

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．

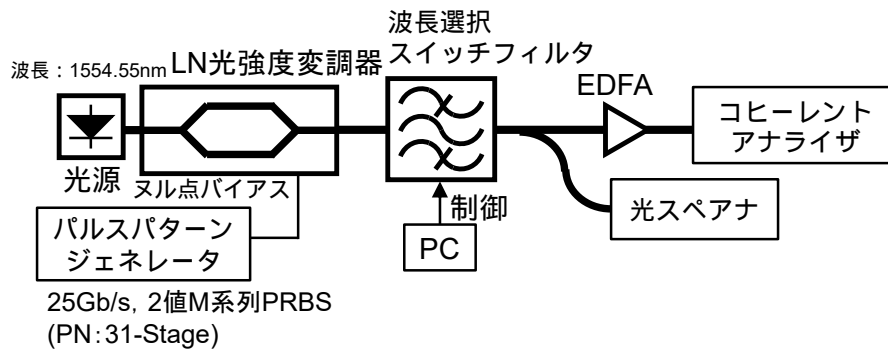


図 10．光 BPSK-SSB 変調の実験系

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．

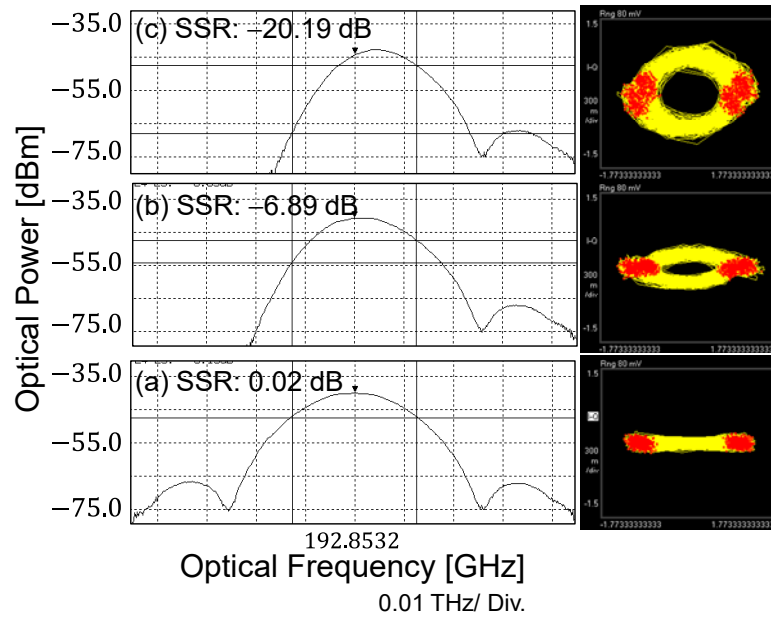


図 1 1 . 光 BPSK-SSB 変調スペクトルとコンスタレーションマップ

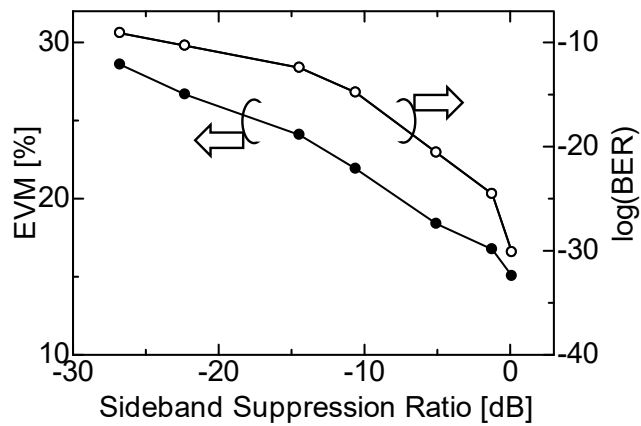


図 1 2 . 光 BPSK-SSB 変調の EVM 値, BER の SSR 依存性

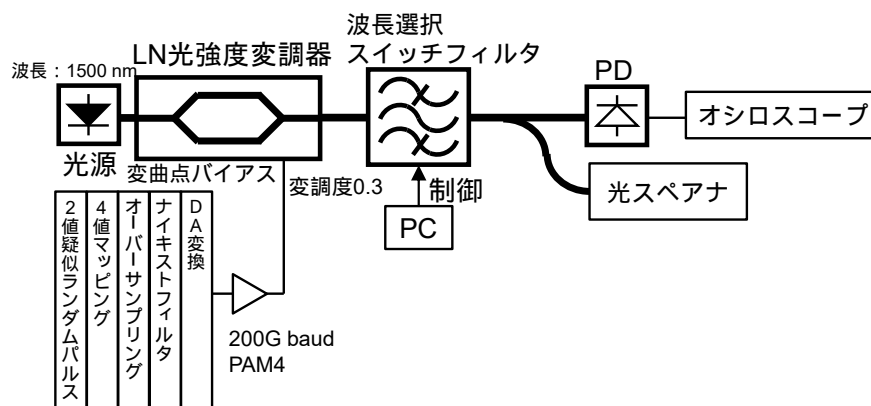


図 1 3 . 光 PAM4 信号の非対称帯域制限光 SSB 変調

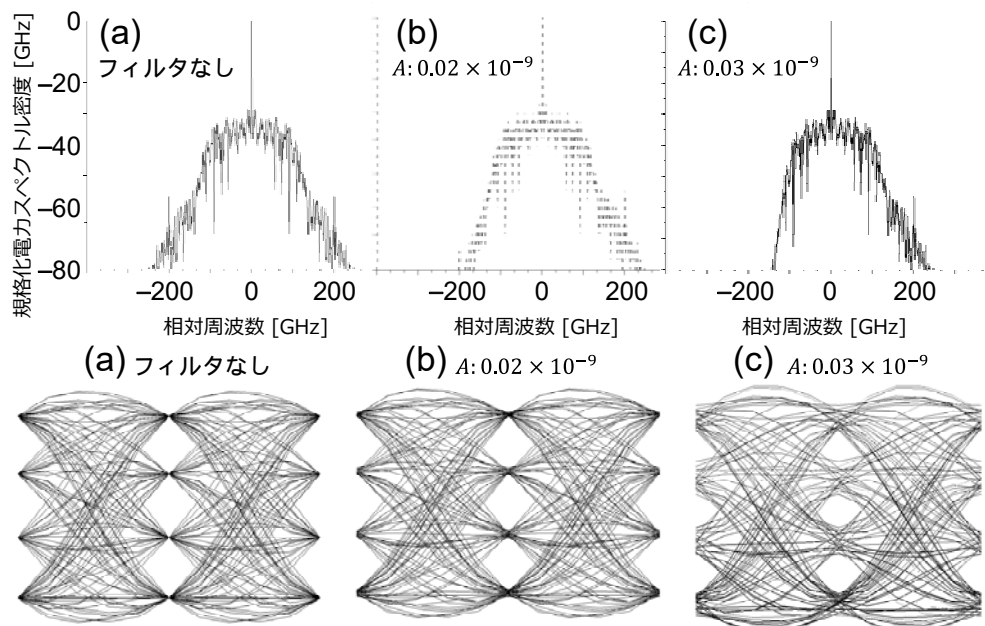


図 14 . 光 PAM4 信号非対称帯域制限変調スペクトルとアイダイアグラム

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見ら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