーレント検波方式が用いられており、HNGN ではこれらの変調方式を相互に変換するフォーマット変換技術が必要となる. 現行技術では光信号を電気信号に変換し、電気領域で変調フォーマット変換後、再び光信号に変換する方式が一般的である [3, 4]. さらに滑らかなフォーマット変換技術の実現のために、光領域で直接変調フォーマットを変換する技術が注目を集めている.

光領域での変調フォーマット変換技術の先行研究としては、光ファイバ中で発生する相互位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation) や四光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) を用いて強度変調信号を IQ 変調信号に変換する技術が既に提案されている [5, 6, 7]. また近年では、IQ 変調信号から強度変調信号への変換も報告されている [8]. これらの変調フォーマット変換方式の利点は大きく分けて2つある. 1つ目は、異なる変調フォーマットを扱う異種ネットワーク間において、変調度、シンボルレート、フレーム構成を保持してスムーズに接続できることである. 2つ目は OEO 変換時に必要となる、ドライバアンプや IQ 変調器が不要となる点である. これにより、OEO 変換と比べ低コスト化できる見込みがある.

本研究では、光領域で XPM を用いた PAM4-QPSK 変換を提案し、コヒーレント受信時の QPSK 信号に対する特性評価を行った. まず、数値シミュレーションによって、変換前の PAM4 信号に対する雑音耐性および変換後の QPSK 信号に対する雑音耐性による評価を行い、PAM4 信号に雑音を付加した場合のパワーペナルティは 2.5dB であること、QPSK 信号に雑音を付加した場合は 3.0dB であることを明らかにした. 次に、HNLF 入力パワー耐性を明らかにするため、変換後の QPSK 信号に雑音を付加した状態で HNLF 入力パワーを変化させた場合の BER 変化の評価を行い、SNR の向上に伴い HNLF 入力パワー耐性が向上することを確認した. 最後に、固定データパターンを用いて PAM4-QPSK 変調フォーマット変換の原理確認実験を行い、5GBaud, HNLF 入力パワー24dBm, BtoB の条件において BER=3.4×10<sup>-3</sup> の達成に受信パワー-34dBm が必要であり、20km 伝送時は BtoB に対し 0.5dB のパワーペナルティがあることを確認した.

## 2 PAM4-QPSK 変換の原理

図 1 に PAM4-QPSK 変換の概念図を示す. PAM4-QPSK 変換ではプローブ光と信号光の2種類が必要である. 信号光は波長 $\lambda_1$ をもつ PAM4 信号, プローブ光は波長 $\lambda_2$ をもつ連続波 (CW : Continuous Wave) を用いる. プローブ光と、十分なパワーを持つ信号光とを合波し高非線形ファイバ (HNLF : Highly Nonlinear Fiber) に入射すると、HNLF 内で XPM が発生し、信号光のもつ光強度がプローブ光の位相変化量に対応し、CW が QPSK 信号に変調される. この時、XPM による信号光のピークパワーに対する位相回転量は以下の式で表される.

$$\Delta\phi(k) = k(2\gamma_1 L_{eff} P_k) \quad (1)$$

ここで、 $k$ は信号光の光強度レベル、 $\gamma_1$ は非線形係数、 $L_{eff}$ は実効長、 $P_k$ はピークパワーを示す. また、プローブ光と信号光の波長間隔が狭い場合、クロストークの影響を受けやすい. 一方で、波長間隔が広い場合、クロストーク耐性は向上するが、群遅延差が大きくなるため XPM の実効相互作用長  $L_{eff}$  が短くなり、結果的に位相回転量が減少する. 他にも、プローブ光と信号光との間で発生する FWM などによる波長間のパワーの相互作用で生じるパワーの揺らぎに起因し、位相揺らぎを引き起こす. HNLF 通過後、光バンドパスフイ

ルタ (OBPF: Optical Band Pass Filter) によって信号光を除去し, コヒーレント検波する.

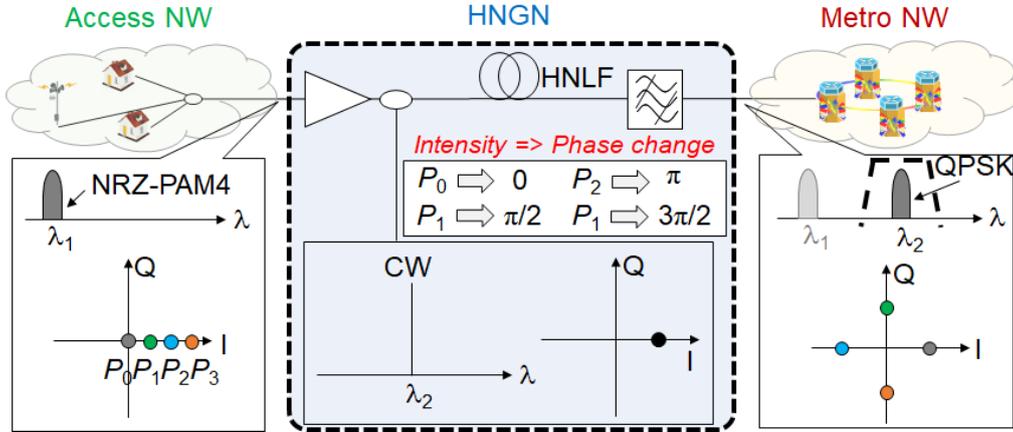


図1 PAM4-QPSK 変換の概念図

### 3 シミュレーションによる評価

#### 3-1 数値解析モデル

本数値シミュレーションでは, 光ファイバ中の光伝搬を表す式である非線形シュレディンガー方程式を用いて数値解析を行う. 非線形シュレディンガー方程式は(2)式に示す通りである. ここで,  $A$ は電界の振幅,  $z$ は伝搬距離,  $\beta_2, \beta_3$ はそれぞれ2次, 3次分散,  $T$ は正規化した時間,  $\alpha$ は損失係数,  $\gamma$ は非線形係数,  $\omega_0$ は角周波数を示す.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left( \left( -\frac{j}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2} \right) + \left( j\gamma|A|^2 + \frac{j}{\omega_0 A} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \right) A \quad (2)$$

数値解析法としてスプリットステップフーリエ法(SSFM: Split Step Fourier Method)を用いる. SSFMでは, まず(2)式を分散演算子 $\hat{D}$ と非線形演算子 $\hat{N}$ を用いて以下のように表現する.

ここで,  $\hat{D}$ および $\hat{N}$ はそれぞれ波長分散・非線形光学効果を示すパラメータである. 波長分散と非線形光学効果は, 本来同時に発生するが, SSFMではこれらを独立に扱う. さらに, これらの値が距離 $z$ に依存しない

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (3)$$

$$\hat{D} = \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2} \quad (4)$$

$$\hat{N} = j\gamma|A|^2 + \frac{j}{\omega_0 A} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \quad (5)$$

とすれば, 光が微小区間 $h$ だけ伝搬した後の振幅 $A(z+h, T)$ は以下の(6)式のように表現できる.

$$A(z+h, T) = \exp(h(\hat{D} + \hat{N}))A(z, T) \quad (6)$$

(6)式では, まず距離 $h/2$ の区間にわたり線形伝播し, 波長分散の影響のみ考慮する. 次に $h/2$ の地点で非線形光学効果を与え, 最後に残りの距離 $h/2$ の区間で再び波長分散の影響を考慮し $A(z+h, T)$ を求める. この操作を繰り返すことで, 所望の伝搬距離における光の伝搬を逐次的に計算する.

### 3-2 シミュレーションモデル

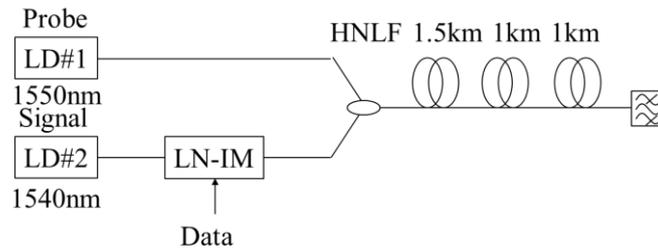


図2 PAM4-QPSK 原理確認シミュレーション構成

本節では、強度変調信号の有する強度情報をプローブ光の位相情報に転写可能かどうかを確認する。これにより数値シミュレーションの妥当性を検証した後、変調後の QPSK 信号と変調前の PAM4 信号それぞれの雑音耐性および HNLF 入力パワー変動の許容度について検討を行うことで 10GSymbol/s PAM4-QPSK 変換の特性評価を行う。

図2に数値シミュレーションモデルを、表1に SSFM に使用した HNLF のパラメータを示す。プローブ光としては中心波長 1550nm の CW、信号光としては中心波長 1540nm の PAM4 変調信号を仮定した。これらを光カプラで合波した後、全長 3.5km の HNLF を伝搬させて PAM4 信号による XPM でプローブ光の位相変調を行った。HNLF のパラメータは4章で述べる実験と同様である。今回利用する3つの HNLF のパラメータは異なる。

表1 HNLF パラメータ

	HNLF1	HNLF2	HNLF3
ファイバ長[km]	1.52	1.02	1.01
挿入損失[dB]	1.07	0.76	1.07
非線形係数[1/W/km]	10	10	10
分散パラメータ[ps/nm/km]	0.57	0.57	0.57
分散スロープ[ps/nm <sup>2</sup> /km]	0.018	0.016	0.018

### 3-3 雑音耐性

次に、PAM4 および QPSK それぞれに対する雑音耐性の評価を行う。まず変調フォーマット変換後の QPSK 信号に対して雑音を付加することで、QPSK へ変換後の雑音耐性を調査し、次に変調フォーマット変換前の PAM4 信号に対して雑音を付加することでフォーマット変換に用いる PAM4 信号に対する雑音耐性の調査を行った。また、BER を正確に測定するため4乗法による位相推定 (CPR : Carrier Phase Recovery) を実装している。数値シミュレーションの結果を図3に示す。図3(a)には変換後の QPSK 信号に雑音を付加した場合、図3(b)に変換前の PAM4 信号に雑音を付加した場合の BER 特性を示す。図3(a, b)中に示す(a)~(d)はそれぞれ対応する点のヒストグラムまたはコンスタレーションマップを示している。この時、送信シンボル数は34000 シンボルとした。図中には、比較対象として図3(a)では IQ 変調器から生成される理想的な QPSK の BER 特性を、図3(b)では強度変調器から生成される理想的な PAM4 信号の BER 特性をそれぞれ併せて示した。また、ここでは誤り訂正符号としてリードソロモン符号の使用を想定するため、図中に示す FEC limit は  $3.4 \times 10^{-3}$  を示す。図3(a)から、変調フォーマット変換により生成した QPSK 信号では、IQ 変調器で生成した QPSK 信号に比べ 3.0dB のパワーペナルティがあり、雑音耐性が低いことがわかる。この原因として、HNLF 中で発生する自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) や波長分散の影響が考えられる。これは、XPM を利用する変調フォーマット変換では低非線形係数である高非線形ファイバを長距離伝送しなければならないため、現時点では避けることができない。また、図3(b)からは変調フォーマット変換に使用する PAM4 信号に対して雑音を付加した場合、変調器を使用した PAM4 からのペナルティが 2.5dB となり、QPSK 信号に雑音を付加した場合のペナルティと比べ 0.5dB 小さくなっていることがわかる。また、コンスタレーションマップから、PAM4 信号のうち高い強度情報を転写されたシンボルほど位相方向に大きな分散が見られる。こ

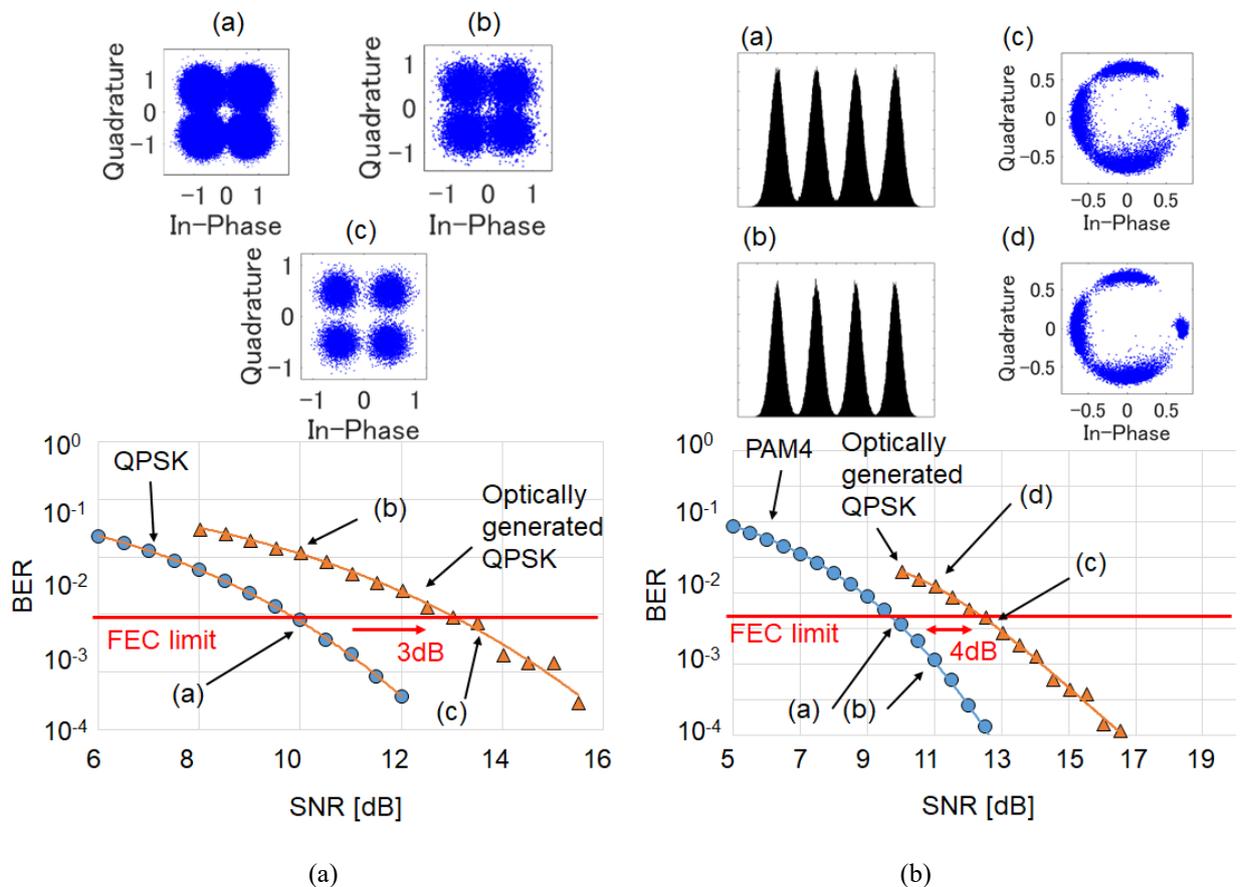


図3 SNR 対 BER  
 (a)QPSK に雑音を付加 (b)PAM4 に雑音を付加

これは非線形光学効果により PAM4 信号が歪んだことを示している。

以上のことから、変調フォーマット変換を行う場合、IQ 変調器を用いた変換に比べ、パワーペナルティが大きくなることがわかった。したがって、PAM4-QPSK 変換を行う手法には従来の OEO 変換で用いられる IQ 変調器を用いた変換に対し、パワーペナルティを許容できる状況における利用が前提となる。

### 3-3 HNLF 入力パワー耐性

本節では、HNLF 入力パワーの変動に対する耐性を検討した結果について述べる。XPM により生成した QPSK 信号に対し SNR=12, 13, 14dB となるように 3 パターンの雑音を付加し、それぞれの信号に対し HNLF 入力パワーの許容範囲を求めた。この許容度が高いほど、HNLF 入力光のパワー変動への耐性が高く、結果としてより省電力の変調フォーマット変換の実現につながるものである。数値シミュレーションの結果を図 4 に示す。

図 4 から、SNR が高いほど入力パワーの許容範囲が大きいことが明らかである。図 4(a), (b)は同程度の BER であるが HNLF 入力パワー、つまり位相回転量が異なる。(b)ではより位相回転量が小さく、それぞれのシンボル間隔は狭窄化していることがわかる。これにより BER が劣化するものの、SNR が(a)より高いことによって同程度の BER が達成されている。SNR が 12, 13, 14dB で、FEC limit を満たすようなそれぞれの許容平均入力パワーは 8mW, 21mW, 27mW であった。また、平均入力パワーが 40mW を下回った場合には、SNR に関わらず BER が急激に悪化し、SNR に関わらず BER が同じように変化することがわかる。以上の結果から、高 SNR が確保可能な通信路においては変調フォーマット変換に要する電力の更なる低減が可能となる。

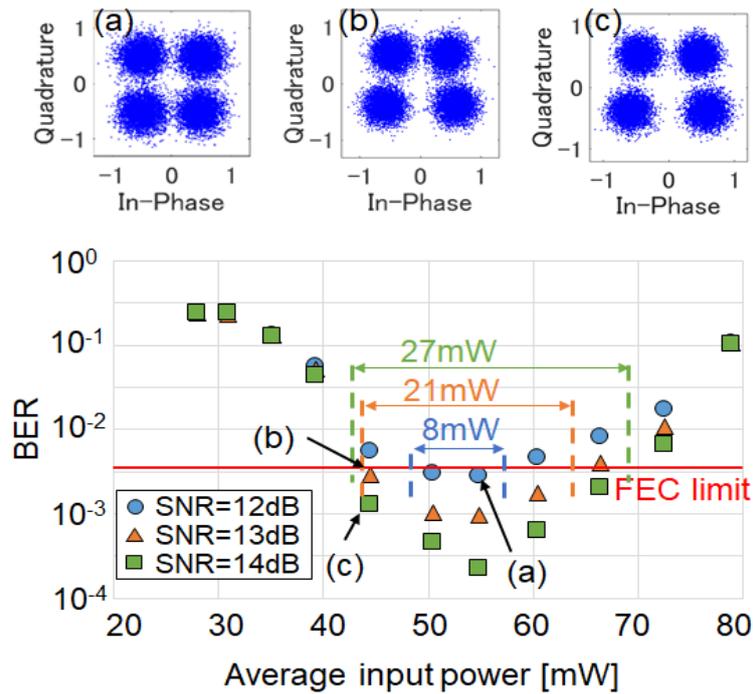


図4 HNLF 入力パワー変動に対する BER 特性

## 4 実験による評価

### 4-1 実験系

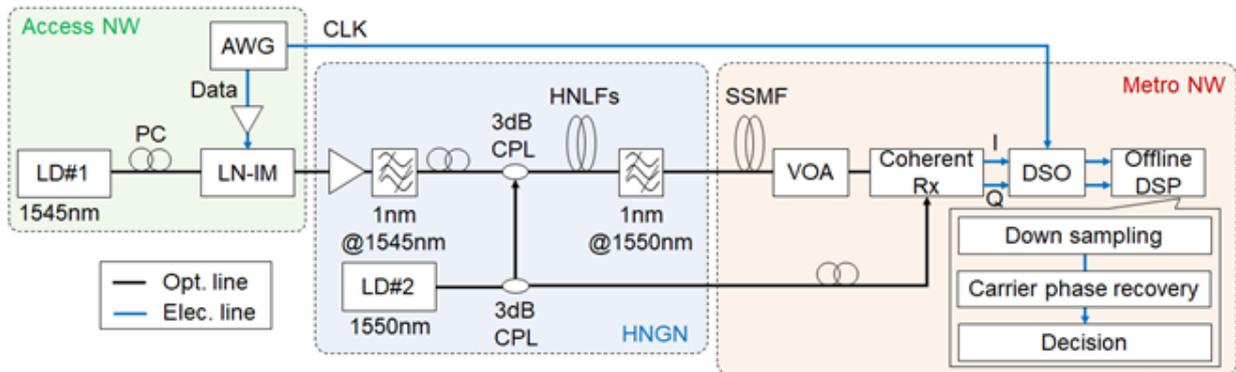


図5 実験系

図5に PAM4-QPSK 変換の実験系を示す。2つの LD (#1, #2) の中心周波数はそれぞれ 1545nm, 1550nm であり、線幅はどちらも 100kHz 程度である。LD#1 の出力光は偏波コントローラ(PC: Polarization Controller)により偏波を最適化した後に LiNbO<sub>3</sub>強度変調器 (LN-IM: Lithium Niobate Intensity Modulator) に入射される。ここで、本実験ではホモダイン検波を行うためにプローブ光と局部発振光 (LO: Local Oscillator) とを同一光源から出力する (LD#2)。電気領域では、任意波形発生器 (AWG: Arbitrary Waveform Generator, Tektronix, 7122C) からデータ信号を出力し、ドライバアンプにて増幅した後に LN-IM へ入力し信号光の変調を行う。その後、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) を用いて最適なパワーまで増幅し、プローブ光と合波させる。この混合光を HNLF へ入力し、XPM によって変調フォーマット変換を行ったのち、OBPF を用いてプローブ光のみを取得する。

受信部では、可変減衰器 (VOA: Variable Optical Attenuator) でパワーの調整を行い、局部発振光と合波した後にコヒーレント受信を行う。検出された信号はデジタルストレージオシロスコープ (DSO: Digital Storage Oscilloscope, Tektronix, 6154C) 内のアナログ-デジタル変換器 (ADC: Analog to Digital Converter) にて標本化及び量子化される。最後に、DSO で取得したデータをオフラインでダウンサンプリング、位相推定を行い BER の算出を行う。ここで、BER 算出には硬判定を使用した。

#### 4-2 強度信号に対する位相変化量の実験確認

本節では、HNLF 入力パワーと位相回転量の関係を実験的に確かめるため、OOK-BPSK 変換を行うことで PAM4-QPSK 変換に最適な HNLF 入力パワーの推定を行う。使用するデータパターンはランダムパターンをもつ OOK とし、シンボルレートは 10GHz で実験を行った。図 6 に HNLF へ入力する信号光のパワーとプローブ光の位相回転量との関係をプロットしたグラフを示す。図中のコンスタレーションマップでは、信号点が集中している箇所は色が黒く、濃くなっており、そうでない箇所は色を薄く表示している。また、図 6(b) から、入力パワーが大きい場合には各シンボルが位相方向に広がっていることがわかる。このため、信号点密度が最も高い 2 点間の位相差を位相回転量とした。(1)式から、位相回転量は入力パワーに比例するため、測定したデータ点から 1 次近似直線を算出した。この結果、PAM4-QPSK 変換に必要な平均パワー、つまり  $3\pi/2$  の位相回転量を確保するためにはおよそ 470mW 必要であることが推測された。

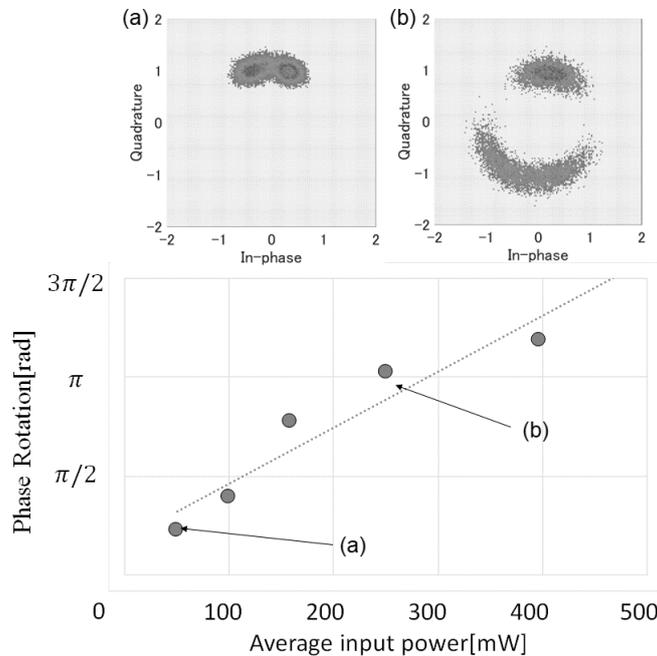


図 6 HNLF 入力パワーに対する位相回転量

#### 4-3 PAM4-QPSK 変換の原理確認実験

本節では、PAM4-QPSK 変換を行った結果について述べる。今回、SSMF として、0km(BtoB: Back to Back) および 20km の 2 パターンについて実験を行った。なお、本実験でのシンボルレートは 5GHz とし、使用した PAM4 は 1.25GHz の繰り返し周波数をもつ固定パターンである。また、信号光のパワーは 24dBm、プローブ光のパワーは 2.4dBm に設定した。

図 7 に測定した QPSK 信号の BER および受信パワー-33.5dBm におけるコンスタレーションマップ、位相のヒストグラムをそれぞれ示す。BER の算出時には、判定法として硬判定を用いた。図中において、実線は近似曲線を示している。BtoB の場合に、受信パワー-34dBm で FEC limit を達成することを確認した。また、FEC limit における 20km 伝送によるパワーペナルティは 0.5dB であった。ここから、20km の伝送による信号の劣化はほぼ存在しないといえる。しかし、本稿で行った PAM4-QPSK 変換には改善可能な点がある。本実験では前述の通り信号光パワーを 24dBm に設定したが、図 7(a), (b)を見ると、コンスタレーションマップおよびヒストグラムから 4 つの信号点の位相差が均等に分布していないことがわかる。これは HNLF 入力パワーが最適ではないことを示しており、より適した入力パワーを選択することで BER の改善を行っていく必

要があると考えられる。

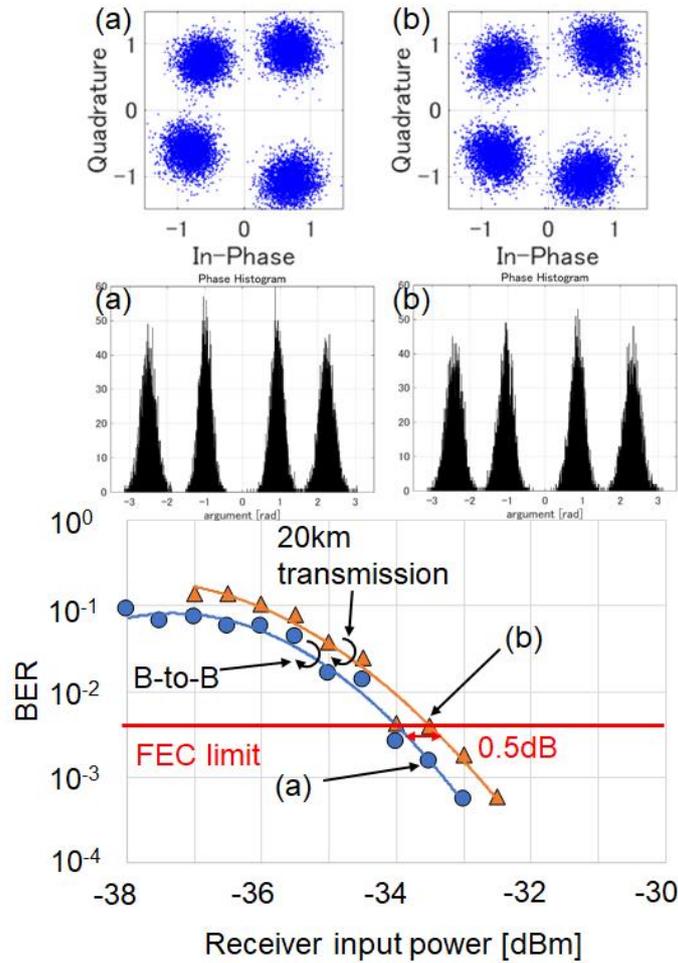


図7 PAM4-QPSK 変換後の BER 特性

## 5 まとめ

本稿では、XPM を利用した PAM4-QPSK 変換に関し数値シミュレーションおよび実験による検討を行った結果について述べた。数値シミュレーションから、QPSK へ変換後することによるパワーペナルティは 3.0dB 程度であるが、変換前の PAM4 に雑音が重畳した場合には信号が大きく劣化し、パワーペナルティが 2.5dB 程度まで増大してしまうことが確認できた。実験からは、今回はデータパターンを固定するという条件下であったものの、FEC limit を  $BER=3.4 \times 10^{-3}$  とすれば BtoB の場合で受信パワー -34dBm、20km 伝送した場合には -34.5dBm で達成することができた。

## 【参考文献】

- [1] T. Kanai et al., “Novel automatic service restoration technique by using self-reconfiguration of network resources for a disaster-struck metro-access network,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. **36**, no. 8, p. 1516, (2018).
- [2] W. Jin et al., “Scalable and reconfigurable all-optical VPN for OFDM-based metro-access integrated network,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, Vol. **32**, no. 2, p. 318, (2014).
- [3] K. Kondepu et al., “An SDN-based integration of Green TWDM-PONs and metro networks preserving end-to-end delay,” *Proc. OFC Th2A.62*, (2015).
- [4] J. Li et al., “A flexible low-latency metro-access converged network approach based on time synchronized

- TWDM-PON, ” Proc. OFC Th2A.50, (2018).
- [5] K. Mishima, et al., “NRZ-OOK-to-RZ-BPSK modulation-format conversion using SOA-MZI wavelength converter, ” J. Lightwave Technol., 24, 3751-3758, (2006).
- [6] K. Mishina et al., “All-optical modulation format conversion from on-off-keying to multiple-level phase-shift-keying based on nonlinearity in optical fiber, ” Opt. Exp., Vol. 15, no. 13, p. 8444, (2007).
- [7] G. W. Lu et al., “Format conversion of optical multilevel signals using FWM-based optical phase erasure, ” IEEE. J. Lightw. Technol., Vol. 29, no. 16, p. 2460, (2011).
- [8] A. Fallahpour et al., “Demonstration of 30Gbit/s QPSK-to-PAM4 data-format and wavelength conversion to enable all-optical gateway from long-haul to datacentre, ” Proc. OFC W2A.22, (2018).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
相互位相変調を用いた PAM4-QPSK 変調フォーマット変換の実証実験	PN 研究会	2018 年 6 月
Seamless PAM-4 to QPSK modulation conversion at gateway for short-reach and long-haul integrated networks	European Communication Optical Conference (ECOC2018)	2018 年 9 月