

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360177

研究課題名（和文） 光信号のヒルベルト変換を用いた光単側波帯変調方式の開発

研究課題名（英文） Optical Single Sideband Modulation using Hilbert Transformers for Optical Signals

研究代表者

高野 勝美 (TAKANO KATSUMI)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：60302303

研究成果の概要（和文）：光ファイバ通信における伝送容量を増加させるために、光周波数利用効率を向上させる技術として光単側波帯(SSB)変調方式の研究を行う。光 SSB 変調を実現するには、位相シフト法を用いるのが有効で、そのためには信号をヒルベルト変換する機能が必要である。大きく以下の 3 つの検討を行った。(1) 広帯域化のための光ヒルベルト変換に関する研究、(2) 光 SSB 信号の光ファイバ伝送特性とその等化方法の研究、(3) 波長数増大時の光ネットワークにおける波長配置に関する研究

研究成果の概要（英文）： In order to enhance the capacity of optical fiber communications, this research project explores the technologies for optical single sideband (SSB) modulation, which requires Hilbert transformations for phase-shift method. This research includes the following three studies; (1) A study on optical Hilbert transformers for enhancement of operation bandwidth, (2) A study on fiber transmission characteristics of optical SSB signal and their equalization, (3) A study on wavelength path allocation in optical networks with many number of wavelength.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：変復調、光通信、光ファイバ、側波帯、光信号処理、ヒルベルト変換

1. 研究開始当初の背景

現在の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。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させる技術として、多値変調を含めた狭帯域変調方式の検討が数多く行われている。しかし多値変調は本質的に耐雑音特性が悪く、SNRを改善する特別な工夫を必要とする。こ

の問題に対し、光単側波帯(光SSB)変調方式を用いた周波数利用効率向上を提案する。光SSB変調方式は周波数占有率が通常の変調方式の半分で済むため、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。

2. 研究の目的

光 SSB 変調を実現するには、位相シフト法を用いるのが有効で、そのためには信号をヒルベルト変換する機能が必要である。ヒルベルト変換器の特性は、光 SSB の性能に大きく影響することがこれまでの検討からわかっている。ヒルベルト変換器の広帯域化とそれを使った光 SSB 変調方式を検討し、次世代に最適な光ファイバ伝送システムの基盤となる知見の創出することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) ヒルベルト変換器の広帯域化

これまでマイクロ波素子のハイブリッドカップラを利用したヒルベルト変換では、光通信の高速性が十分に生かせない問題があった。この問題に対処するために、我々は、電気信号領域でのヒルベルト変換ではなく、光領域の処理によるヒルベルト変換方式を提案する。

検討する光ヒルベルト変換器の構成は、以下の2種類である。一つは、光導波路の分岐・合波と遅延によって近似的な FIR フィルタを構成し、その分岐比設計からヒルベルト変換を実現する進行波型光ヒルベルト変換器である。二つ目は、ファイバコア中に屈折率の周期構造を作ったグレーティング(ファイバブラッググレーティング:FBG)を複数接続し、FBG 間の遅延量を適切に設定することにより光位相フィルタを構成する反射型光ヒルベルト変換器である。

(2) ファイバ伝送における歪み低減方法

光ファイバ通信では、光ファイバ中の光強度が大きくなるとその光のエネルギーにより光ファイバコアの屈折率が変化し、それにより光信号波形が歪む自己位相変調 (SPM) 効果が知られている。光 SSB 変調信号の光強度は、平均電力に比して比較的大きなピーク電力を持つタイミングがあることがこれまで我々の調査によって明らかにされてきた。そのため、光 SSB 変調信号を光ファイバ伝送に用いるためには、SPM 効果の低減方法を考案する必要がある。

そこで、光信号強度に応じて SPM 効果で生じる位相回転と逆の位相変調を送信側で行う方法などを検討した。

(3) 高い周波数利用効率光伝送を利用した次世代光ネットワークの波長構成法

光 SSB 信号により光ファイバ中に多重できる波長数の増加がもたらされた場合、光ネットワークでの有効な波長配置方法が必要となる。本研究では、波長パスでのスイッチ

ングにおけるノード規模を低減するための波長群スイッチング技術における波長配置方法を検討した。

4. 研究成果

(1) 進行波型光ヒルベルト変換器：

光ファイバや PLC などの光導波路の遅延・損失・分合波の機能を用いて、有限インパルス応答 (FIR) 離散時間フィルタを構成する。ヒルベルト変換のインパルス応答は、中心サンプルを中心にその前後のサンプルが回転対称である。中心サンプルから同じ時間にある前後のサンプル対は、光導波路干渉計の消光条件により実現できる。図 1 は、光ヒルベルト変換器のインパルス応答と、複数の光干渉計を組み合わせた場合の構成図である。

2 タップの場合、実際に光ヒルベルト変換器を試作し、それを用いた光 SSB 変調信号の生成実験結果が図 2 である。10GHz の信号に対し、上下側波帯間の強度差 (側波帯抑圧比) として 8.11dB が得られた。この値は 2 タップの場合の理論値とほぼ一致している。光ヒルベルト変換器の高次化により、側波帯抑圧比は向上すると思われる。

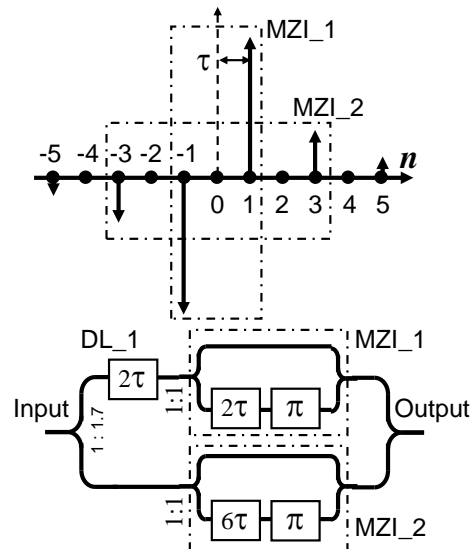


図 1. 光ヒルベルト変換器のインパルス応答と進行波型光ヒルベルト変換器の構成

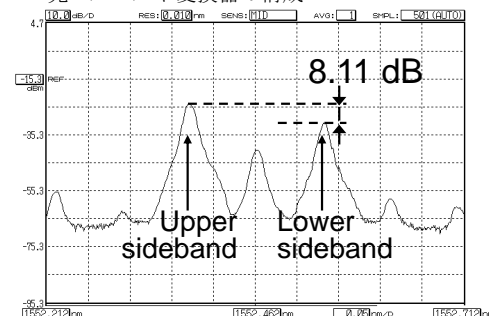


図 2. 2 タップ進行波型光ヒルベルト変換器を用いた光 SSB 変調スペクトル

(2) 反射型光ヒルベルト変換器：

高次のヒルベルト変換器を実現するには光干渉計の集積化が必須である。光ファイバ

コア中の屈折率を紫外線照射により周期的に変化させる光ファイバブラッググレーティング(FBG)は、一本の光ファイバ中に反射素子を集積・作成が比較的容易である。そこで、複数のFBGにより一本の光ファイバ中に光干渉計を構成し、光ヒルベルト変換器を作ることができる。前節の光ヒルベルト変換器と異なり、光の反射・干渉を利用することから、反射型光ヒルベルト変換器と呼ぶことにする。図3はその構成図である。インパルス応答の各サンプルは一つのFBGに相当し、中央の2つのFBG間の光ファイバで光位相が π だけずれるように構成する。

試作を行い、光SSB信号の生成実験を行ったところ、2タップの場合では側波帯抑圧比は7.8dBであった。4タップの場合10dB以上の側波帯抑圧比を観測できた。

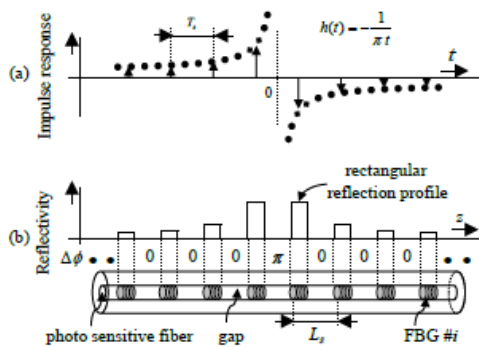


図3. 反射型光ヒルベルト変換器の構成

(3) ファイバ非線形特性

光SSB変調信号は、2値信号伝送においては、ピーク電力対平均電力比が高くことがある。そのため、光ファイバ伝送特性では光ファイバのカー効果に起因する自己位相変調(SPM)効果に注意が必要である。光SSB信号の光強度の増加に対する、光ファイバ伝送後の受信波形の歪みに関して、理論的に検討を行った。図4は、光強度の増加に対して、受信波形がどのように変化するかを示している。アイ開口を劣化させる特定のパターンが存在することがわかる。これは、そのパターンのタイミングで光強度が大きいため生じる。

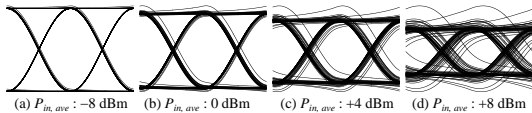


図4. 反射型光ヒルベルト変換器の構成

(4) 光強度に応じた位相変調を用いた前置等化法

SPM効果による波形歪みは、光強度に応じて光ファイバ中の位相回転が生じることが原因である。そこで、送信器中で光強度に応じてSPMとは逆方向の位相変調を施す方法を提案した。図5はその模式図である。理論的にその性能を評価した。図6は、伝送用光ファイバに入射する平均光強度に対して、

100km 光ファイバ伝送後に分散補償をしたのちの受信アイ開口度劣化量を示している。アイ開口度劣化が1dBとなる時の光ファイバ入力強度をSPM閾値と呼ぶことにすれば、前置等化を施さない場合、SPM閾値は-1.6dBmであった。前置等化を施すことによりSPM閾値は13.2dBmとなり、14.8dBもの改善が見込まれることがわかった。

この方法の他、SPM効果による波形歪みを低減する方法として、(1)光搬送波を送出する方法、(2)45度移相フィルタによりピーク強度を低減する方法、などの提案を行い、それぞれ理論的にそれらの性能を評価した。いずれも、対策を施さない場合に対して、十分に歪みを解消できることがわかった。

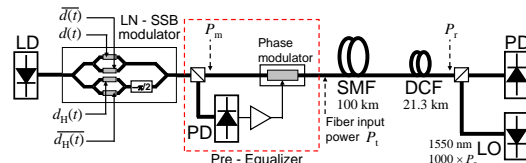


図5. 位相変調によるSPM前置等化方法

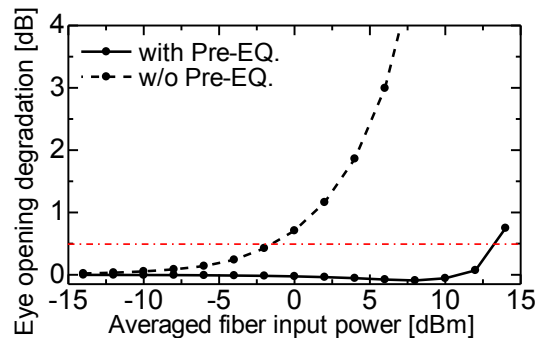


図6. SPM前置等化方法(Pre-EQ)の有無による受信アイ開口度劣化量の変化

(5) 波長群スイッチングにおけるグループ化方法および波長配置の検討

光SSB変調技術が順調に進展すれば、超高密度波長多重伝送による光ネットワークの検討が必要となる。光パスを用いた光ネットワークでは、波長数が増加すると、ノード規模が大きくなり、現実的な制限要因になる。そこで、同一経路を通過する複数の光パスを波長群としてグループ化し、波長群単位でスイッチングを行う波長群スイッチングネットワークが期待されている。本研究では、そのグループ化方法や波長群の波長配置に対して検討を行い、それぞれの場合で、ノード規模および必要波長数を評価した。

図7は、波長群スイッチングネットワークのリンク中を通過する波長群パスおよび波長パスの模式図である。波長群を構成する最大波長パス数および最小波長パス数を変化させたときの、ネットワーク中のクロスコネクタ装置の入力ポート数を評価した。その結果が図8である。また、図9は、同じ条件下で、ネットワークに必要な波長数を評価した結果である。これらの検討は、日本の主

要都市間を接続した光ネットワークを想定している。

これらの結果から、波長群に含まれるパス数を増加させるほど、ノード規模を小さくすることができる。また、パスを波長群にグループ化する際の最低パス数を小さくすれば、ネットワークで必要になる波長数を低減することができる。

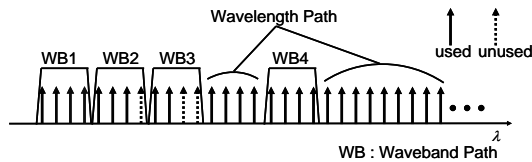


図7. リンクを通過する波長群パスおよび波長パスの模式図

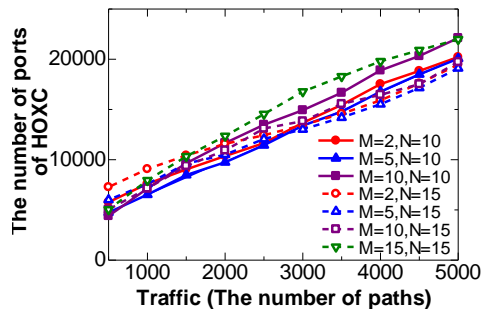


図8. 波長群を構成する最大・最小波長パス数とクロスコネクタ装置入力ポート数の関係

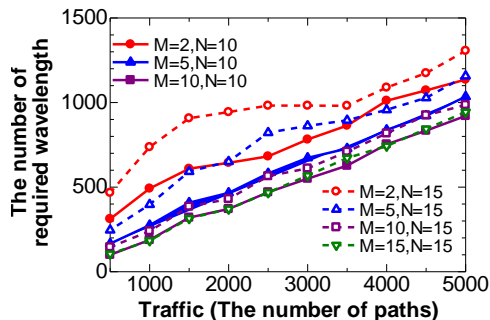


図9. 波長群を構成する最大・最小波長パス数とネットワークで必要となる波長数

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Katsumi Takano, Takashi Murakami, Yuki Sawaguchi, and Kiyoshi Nakagawa, "Influence of self-phase modulation effect on waveform degradation and spectral broadening in optical BPSK-SSB fiber transmission," OSA Optics Express, 査読有、Vol. 19, Issue 10, 2011, pp. 9699-9707
- ② Katsumi Takano, Yuki Sawaguchi, Yoshiaki Ichijo, Shun Sato and Kiyoshi Nakagawa, "Pre-distortion to mitigate SPM effect in optical BPSK-SSB fiber

transmission," Proceedings of SPIE on Optical Transmission Systems, Switching, and Subsystems VIII, 査読有、Vol. 7988, 2011, pp. 79881N_1-79881N_6, DOI: 10.1117/12.888657

- ③ Ryo Karube, Katsumi Takano, Tomohiro Ito and Kiyoshi Nakagawa, "The impact of waveband size on the number of ports of cross-connect in waveband switching networks," Proceedings of SPIE on Network Architectures, Management, and Applications VIII, 査読有、Vol. 7989, 2011, pp. 79890X_1-79890X_4, DOI: 10.1117/12.890128

- ④ Hiroki Sayama, Katsumi Takano, and Kiyoshi Nakagawa, "Delay time estimation for optical inverse multiplexing by parallel routes in WDM optical path networks with mesh topology," IEICE Electronics Express, 査読有、Vol. 6, No. 8, 2009, pp. 461-466

[学会発表] (計19件)

- ① 軽部良、高野勝美、伊藤智博、中川清司、波長群によるスイッチ規模低減効果のトポロジー依存性、電子情報通信学会 2012年総合大会、2012年3月20日、岡山大学(岡山市)
- ② 根本彩由里、高野勝美、光SSB変調における位相フィルタによる前処理の効果、平成23年度第8回情報処理学会東北支部研究会、2012年3月9日、山形大学(米沢市)
- ③ 高野勝美、光信号処理を用いた光単側波帯変調方式、電子情報通信学会「第3回集積光デバイスと応用技術研究会」(招待講演)、2012年2月2日、古河電工健康保健組合 逗子保養所・研修センター(逗子市)
- ④ 軽部良、高野勝美、伊藤智博、中川清司、波長群のグループ化方法と光クロスコネクタ規模に関する検討、電子情報通信学会第25回光通信システムシンポジウム、2011年12月15日、東レ総合研修センター(三島市)
- ⑤ Ryo Karube, Katsumi Takano, Tomohiro Ito and Kiyoshi Nakagawa, "Impact of waveband add/drop on optical cross connect size in waveband switching networks," The 16th OptoElectronics and Communications Conference, 2011年7月4日, The Splendor Kaohsiung (Kaohsiung, Taiwan)
- ⑥ 軽部良、高野勝美、伊藤智博、中川清司、波長群グループ化方法の光クロスコネクタ規模への影響、電子情報通信学会光通信システム研究会、2011年6月23日、和歌山大学(和歌山市)
- ⑦ 上見哲司、佐山紘貴、高野勝美、中川清

- 司、光パスの逆多重化におけるパラレル経路本数と遅延時間の関係、平成23年東北地区若手研究者研究発表会、2011年3月12日、仙台高等専門学校(仙台市)
- ⑧ 軽部良、高野勝美、上見哲司、中川清司、波長群パスネットワークにおける波長パスのグループ化方法によるスイッチ規模の変化、平成22年度電気関係学会東北支部連合大会、2010年8月26日、八戸工業大学(八戸市)
- ⑨ 高野勝美、一條義明、石原昌幸、中川清司、搬送波送出光SSB信号の光ファイバ伝送による波形劣化に関する検討、電子情報通信学会光通信システム研究会、2010年7月29日、ニューウェルシティ湯河原(熱海市)
- ⑩ Ryo Karube, Kumi Saito, Katsumi Takano, Fumitaka Suzuki, Tetsuji Joken, and Kiyoshi Nakagawa, "Impact of grouping method on switch size in waveband switching networks," The 15th Opto-Electronics and Communications Conference, 2010年7月5日、札幌コンベンションセンター(札幌市)
- ⑪ Katsumi Takano, Masayuki Ishihara, Yoshiaki Ichijo, and Kiyoshi Nakagawa, "Mitigation of SPM effect using pilot carrier on optical BPSK-SSB transmission," The 15th Opto-Electronics and Communications Conference, 2010年7月5日、札幌コンベンションセンター(札幌市)
- ⑫ 高野勝美、佐山紘貴、上見哲司、軽部良、中川清司、光パスの逆多重化における遅延時間に関する数値解析、電子情報通信学会光通信システム研究会、2010年6月25日、秋田大学(秋田市)
- ⑬ 石原昌幸、高野勝美、中川清司、ベクトル変調器を用いた搬送波送出光SSB信号のファイバ分散耐性、電子情報通信学会2010年総合大会、2010年3月16日、東北大学(仙台市)
- ⑭ 高野勝美、星洋平、中川清司、ビスマスEDFAのステップ応答特性解析、第64回応用物理学会東北支部学術講演会、2009年12月3日、日本大学工学部(郡山市)
- ⑮ 一條義明、石原昌幸、杉山倫隆、高野勝美、中川清司、適応的に光ファイバ分割を行う光ファイバ伝送計算法に関する基礎検討、第64回応用物理学会東北支部学術講演会、2009年12月3日、日本大学工学部(郡山市)
- ⑯ Xiaoyan Wang, Masanori Hanawa, Kazuhiko Nakamura, Katsumi Takano, and Kiyoshi Nakagawa, "Sideband suppression characteristics of optical SSB generation filter with sampled FBG based 4-taps optical Hilbert transformer," The 15th Asia-Pacific Conference on Communications, Oct. 8, 2009, Shanghai, China
- ⑰ 石原昌幸、高野勝美、中川清司、搬送波抑圧光単側波帯信号光ファイバ伝送におけるSPM前置等化方法に関する一検討、電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会、2009年9月15日、新潟大学(新潟市)
- ⑱ 王小燕、埴雅典、トウ翼強、高野勝美、中村一彦、中川清司、2,4と6タップ標本化FBG型光ヒルベルト変換器を用いる光SSB信号生成フィルタの特性の比較、電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会、2009年9月15日、新潟大学(新潟市)
- ⑲ Kohei Sasaki, Katsumi Takano, and Kiyoshi Nakagawa, "Performance comparison with various methods for optical single sideband signal generation," 2009 Tohoku-Section Joint Convention Record of Institutes of Electrical and Information Engineers, 2009年8月20日、東北文化学園大学(仙台市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.takanolab.yz.yamagata-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 勝美 (TAKANO KATSUMI)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：60302303

(2) 研究分担者

中川 清司 (NAKAGAWA KIYOSHI)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90282235
(H21~H22)

(3) 連携研究者

埴 雅典 (HANAWA MASANORI)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授
研究者番号：90273036
中村 一彦 (NAKAMURA KAZUHIKO)
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教
研究者番号：40402086