

平成 11 年度入学 大学院博士後期課程 システム情報工学専攻(電子光工学)

氏 名 田中 喜久治 (Kikuji TANAKA)

論文題目 近似ヒルベルト変換器を用いた狭帯域光 SSB 変調器構成法に関する研究

英訳題目 A Study on Optical Single-Sideband Modulator Implementation using Approximated Hilbert Transformers

- **Abstract**

Optical single-sideband (SSB) modulation system is expected to reduce the required optical bandwidth of a channel. The system has advantages, such as reducing signal distortion due to chromatic dispersion effects for long-fiber transmission and increasing the spectral efficiency and the number of channels for dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems.

In this study, optical SSB modulators were designed by using the phase-shift method, and implemented with an approximated Hilbert Transformer that functions as a wideband 90-degree phase shifter for baseband signals. The transformers were implemented as electrical circuits with several transformer orders, and as optical circuits feasible for very high-speed baseband signals. The modulators were analyzed, and the sideband suppression characteristics (i) were calculated using numerical simulations. Then, transmission systems equipped with various modulator implementations were analyzed, and the fiber-dispersion tolerance improvement with the dispersion parameter of 16ps/nm-km (ii), as well as the DWDM transmission characteristics with 0.8bit/s/Hz spectral efficiency (iii) were calculated. The results obtained through the study are as follows:

(i) In the sideband suppression characteristics, the main-lobe residual bandwidth depends only on the transformer order, and decreases 20% with increasing order. The side-lobe suppression ratio indicated with the optical transformer implementation improves by 38dB compared with the electrical implementation, since the optical transformer modulators show superior suppression with negligible effects of the amplitude modulation depth.

(ii) In the fiber-dispersion tolerance comparisons, the eye openings of the long-fiber transmission output signals improve with the transformer order in shallow modulation depths. In deep modulation depths, the electrical and optical implementation decreases the eye opening by 7% and 8 to 10%, respectively.

(iii) In the DWDM transmission characteristics with two neighboring channels, with an optimized demultiplexer and with an electrical low-frequency band equalizer, the eye openings increase from 70% to 78% with the transformer order using shallow modulation depths. With deeper modulation depths, however, the electrical

and optical implementation decreases the eye opening due to increased suppressed- and unsuppressed-sideband interference with each neighboring channel, respectively.

「和文要旨」

光単側波帯(SSB)変調による光信号スペクトルの狭帯域化には、ファイバ波長分散耐性の強化や、光周波数利用効率及び電力利用効率の向上などの優れた利点がある。特に波長分割多重(WDM)伝送に適用することで、利用光帯域を拡大することなく波長チャネル数を増加させることができ、一本の光ファイバで伝送できる情報量を飛躍的に高めることが可能となる有効な技術である。

本研究では、位相シフト法によるSSB変調方式を光変調器に適用し、被変調信号の狭帯域性が制御された変調器構成ごとに、光被変調信号が示す側波帯抑圧特性をコンピュータシミュレーションによって解析した。続いて、それらの狭帯域性が効果を表わすファイバ波長分散耐性及び超高密度 WDM 伝送特性について、同様に変調器構成ごとに解析し、比較評価を行なった。光 SSB 変調器の構成法は、ベースバンド信号に対する広帯域 90° 移相器であるヒルベルト変換器の近似手法に着目し、異なる振幅応答を備える近似次数別変換器をそれぞれ用いることで行なった。さらに、従来の方式では電気回路として構成されていたヒルベルト変換器を光信号処理回路として構成することで、超高速ベースバンド信号による光変調に適した新たな光 SSB 変調器構成法を提案し、従来方式との比較を行なった。本研究で得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 光被変調信号の側波帯抑圧特性

抑圧側波帯におけるメインローブ残留帯域幅は、ヒルベルト変換構成次数にのみ依存し、次数が高くなるごとに 20% づつ帯域幅が狭まった。一方、サイドローブ抑圧特性では、電気回路型ヒルベルト変換方式で光振幅変調時の非線形入出力特性による影響を強く受け、振幅変調度が高くなるほど抑圧特性が劣化することがわかった。低い振幅変調度では 40~50dB 以上を示したサイドローブ抑圧比が、振幅変調度を高くすることで 30dB を下回るまでに劣化し、劣化はヒルベルト変換構成次数が高いほど顕著であった。それに対して、光信号処理型ヒルベルト変換方式による光 SSB 変調器構成法では、振幅変調度による劣化を飛躍的に抑えることができ、電気回路型での結果に比べて、高い振幅変調度で 38dB もの抑圧比劣化を改善できることがわかった。

(2) 光 SSB 変調器構成法によるファイバ波長分散耐性

光 SSB 変調器を適用した単一波長チャネル伝送系において、波長分散係数 16ps/nm-km とした伝送路距離ごとに受信復調信号のアイ開口度を求め、変調器構成ごとに得られた結果に対して比較評価を行なった。低い振幅変調度設定では、ヒルベルト変換構成次数のみに依存して、次数が高くなるほど長距離伝送時のアイ開口度が改善した。次数 19 以上では 200km 伝送後で 25% のアイ開口度を示し、理想ヒルベルト変換での結果にほぼ収束することがわかった。また、最も低い次数 3 であっても、両側波帯変調方式に比べて分散耐性は向上し、150km 伝送後でも 23% のアイ開口度が得られた。その一方、電気回路型ヒルベルト変換方式による構成では、振幅変調度 0.5 以上で最大 7% のアイ開口度劣化が生じ、光信号処理型で振幅変調度 0.7 以上とすると、8~10% のアイ開口度劣化が生じることもわかった。

(3) 光 SSB 変調器構成法による超高密度 WDM 送受信特性

それぞれに光 SSB 変調器を適用して光周波数利用効率 0.8bit/s/Hz とした 3 チャンネル WDM 伝送系において、隣接チャンネル干渉下で変調器構成ごとに得られる結果に対して比較評価を行なった。光 SSB 変調による WDM 伝送系では、波長チャンネル分離フィルタの影響で受信信号が劣化することがわかり、その劣化には低域減衰等化が有効であることがわかった。そこで、低域減衰等化器を電気段に適用したうえで、各光 SSB 変調器構成で最適な波長チャンネル分離フィルタ特性を求め、そのときに得られる受信復調信号のアイ開口度を比較した。低い振幅変調度設定では、ヒルベルト変換構成次数のみに依存して、次数が高くなるほどアイ開口度が改善された。低次数でも 70%であったアイ開口度は、次数 19 でほぼ収束し、77~78%の値を示していた。高い振幅変調度では、電気回路型ヒルベルト変換方式で側波帯抑圧特性劣化の影響によるアイ開口度劣化量が 1~1.5dB と増加し、受信復調信号のアイ開口度を劣化させていた。一方の光信号処理型では、この劣化は 0.5dB 程度と小さいが、隣接チャンネルにおける非抑圧側波帯による干渉が増加し、受信復調信号のアイ開口度を劣化させることがわかった。

これらの得られた結果によって、本研究では光 SSB 変調器の様々な構成法による変調特性及び伝送系の諸特性を明らかにすることができた。本研究成果は、将来の超大容量光伝送システムの実現における、光 SSB 変調方式の適用に際して、大きな貢献ができるものと期待できる。