

複数光波干渉による光ヒルベルト変換と光単側波帯変調応用技術の開発

代表研究者 中川清司 山形大学大学院理工学研究科教授
共同研究者 高野勝美 山形大学大学院理工学研究科助教

1 はじめに

現在、長距離光ファイバ通信の伝送帯域は中継器である光ファイバ増幅器の利得帯域幅(1.55 μm 帯 C バンドで約 4THz)によって制限されている。その限られた帯域で伝送容量を増加させるために、光周波数利用効率を向上できる方式の検討が必要である。光単側波帯(光 SSB)変調方式は、周波数占有率が通常の強度変調方式に比して半分で済むため、周波数利用効率の向上だけでなく、光ファイバの波長分散耐力にもメリットがある。また、光ファイバ非線形による波形劣化抑圧と、ヘテロダイン検波による受信感度向上が期待できる。さらに、検波後の電氣的にダイナミックな分散補償が可能になり、将来の動的ネットワークに適した変調方式と期待できる。

光 SSB 信号の生成方法は、光帯域阻止フィルタによって片側側波帯を除去するのが直感的な方法であるが、光帯域阻止フィルタに遮断スロープが急峻なものが無いことが大きな問題である。別の方法として、信号の全ての周波数成分に対して位相を 90 度シフト(ヒルベルト変換という)させて、もとの信号との和により片側側波帯を除去する位相シフト法があるが、光通信における信号直交変換には光回路におけるヒルベルト変換処理が必要となる。

そこで本研究では、光遅延と複数光波の干渉による光ヒルベルト変換器を提案し、その実験的な検証を行った。その光ヒルベルト変換器を用いた位相シフト法による光 SSB 変調信号生成を実験的に行った。さらに、光平面回路を利用した高次の処理を目指して、位相シフト法による新しい光 SSB 変調のための光学的な構成を提案し、その性能を理論的に明らかにした。光 SSB 変調信号の光ファイバ分散による波形劣化を調査するために数値計算を行い、従来技術である強度変調直接検波方式と比較して、光 SSB 変調の有効性を検証した。

2 光領域での信号位相シフトを利用した単側波帯変調

2-1 位相シフト法による単側波帯変調

単側波帯(SSB)変調方式は側波帯抑圧の方法によって大きく 2 つの方法がある[1]。1 つは、バンド除去フィルタによって片側側波帯を除去する方法である。もう 1 つは、もとの信号と、その信号を $\pi/2$ だけ位相をシフトした直交位相信号との和によって片側側波帯を除去する方法である。前者はフィルタ法と呼ばれ、後者は位相シフト法と呼ばれる。

フィルタ法は構成が簡単である。しかし、片側側波帯を十分に除去し、かつ他方の側波帯を劣化無く残すためには矩形に近い遮断特性をもつフィルタが必要であり、その設計が非常に難しい。また、フィルタのスロープ部分が搬送波周波数近傍に位置するため、信号の低周波成分に対して位相特性が直線的でなくなり、波形ひずみを誘起することが懸念される。

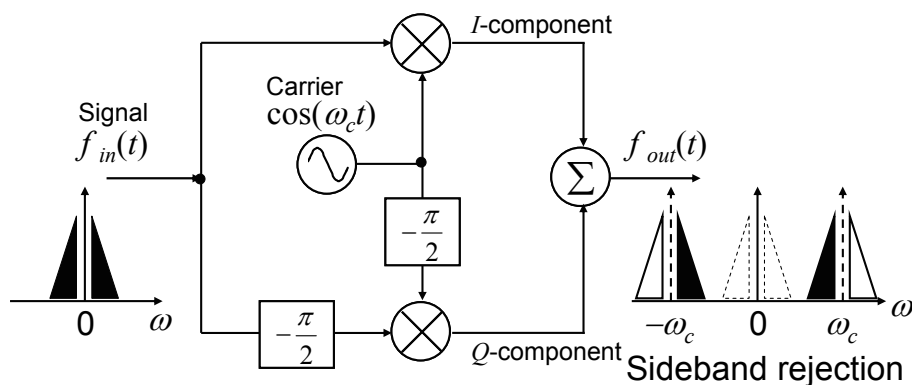


図 2-1. 位相シフト方式 SSB 変調のブロック図

位相シフト法は、信号が含む全ての周波数成分及び搬送波に対して位相を $\pi/2$ だけシフトさせた直交成分(Q)と、信号を搬送波に重畳した同相成分(I)の和によって片側側波帯を除去する方法である。そのブロック図を図2-1に示す。この方法では信号および搬送波に対して位相を $\pi/2$ だけシフトする機能が必要である。特に信号の全ての周波数成分に対して $\pi/2$ 位相シフトを与える機能をヒルベルト変換と呼ぶ[1]。図2-1のブロック図を式で表現すると以下ようになる。

光ファイバ通信における信号位相シフトを利用した光SSB変調は、2つのLiNbO₃(LN)マッハツェンダー干渉計(MZI)を並列配置した光SSB変調器[2], [3]を利用する方法や、強度変調された光信号に直交成分で位相変調を施す方法[4]などが報告されている。光通信における変調過程では電気-光(E/O)変換処理が必須であり、文献[2]の例では、E/O変換前に電気的な手法でヒルベルト変換を行っている。これまでに報告されている電気的なヒルベルト変換器としては、デジタル信号処理プロセッサを用いたもの[4]の他、マイクロ波の分岐時に発生する位相シフト[5]を利用したハイブリッドカップラ[6]などがある。

このような電気的な信号位相シフトを利用した光SSB変調ではいくつかの問題点が指摘されている。

(1) 電気的な処理のためヒルベルト変換の帯域拡大に限界がある、(2) 直交成分は振幅変動が大きいのでLN変調器に印加できる電圧振幅が制限される[7], [8]、(3) LN強度変調器の V_{π} 曲線による非線形ひずみにより残留側波帯が発生し、ファイバ伝送性能を劣化させる[7]、(4) LN変調器およびそのドライバの数が通常の強度変調に比して2倍になる、などである。

2-2. 光領域位相シフト単側波帯変調

前節では、E/O変換前に電気的に信号の直交化を行う光単側波帯変調方式について述べた。E/O変換後、すなわち光搬送波を信号で変調した後に、光回路によって信号の位相シフトを行うことができれば、前節で述べた問題点を解決できると考えられる。本章では、光領域で信号位相シフトを行って単側波帯変調を実現する方法を光領域位相シフト型光SSB変調と呼ぶこととし、その詳細について述べる。

E/O変換で両側波帯をもつ同相成分を生成した後に、単側波帯化するためには、同相成分から直交成分を作り出す処理が必要である。そのための処理は以下のように考えるとされる。まず、同相成分の上下側波帯それぞれに $-\pi/2$ の位相シフトを行う(処理①)。その後、片側の側波帯には $\pi/2$ 、他方の側波帯には $-\pi/2$ の位相シフトを与える(処理②)。2つの側波帯にこれらの処理を施すことにより、同相成分から直交成分を作り出すことができると考えられる。処理①は位相変調器などによって実現できる。処理②は、光領域位相シフト型光SSB変調に必要な光ヒルベルト変換器の機能であり、その伝達関数 H_{OHT} は、

$$H_{OHT}(\omega) = \begin{cases} +j & (|\omega| < \omega_c) \\ -j & (|\omega| > \omega_c) \\ 0 & (\omega = \pm\omega_c) \end{cases} \quad (1)$$

となる。光搬送波角周波数 ω_c を中心にその両側周波数に対して $\pm\pi/2$ 位相シフトを与えるものである。

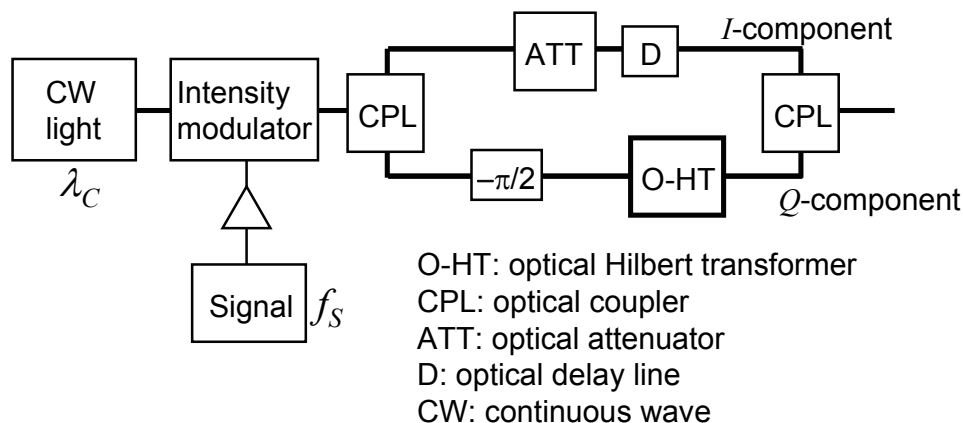


図2-2. 光領域位相シフト型光SSB変調のブロック図

これらの処理をブロック図にしたものが図2-2である。まず光強度変調器によって信号を光搬送波に重畳し、それを2分岐し、一方を同相成分とする。他方の分岐出力に $-\pi/2$ の位相シフトを与えた後に光ヒルベルト変換器を通過させ直交成分とする。直交成分生成時に発生する付加損失および時間遅延を同相成分にも与え、両成分を合波することで光SSB信号を得ることができる。このブロック図を見てわかるように、前節で述べた電気領域位相シフト型光SSB変調における課題を光領域位相シフト型光SSB変調は解決できることが予想される。つまり、LN強度変調器およびそのドライバの数は1つずつで十分である。また、ヒルベルト

ト変換器の動作速度限界については、光回路の広帯域性を生かすことができる。さらに、LN 強度変調(E/O 変換)に印加する電気信号はベースバンド信号のみであり、変調度の制限や変調器で発生する非線形歪を抑制できる[9]。さらには、複数の符号および変調方式が組み合わせられた光信号に対しても、ファイバ入力直前の光領域で信号占有帯域を半分にするスペクトル圧縮技術として光 SSB 変調を用いることも期待できる。

2-3. マツハツェンダー干渉計を利用した光ヒルベルト変換器

ヒルベルト変換器は、タップ・アンド・ディレイフィルタによって近似構成できる[10]。これは、遅延・分岐および係数乗算を基本構成要素とするフィルタである。それらの基本要素は光導波路でも容易に実現できると考えられる。そこで、我々は以前に光導波路をベースにしたタップ・アンド・ディレイフィルタによる光ヒルベルト変換器を提案した[9]。

図 2-3 は、提案する光導波路を利用した光ヒルベルト変換器の構成を示す。光分合波素子と光遅延素子によって、近似的にヒルベルト変換が実現できる。この光ヒルベルト変換器を実験的に検証するための第一歩として、本研究では低次数の光ヒルベルト変換の検討を行う。提案している光ヒルベルト変換器は、異なる遅延量を持つ複数のマツハツェンダー干渉計(MZI)の組み合わせと考えることができる。すなわち、単一の MZI は近似的 3 次ヒルベルト変換器である。そこで、単一光 MZI の伝達関数が近似的なヒルベルト変換器となることを実験的に検証する。光部品の位相特性を含めた周波数特性の評価は高度な設備を要するので、今回は矩形光パルスに対する出力応答を観測し、理論的な周波数特性から導かれる応答波形との比較によって検証した。

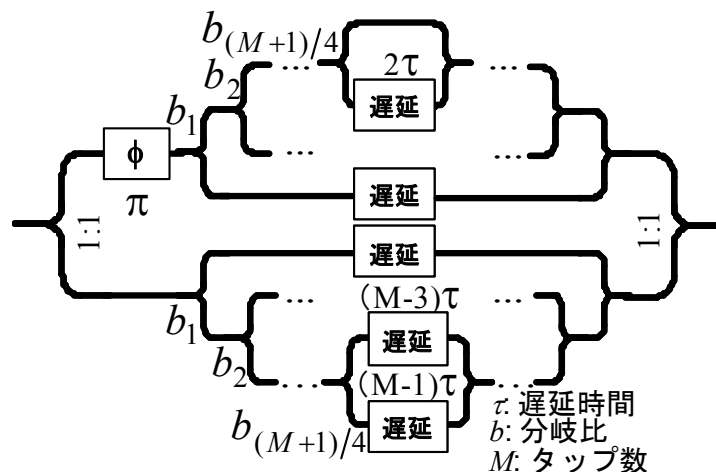


図 2-3. 光導波路の遅延と干渉を利用した光ヒルベルト変換器

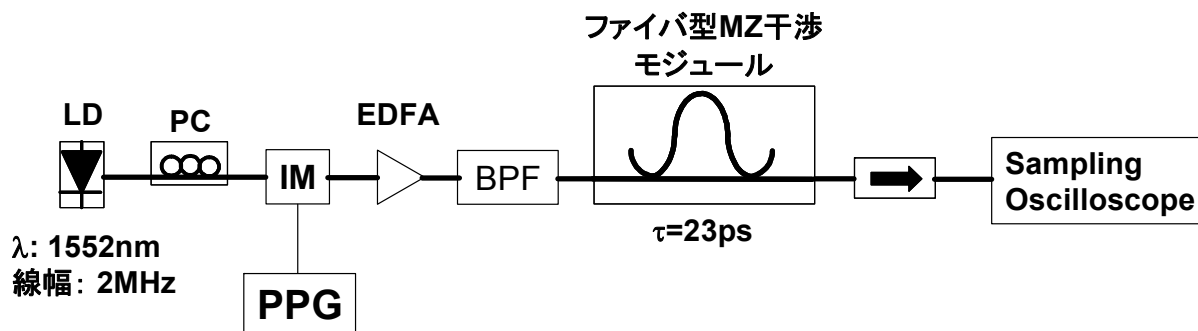


図 2-4. MZI の光パルス応答測定の実験系

図 2-4 はその実験系である。実験に使用した MZI は、温度検知素子およびペルチェ素子がパッケージ内に配置された MZI モジュールを用い、そのモジュール内の温度を一定に制御して MZI の光パルス入力応答性能を評価した。実験に用いた MZI の FSR は 43 GHz である。パルス波形発生器(PPG)で生成された繰り返し周波数 50GHz, 立ち上がり時間 60ps の矩形光パルスを MZI に入力し、その応答波形を観測した。その結果が図 2-5 (a)である。3 次ヒルベルト変換器の特性から理論的に予測される応答波形を図 2-5 (b)に示す。実験結果は、理論的な波形とほぼ一致した結果が得られた。このことから、光 MZI は近似的に 3 次ヒルベルト変換器として動作することがわかった。

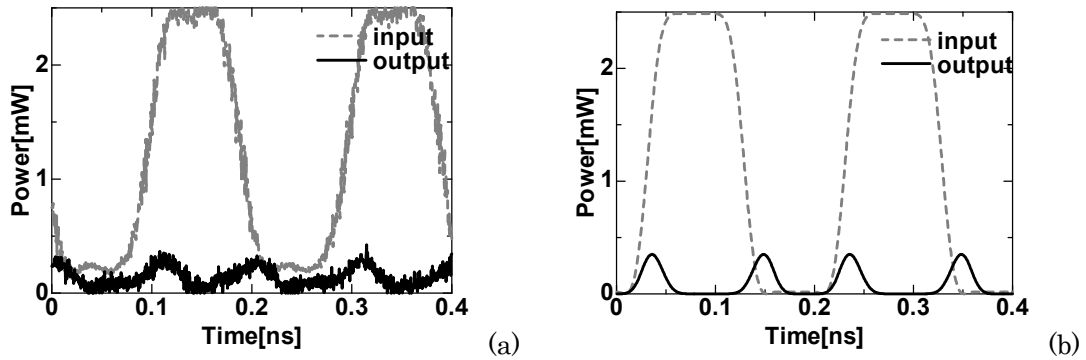


図 2-5. 光パルス応答の実験結果(a)および理論計算結果(b)

2-4. 3次光ヒルベルト変換器を利用した光単側波帯変調信号の生成実験

前節の方法によって試作した3次光ヒルベルト変換器を用い、同相成分の信号と合波する光学構成によって光単側波帯変調信号生成の実験を行う。図2-6に実験系を示す。LN強度変調器によってベースバンド信号で変調された光は、EDFAで増幅され、BPFで不要なASE光を除去された後に光カップラに入る。光カップラでは入力された光を2分岐し、一方を同相成分とする。他方の光を光ヒルベルト変換器であるMZIに入力する。MZIは、スペクトルヌルとなる周波数が光搬送波周波数と一致するように遅延量を微調整した。直交成分生成経路での過剰な光損失や遅延を同相成分にも付加するために、可変光減衰器ならびに可変光遅延器を用いる。同相成分と直交成分は偏光が一致するように光カップラで合波する。この出力をグレーティング型光スペクトラムアナライザおよびサンプリングオシロスコープで評価した。なお、光源はシアン分子吸収線を利用して1552.5nmに波長安定化したものを用いた。ベースバンド信号には10GHzの正弦波を用い、LN強度変調器への印加電圧は、振幅をLN強度変調器の V_{π} 電圧と一致させ、透過率零点にバイアスした。なお、この実験系では、搬送波に対する直交位相シフトを同相成分生成経路で与えているので、下側波帯が抑圧された光SSB変調波が生成されるはずである。

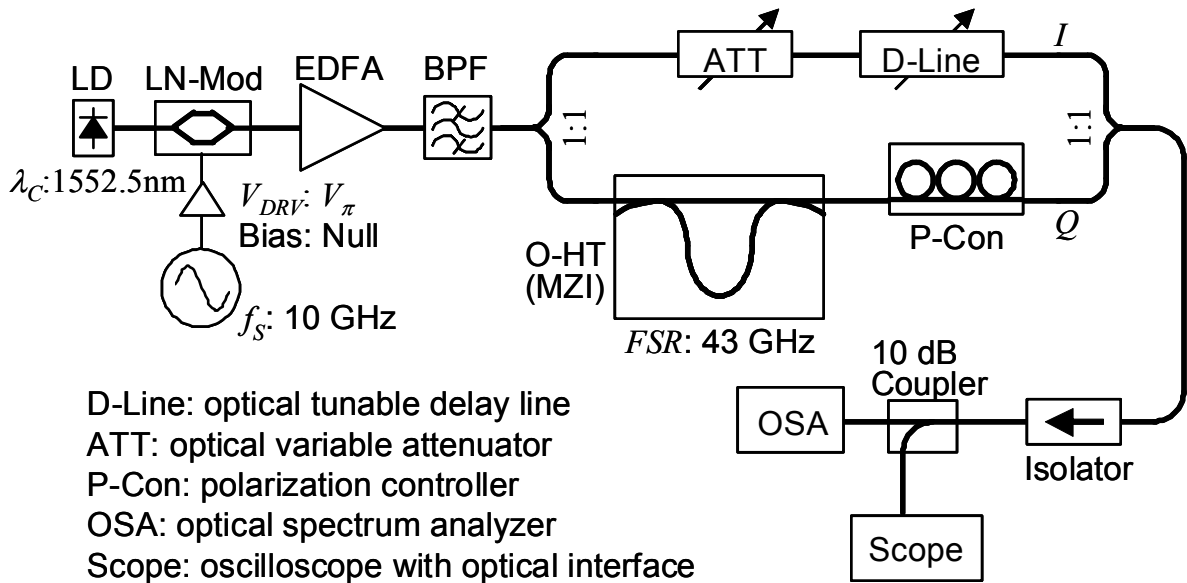


図 2-6. 3次光ヒルベルト変換器を用いた光SSB変調信号生成の実験系

図2-7は測定した光SSB変調スペクトルである。下側波帯が抑圧された光SSB変調スペクトルが観測された。このときのスペクトル抑圧比は6.7dBであった。理論的な側波帯抑圧比は、ヒルベルト変換器の伝達関数から求めることができる。実験に用いているマッハツェンダー干渉計の伝達関数 H_{MZI} は、

$$H_{MZI}(\omega) = \frac{1}{2} \{1 + \exp(j\omega\tau)\} \quad (2)$$

であり、この伝達関数から予想される側波帯抑圧比は7.3dBであり、実験値と理論値はほぼ一致した。本研究では、光領域での信号位相シフトを用いた光SSB変調信号生成の実証実験を行っているため、3次のヒル

ベルト変換器で実験を行った。側波帯抑圧比は、より高次のヒルベルト変換を用いれば改善すると考えられる。変調器(LN-Mod)は零点にバイアスしているため、原理的には光搬送波成分が抑圧されるはずであるが、図2-7では搬送波成分が十分に抑圧できていない。これは、光変調器内のY分岐のアンバランスなどの原因と考えられる[11]。

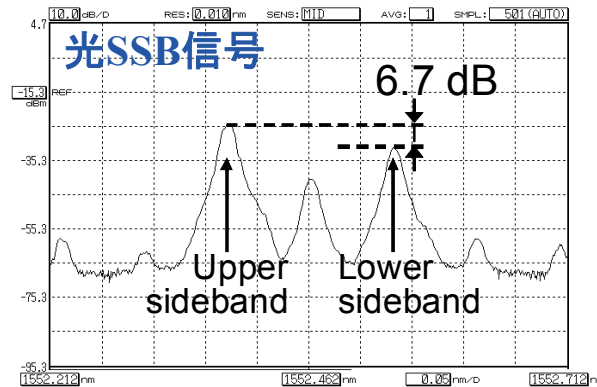


図2-7. 光領域信号位相シフトを利用した光SSB変調スペクトル

3 新しい高次光ヒルベルト変換器の検討

図2-1に示したような高次のヒルベルト変換を用いれば、側波帯抑圧比が改善できることはこれまでに理論的に示している[9]。本年度では、既に実用化されている光平面回路の遅延を利用するアレイ導波路回折格子(AWG)を用いて、光ヒルベルト変換を行う方法を検討した。

図3-1にAWGと位相フィルタを用いた光ヒルベルト変換器の構成、およびそれを利用した光SSB変調信号発生のための光学系のブロック図を示す。提案する光ヒルベルト変換器は2つのAWGとその間に配置した位相フィルタからなる。初段のAWGは信号の時間波形をフーリエ変換し、周波数成分をAWGのスラブ導波路出力端に空間的に展開する。位相フィルタでは、側波帯が相互に π の位相差を持つように移相される。後段のAWGは、周波数成分を時間波形に戻す逆フーリエ変換の役割を担う。

図3-2は、AWGのアレイ導波路間遅延時間 Δt に対する光SSB信号の側波帯抑圧比(SSR)をプロットしたものである。 Δt を大きくすれば、AWGでの周波数分解能が向上し、側波帯抑圧特性は良くなることが分かった。

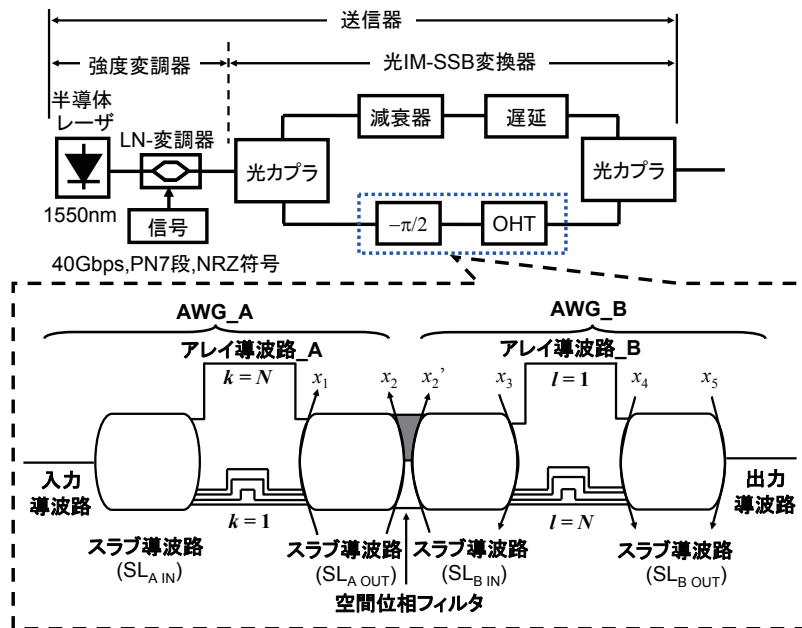


図3-1. AWGと位相フィルタによる光ヒルベルト変換

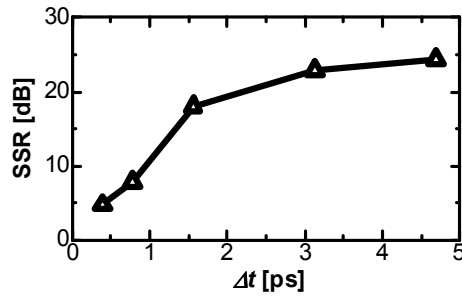


図3-2. アレイ導波路遅延時間と側波帯抑圧特性

4 光単側波帯変調信号の光ファイバ伝搬による歪み特性の検討

単側波帯変調信号における片側側波帯の残留分がファイバ群速度分散などにより波形劣化を引き起こす可能性がある。そのため、光SSB変調信号が光ファイバの分散によりどのような波形劣化となり、通常の強度変調に比してどれくらいの伝送距離からメリットがあるのかを数値計算を用いて検討した。

図4-1は強度変調直接検波(IM-DD)方式および搬送波抑圧型光SSB変調ホモダイン検波方式における光ファイバの伝送距離に対する検波後のアイ開口度を、伝送速度をパラメータにプロットした。このときの伝送路光ファイバは分散値が17ps/nm/kmのシングルモード光ファイバを仮定している。光SSB方式は、残留側波帯成分の影響で伝送距離が短いときにもアイ開口度が若干劣化しているが、伝送距離が長くなるほどIM-DDよりも良いアイ開口度が得られることが分かる。例えば10Gbpsの伝送速度では、伝送距離が約100km以上で光SSBの方が有利であることがわかった。

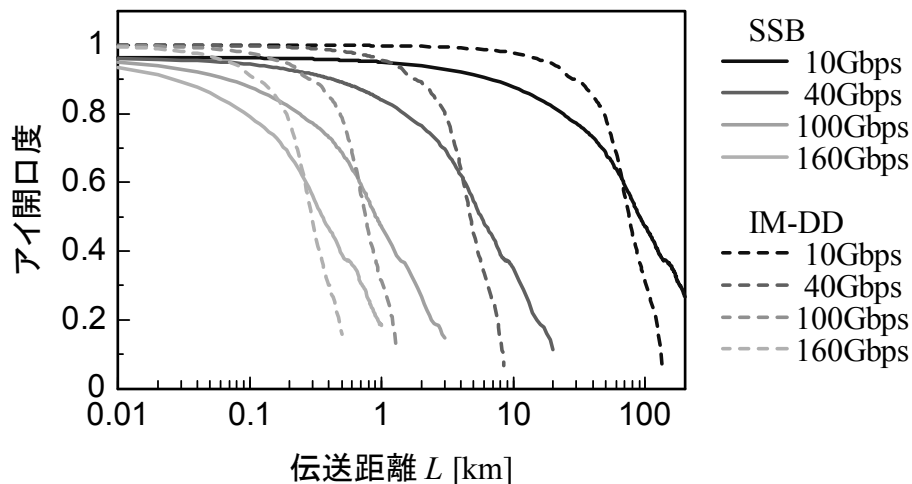


図4-1. 伝送距離とアイ開口度の関係

【参考文献】

1. P. Lathi, Communication Systems, John Wiley & Sons, New York, 1968.
2. S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou, N. Mitsugi, K. Kubodera, T. Kawanishi, and M. Izutsu, "Single side-band modulation performance of a LiNbO3 integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 13, no. 4, pp. 364-366, April, 2001.
3. M. Izutsu, S. Shikama, and T. Sueta, "Integrated optical SSB modulator/frequency shifter," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-17, no. 11, pp. 2225-2227, Nov. 1981.
4. M. Sieben, J. Conradi, and D. E. Dodds, "Optical single sideband transmission at 10 G/s using only electrical dispersion compensation," J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 10, pp. 1742-1749, Oct. 1999.
5. 本宮佳典, "波動工学の風景, 対称分岐", O plus E, vol. 27, no. 10, pp. 1188-1192, 2005年10月.

6. R. Sousa, C. Sousa, M. Violas, and P. Monteiro, "3 – 37 GHz Multilayer Multisection 3 dB 90° Hybrid Coupler," Proc. of the 5-th Conference on Tele- communications (ConfTele 2005), FriAmPO1, Tomar, Portugal, 6-8 April, 2005.
7. 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, May 2005.
8. K. Takano, N. Sakamoto, and K. Nakagawa, "SPM effect on carrier-suppressed optical SSB transmission with NRZ and RZ formats," Electron. Lett., vol. 40, no. 18, pp. 1150-1151, Sept. 2004.
9. K. Tanaka, K. Takano, K. Kondo, and K. Nakagawa, "Improved sideband suppression of optical SSB modulation using all-optical Hilbert transformer," Electronics Letters, vol. 38, no.3, pp.133-134, Jan. 2002.
10. 田中喜久治, 高野勝美, 近藤和弘, 中川清司, "電気段低域減衰等化器を適用した有限次数ヒルベルト変換型光 SSB 変調波長多重系のアイ開口解析," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B, No.2, pp.159-168, Feb. 2002.
11. T. Kawanishi, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, and M. Izutsu, "70dB extinction-ratio LiNbO3 optical intensity modulator for two-tone lightwave generation," Proc. OFC/NFOEC2006, OWC4, March 2006.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
空間的位相シフト処理型光 IM-SSB 変換器による光 SSB 信号の標準的シングルモード光ファイバ伝送特性	第 63 回応用物理学会東北支部学術講演会	2008 年 12 月
搬送波抑圧型光 SSB 方式と IM-DD 方式の波長分散によるアイ開口度劣化の比較	第 63 回応用物理学会東北支部学術講演会	2008 年 12 月
Optical single sideband modulation using optical Hilbert transformation with arrayed-waveguide gratings and spatial phase filter	2008 Tohoku-Section Joint Convention Record of Institutes of Electrical and Information Engineers	2008 年 8 月