波長選択スイッチによる光単側波帯変調の研究開発

代表研究者　　高　野　勝　美　　山形大学　大学院理工学研究科　准教授

1 はじめに

光強度変調や光多値位相変調を通常の手法で行えば，光搬送波周波数の上下両側の周波数帯域にそれぞれ側波帯が生じる（両側波帯変調）．その２つの側波帯はともにベースバンド信号のレプリカであり，ある意味で冗長な情報伝送である．片側だけの側波帯を伝送に用いる単側波帯（SSB）変調[1]は，変調帯域幅を従来の半分にできるため，波長分割多重システムの大容量化に有望である[2]．

光ファイバ通信のトラヒック増加時に柔軟に通信容量を増やすために,光 SSB 変調の研究を行った.特に,回折格子と空間フィルタで構成される波長選択スイッチ光フィルタで光信号の両側波帯を非対称に抑圧する光 SSB 変調方式を検討した[3]．非対称にフィルタリングを施す両側波帯変調信号として，光 QPSK 変調と光 BPSK 変調に対して実験的な検証を行い，フィルタリングによる側波帯抑圧比と変調精度 EVM 値と符号誤り率を観測した．それにより，フィルタリングされた変調スペクトルと光信号品質の関係を明らかにした．あわせて光 PAM4 信号の非対称な帯域制限の効果についても理論的な検証を行った．

2 波長選択スイッチ光フィルタ

2-1 波長選択スイッチ光フィルタの特徴と構造

光両側波帯変調信号から光単側波帯変調信号を生成するには，光フィルタで片側側波帯だけを除去すればよいが，これまでの多層膜や周期構造による光フィルタでは，透過帯域の平坦性や遮断帯域の急峻性と位相特性が光単側波帯変調の信号を著しく損なうものであった．近年，光ネットワークにおける波長チャネルの挿入/分離のために,波長選択スイッチと呼ばれる回折格子と液晶反射材を組み合わせた一種の空間的光フィルタが実用化された[4]．波長選択スイッチ光フィルタの構造の模式図を図１に示す．グレーティングにより入射光を波長成分に空間的に分離し，反射素子の反射率を制御する素子により，フィルタ特性を実現する．このような構造の特徴は，光フィルタの平坦な透過特性が得られること．遮断特性に不要なサイドローブが生じないことが挙げられる．

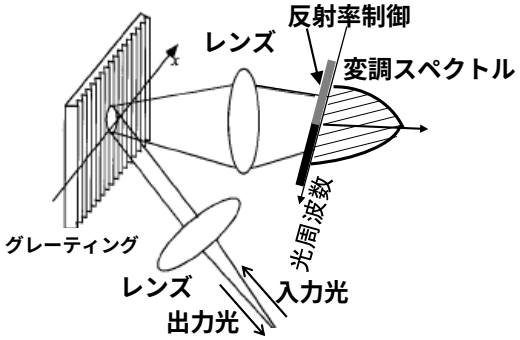


図１．波長選択スイッチ光フィルタ

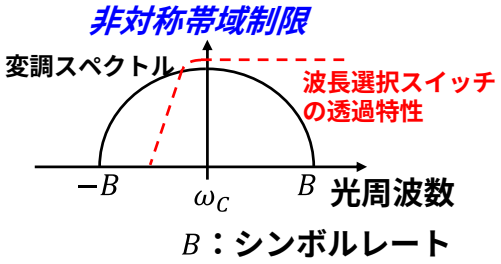


図２．光変調スペクトルの非対称帯域制限

2-2 波長選択スイッチ光フィルタを使った両側波帯信号の非対称帯域制限による光 SSB 変調

波長選択スイッチのような空間的光フィルタの特性は，光変調スペクトルの非対称な抑制に基づく光 SSB 変調のための光フィルタとして好ましい特性である．すなわち，図２に示すように，変調スペクトルの片側側波帯部分は波長選択スイッチ光フィルタの通過帯域と一致させ，抑圧したい側波帯には波長選択スイッチ光フィルタの遮断帯域とし，両側波帯変調光信号から光 SSB 変調信号を得る方法である．本研究では，このような方法について検討する．具体的には，両側波帯変調光信号として光 QPSK 信号と光 BPSK に対して波長選択スイッチ光フィルタで変調スペクトルを非対称に抑圧して光 SSB 変調信号を生成し，その信号品質を評価した．

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第35号　2020年度

2-3 波長選択スイッチ光フィルタの透過特性

実験に使用する波長選択スイッチ光フィルタの透過特性を，図３の実験系を使って評価した．光源には，光を入力しないエルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）の出力光である広帯域な波長に分布する ASE 光を利用した．波長選択スイッチ光フィルタ出力の光は光スペクトラムアナライザで観測し，波長選択スイッチ光フィルタ入力光スペクトルとの比を透過率とした．その結果を図４に示す．このとき，光スペクトラムアナライザの周波数分解能は 4 GHz であった．図４を見ると，通過帯域が平坦で，遮断特性にサイドローブのない特性であることがわかる．

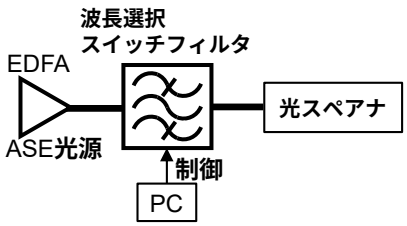


図３．波長選択スイッチ透過特性測定系

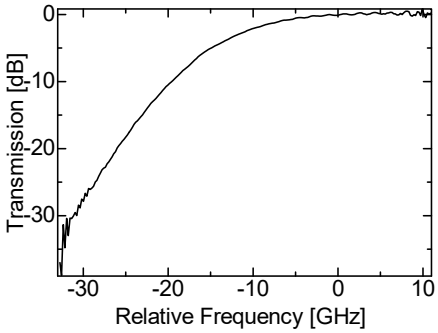


図４．波長選択スイッチ透過特性

3 波長選択スイッチ光フィルタによる光 SSB 変調

3-1 光 QPSK 信号の波長選択スイッチ光フィルタによる光 SSB 変調

波長選択スイッチ光フィルタで片側側波帯を抑圧するための元となる両側波帯信号として光 QPSK 信号を用いて実験を行った．実験系を図５に示す．光源は ECL 半導体レーザを用いた．ベースバンド信号として，パルスパターンジェネレータを用いて 2 つの PN 段数の異なる 25 Gb/s の疑似ランダム符号を準備し，それぞれのパターンを光 IQ 変調器で直交変調することで光 QPSK を生成した．変調に際し，IQ 変調器に含まれるマッハツェンダー光干渉計電極へのベースバンド信号のピークトゥピーク電圧は，光干渉計の Vπ電圧と一致させ，動作点が変調曲線のヌル点となるように直流バイアスを印加した．波長選択スイッチの通過帯域端を光源波長と一致させ，波長選択スイッチの通過帯域を離調することで上側波帯と下側波帯の強度差を作り出した．信号の基本周波数（シンボルレートの半分の周波数）における上側波帯強度に対する下側波帯強度の比を側波帯抑圧比 SSR と呼ぶことにする（図６）．波長選択スイッチの通過帯域を離調して SSR を変化させたときの光スペクトルを光スペクトラムアナライザで評価する．信号品質をコヒーレントアナライザで評価する．信号品質は，図７に示すような変調精度を示すエラーベクターマグニチュード（EVM 値）で評価した．EVM 値は，本来シンボルがあるべき位置と観測されたシンボル位置の誤差を本来のシンボル位置で規格化し，すべての観測シンボルのそれを平均したものである．EVM 値から推定されるビット誤り率 BER もあわせて算出した[5]．使用したコヒーレントアナライザでは，検波方法はイントラダイン検波である．

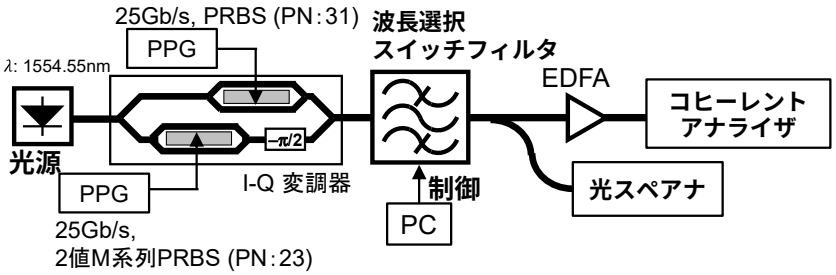
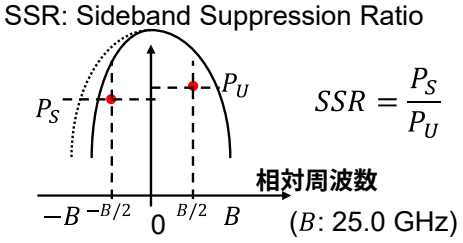


図５．光 QPSK-SSB 変調の実験系

図８は，波長選択スイッチの通過帯域を離調したときの，光スペクトルとコヒーレントアナライザによる光電界複素振幅の軌跡（黄線）ならびにコンスタレーションマップ（赤点）である．片側側波帯が抑圧されるにつれ，光電界複素振幅の軌跡が外側に広がり，シンボル位置が揺らいでいることがわかる．図９は，SSR

の状態ごとシンボルの EVM と BER をプロットしたものである．SSR の大きさが大きくなると，EVM 値，BER は大きくなる．測定の範囲では，最悪の BER でも 10^{-3} 以下であった．



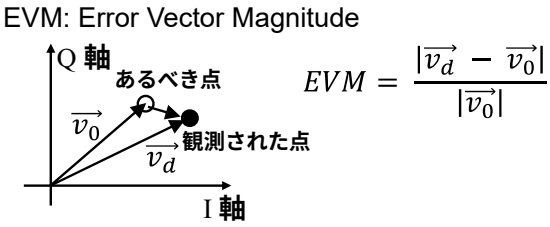


図６．側波帯抑圧比（SSR）　　図７．エラーベクターマグニチュード（EVM）

今回検討した光 QPSK-SSB 変調は，言葉を換えれば搬送波抑圧光フィルタ法 SSB 変調ということができる．それとは異なる搬送波抑圧位相シフト法 SSB 変調では，光ピーク強度が平均に対して 3dB 増えることを許容すれば，変調時に利用するオールパスフィルタを適切に設定することにより，シンボル揺らぎのほとんどない片側側波帯抑圧が可能であることが我々のグループの研究により理論的に示された[6]．今後は，そのことを発展させ，搬送波抑圧光フィルタ法 SSB 変調における光フィルタ伝達関数の最適化に発展させたい．

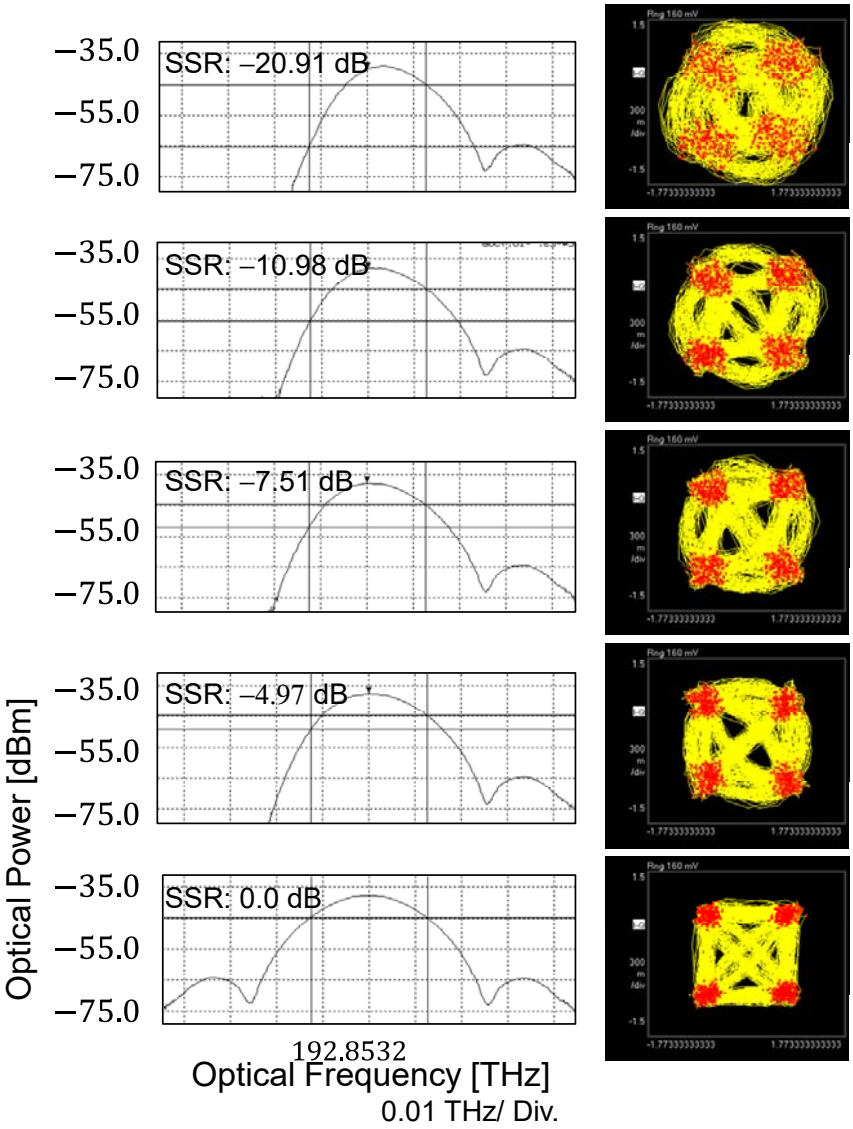


図８．光 QPSK-SSB 変調スペクトルとコンスタレーションマップ

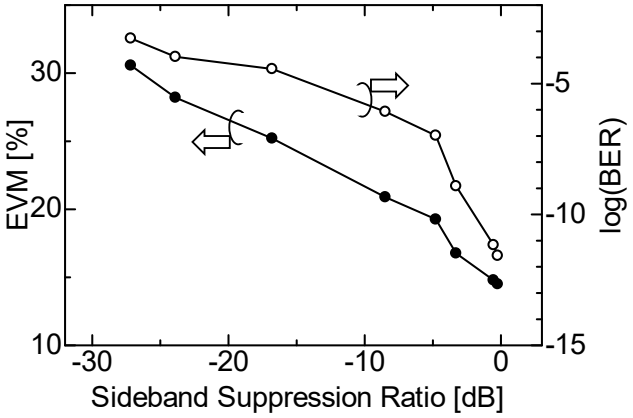


図９．光 QPSK-SSB 変調の EVM 値，BER の SSR 依存性

3-2 光 BPSK 信号の波長選択スイッチ光フィルタによる光 SSB 変調

次に，片側側波帯を抑圧するための元となる両側波帯信号として光 BPSK 信号を用いて，実験を行った．実験系を図１０に示す．ベースバンド信号は 25 Gb/s 疑似ランダム符号とし，光変調器は光強度変調器を変調曲線のヌル点に直流バイアスして駆動した．実験系のその他は，図５と同様である．

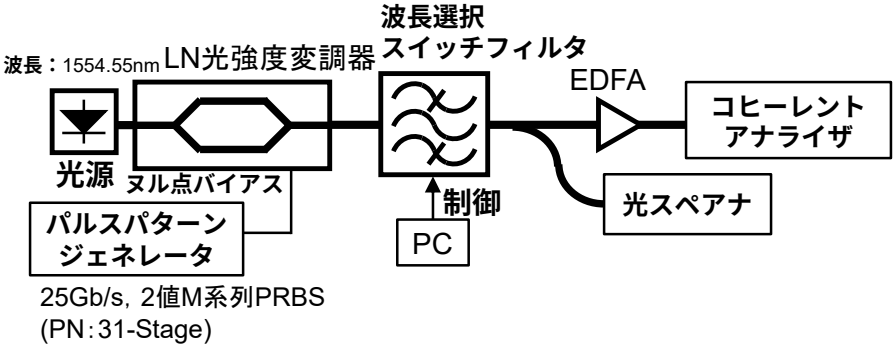


図１０．光 BPSK-SSB 変調の実験系

図１１は，波長選択スイッチの通過帯域を離調したときの，光スペクトルとコヒーレントアナライザによる光電界複素振幅の軌跡（黄線）ならびにコンスタレーションマップ（赤点）である．片側側波帯が抑圧されるにつれ，シンボル位置は横方向に広がる．やがて光電界複素振幅の軌跡が縦方向に広がり，それに伴ってシンボル位置は縦横両方向へ広がっていく．このような変化は，シンボルが縦横に遷移する光 QPSK では観測することができないことであった．シンボル遷移が一軸方向である光 BPSK 信号であったために詳細に観測できた．このことは，片側側波帯の抑制は光信号が複素正弦波に近づくことであり，複素正弦波は光電界複素振幅を表現する複素平面上では円軌跡になることから理解できる[7]．図１２は，SSR の状態ごとシンボルの EVM と BER をプロットしたものである．SSR の大きさが大きくなると，光 QPSK と同様に光 BPSK 信号でも EVM 値，BER は大きくなった．

3-3 光 PAM4 信号の非対称帯域制限による光 SSB 変調

光BPSK信号と同様に，コンスタレーションマップ上でシンボルが一軸上を遷移する光PAM4信号について，理論的な検討を行った[8]．数値計算で想定した変調系を図１３に示す．シンボルレートは 200 GBaud を想定しており，信号の基本周波数は 100 GHz である．非対称な変調スペクトル抑圧とその光を直接検波した後のアイダイアグラムを図１４に示す．その結果，信号の基本周波数付近のスペクトル成分が低下すると，アイ開口度に影響がみられる結果となった．光 QPSK/BPSK 信号では，側波帯抑圧の少ないうちからシンボル位置のゆらぎが観測されたが，光 PAM4 信号ではそのようなことはなかった．これは，光 PAM4 信号は変調スペクトル上に光搬送波成分があり，検波時は光搬送波との干渉により信号が復元される．そのため，片側側波帯の抑圧により縦横のシンボル広がりが生じても，検波時はシンボル遷移軸のみが検波されるためであると考えられる．

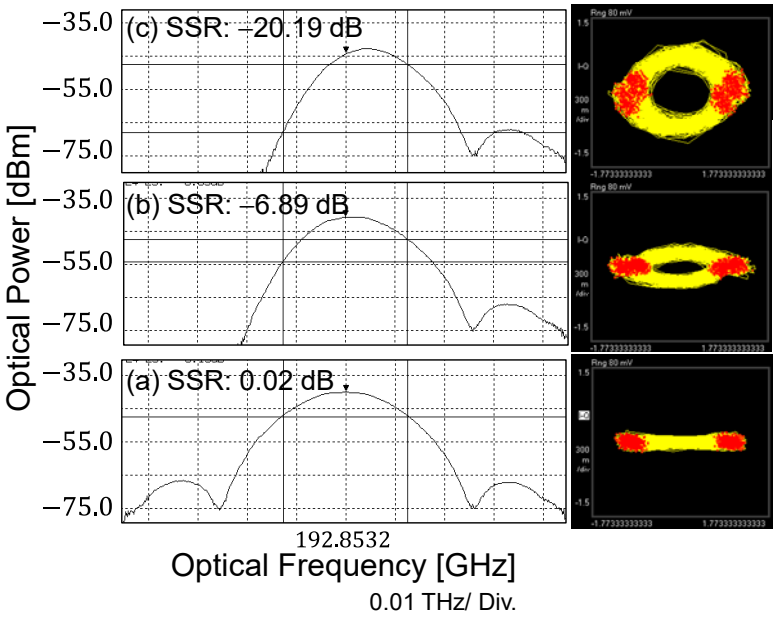


図１１．光 BPSK-SSB 変調スペクトルとコンスタレーションマップ

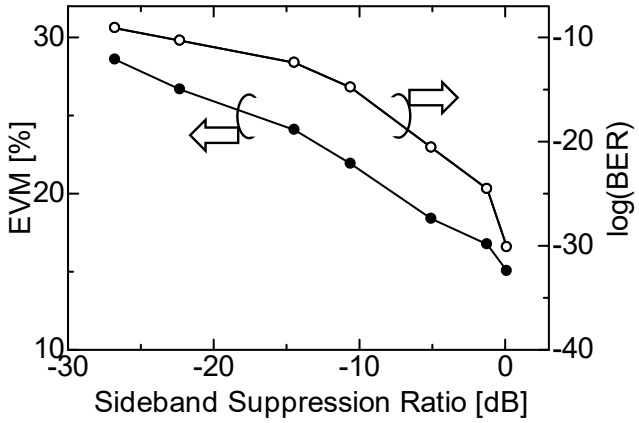


図１２．光 BPSK-SSB 変調の EVM 値，BER の SSR 依存性

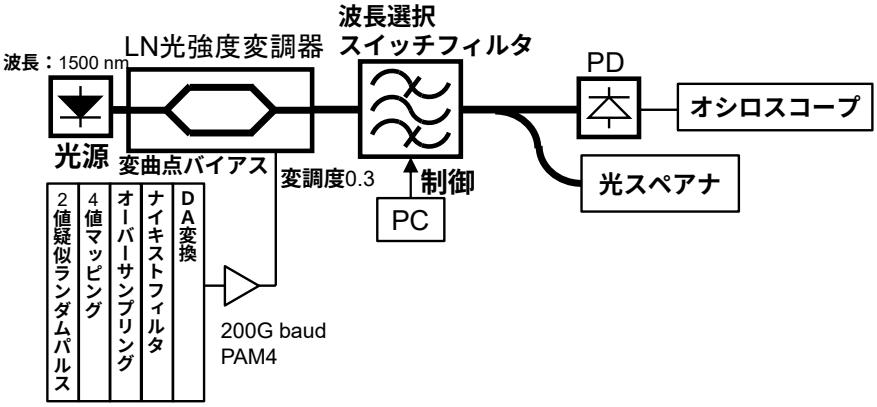


図１３．光 PAM4 信号の非対称帯域制限光 SSB 変調

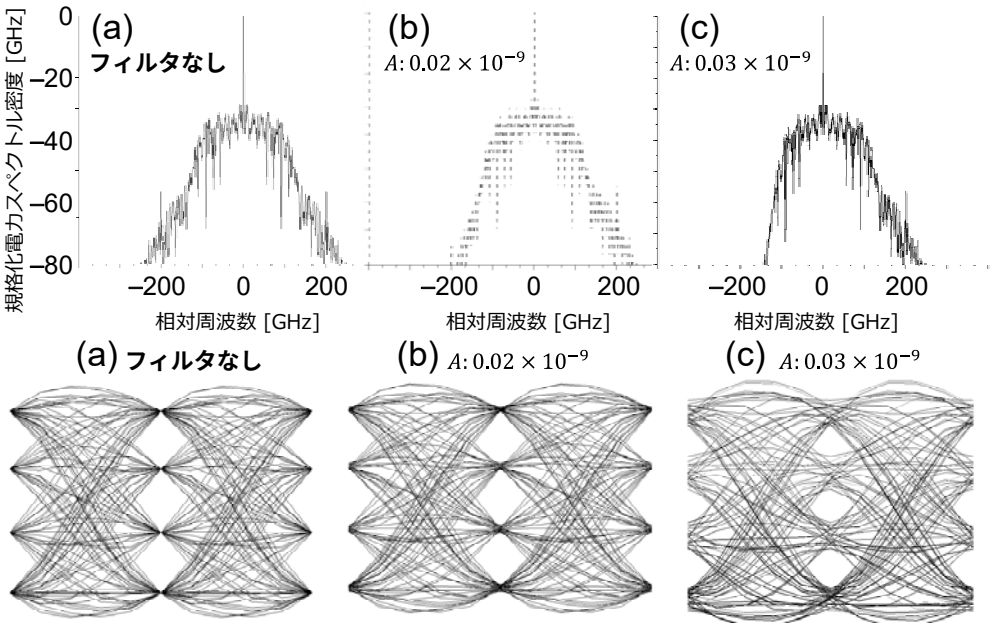


図１４．光 PAM4 信号非対称帯域制限変調スペクトルとアイダイアグラム

4 まとめ

回折格子と空間フィルタで構成される波長選択スイッチ光フィルタを使って，光信号の両側波帯を非対称に抑圧する光 SSB 変調方式を検討した．両側波帯変調信号として，光 QPSK 変調と光 BPSK 変調に対して実験的な検証を行い，フィルタリングによる側波帯抑圧比と変調精度 EVM 値と符号誤り率を観測した．それにより，フィルタリングされた変調スペクトルと光信号品質の関係を明らかにした．側波帯抑圧比の大きさが大きくなると，シンボル位置が揺らぐことがわかった．光 BPSK の場合について，シンボル揺らぎの方向を詳細に観察したところ，変調スペクトルの非対称な抑圧は複素正弦波と似た円状の複素振幅軌跡となり，シンボル遷移と直交する方向に広がりが現れることがわかった．一方で，光 PAM4 信号の非対称帯域制限では，信号の基本周波数成分に影響が出る程度に側波帯を抑制してはじめてアイ開口度が変化した．光 QPSK/BPSK の場合との差異は，変調スペクトルの搬送波成分の有無と検波方法の違いであると思われる．

今回，光 QPSK/BPSK に対して側波帯の非対称な抑圧による品質変化の程度を実験的に明らかにしたが，今後はこの品質を補償する方法やフィルタ形状の最適化などを検討していく必要がある．

【参考文献】

1. P. Lathi, Communication Systems, John Wiley & Sons, New York, 1968.
2. K. Takano, Y. Naganuma, and K. Nakagawa, "Performance analysis of optical single sideband modulation based on Mach-Zehnder interferometers and its dispersive fiber transmission," IEICE Transactions on Communications, vol. E88-B, no. 5, pp.1994-2003, 2005.
3. K. Takano, and K. Nakagawa, "Basic Performance Analysis of Optical Single Sideband Modulator using Arrayed Waveguide Gratings," OSA Trends in Optics and Photonics Series, vol. 78, IFA2, 2002, IFA2, 2002.
4. Y. Sakurai, MD. S. Khan, H. Tkamure, M. Kawasugi, Y. Hotta, K. Takeuchi, H. Oguri, S. Michihata, and N. Uehara, “LCOS-based Gridless Wavelength Blocker Array for Broadband Signals at 100Gbps and Beyond,” Technical Digest of OFC/NFOEC 2012, OTh3D.2, 2012.
5. R. A. Shafik, M. S. Rahman and A. R. Islam, "On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics," 2006 International Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 408-411, 2006.

6. D. Sato, K. I. Amila Sampath, and K. Takano, "Optical QPSK signal generation based on the circular trajectory of phase-shifted optical VSB modulation using high-pass Hilbert transformers," The 24th OptoElectronics and Communications Conference, TuP4-B4, 2019.
7. K. Kikuchi and K. Katoh, "Differential detection of single modulation sideband for ultra-dense optical frequency-division multiplexed systems," Electronics Letters, vol. 38, no. 17, pp. 980-981, 15 Aug. 2002.
8. 櫻井美咲，高野勝美，”光 PAM4 信号の非対称帯域制限の影響”，令和元年度情報処理学会東北支部研究会，vol. 2019-78, no. 15，2020 年.

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
光 PAM4 信号の非対称帯域制限の影響	令和元年度情報処理学会東北支部研究会	2020 年 3 月