

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13985

研究課題名(和文) 光波による複素係数信号処理と超高速光ネットワーク論理回路

研究課題名(英文) Optical techniques for signal processing with complex coefficient and high speed network processing

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：微弱なエネルギーを単位とするフォトンを用いた信号処理は、超高速化、波長多重による大容量化と低消費電力化の点で優れており、通信システムに大きな技術進歩をもたらす可能性がある。本研究では、情報通信サービスの膨大な通信需要に対応できる新しい通信網構築技術の基礎となる光リンクや光ノード処理に適用可能な超高速光ネットワークのための光信号処理と光論理機能の基礎研究開発を行った。具体的な研究内容としては、コヒーレントな光信号を利用した複素係数信号処理による変復調相互変換技術と、将来の超高速ネットワークに用いる論理機能の提案とその性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：Signal processing by using photons with quantum energy has a possibility of communication systems to have a big progress of technology, because of the relative large capacity and low energy consumption by high speed operation and wavelength multiplexing. This study is a basic research and development of signal processing in the communication link and nodes for the high speed optical communication network in the next generation. In detail, this study includes two key technical issues. The first one is the conversion techniques of signal formats with different modulation scheme by signal processing with complex coefficient using the property of coherent light. The second is the logical functions for the future high speed optical networks.

研究分野：通信工学

キーワード：情報通信 光通信 信号処理 変復調 中継・交換

1. 研究開始当初の背景

携帯端末の普及やソーシャルネットワーク通信の展開を背景に、通信需要がますます増えている。この需要に応えるために、様々なボトルネックを解消していく必要がある。最新のデバイスと多重化技術が通信アクセス領域に適用されるに至り、ユーザからの通信情報が集約される基幹通信領域においては更なる大容量化が望まれる。またアクセス領域と基幹領域の仲立ちをする領域においては、速やかな信号変換が望まれる。

このような背景から、情報通信サービスの膨大な通信需要に対応できる新しい通信網構築技術の基礎となる光リンクや光ノード処理に適用可能な超高速光ネットワークのための光信号処理と光論理回路の基礎研究開発を行った。微弱なエネルギーを単位とする光子を介した信号処理は、超高速化、波長多重による大容量化と低消費電力化の点で優れており、この点に着目し、光波の電界複素振幅に処理を施す複素係数信号処理と、超高速光ネットワークに必要となる論理的機能の研究を行った。

2. 研究の目的

光波を用いる信号伝送の容量を抜本的に解決する手段として、従来の両側波帯を有する変調方式に代わり、片側側波帯のみを伝送に利用する単側波帯変調方式を基幹通信領域に用い、アクセス領域では従前のトランスポンダーが利用できるように両側波帯変調方式を用いる通信システムを考える。このようなシステムには、以下の課題がある。すなわち、(1) 単側波帯変調信号から両側波帯変調信号へのシームレスな信号変換技術、(2) 基幹領域における伝送上の問題を回避するため光単側波帯変調信号のピーク対平均電力を小さくする信号制御技術、(3) 単側波帯変調を利用する波長多重光通信網におけるネットワーク設計とその性能評価、である。本研究では、これらの課題に対して検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 単側波帯変調信号から両側波帯変調信号へのシームレスな信号変換技術を実現するために、位相感応光増幅器を活用する方法を考える。この方法は、光単側波帯信号を電気信号に置き換えることなく、両側波帯光信号に変換できる利点をもつ。

(2) 光単側波帯変調信号のピーク対平均電力を小さくする信号制御技術を実現するために、時間領域および周波数領域の二つの側面からそれぞれ提案を行う。時間領域処理方法としては、信号ピークの原因であるヒルベルト成分のピーク部分に対して、ある値以上の波形は固定値としてしまう方法である。周波数領域の方法としては、光単側波帯変調を生成する際のヒルベルト変換器の伝達関数を高域通過型とする方式である。

(3) 波長多重光網ではネットワーク全体のコストを抑えるために通信ノードにおけるスイッチの数量を減らす必要がある。そのために、波長チャンネルのグループ化が必要である。グループ化された波長群は同一のスイッチでスイッチングされるので、効率よくグループ化が行われれば、ネットワーク全体のスイッチ数量を減らすことができる。3種のグループ化方法を提案し、その性能を理論的に評価する。

4. 研究成果

(1) 単側波帯(SSB)変調信号から両側波帯(DSB)変調信号へのシームレスな信号変換技術:

光SSB信号と光DSB信号間の相互変換技術があれば、トラヒック需要の逼迫するところに周波数利用効率の高い光SSB変調方式を利用し、ユーザの設備は従前のままとすることができる。また、これらの処理を光波領域で実現できれば、複数のチャンネルを一括して変換処理でき、光ネットワークの透明性を生かすことができる。光SSB信号から光DSB信号への光学的な変換方法が求められている。

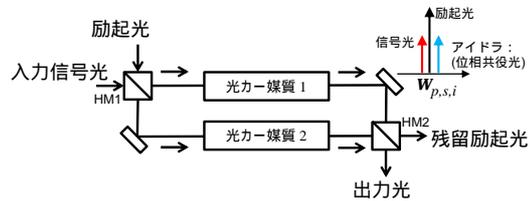


図1. 光カー媒質とマッハツェンダー干渉計を利用した位相感応光増幅器の構成

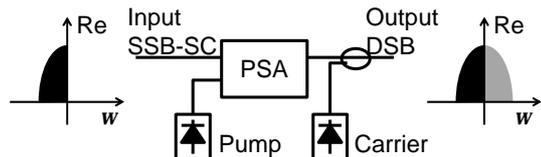


図2. 位相感応光増幅器を利用した光単側波帯変調信号から光両側波帯変調信号に変換するブロック図

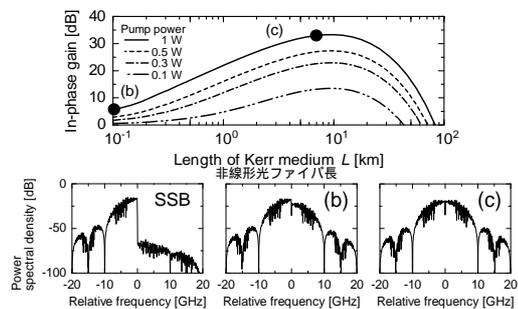


図3. PSAのカー媒質長および励起光強度と利得の関係(上図)、光SSB入力スペクトルおよび出力スペクトル

光SSB信号は、片側側波帯抑圧に寄与する直交位相成分を持つ。位相感応光増幅器(PSA)は、励起光位相と同位相光を増幅し、直交位相光は減衰する(図1)。したがって、PSAに光SSB信号を入力し、励起光を片側側波帯抑圧位相成分と直交位相とすることで、片側側波帯抑圧を解き光DSB変調に変換可能

と考えられる(図2)。

入力信号には LN-SSB 変調器によって生成された搬送波抑圧光 SSB 信号を用いた。ベースバンド信号は 10 Gbps NRZ 擬似ランダム符号、ヒルベルト変換は全ての周波数に対して  $-\pi/2$  移相するものとし、変調器での変調度は 0.05 とした。PSA は縮退 FWM を原理とし、その特性は、カー媒質である高非線形分散フラットファイバ(HNL-DFF)中の光伝搬を非線形シュレディンガー方程式を数値的に解くことで求めた。励起光は、波長を信号光と同一とし、その位相は光 SSB 信号のベースバンド信号が重畳されている位相と同一とした。

図3上は、PSA のカー媒質の長さおよび励起光強度を変えたときの同相成分の利得依存性である。また、図3下は、入力 SSB 信号のスペクトルと上図(b)(c)点の状況のときの PSA 出力スペクトルである。利得 15dB 以上のとき、二つの側波帯がほぼ復元でき両側波帯変調信号に変換できることがわかった。

(2-1) 光単側波帯変調信号のピーク対平均電力低減方法(ピーククリッピング方式)：

位相シフト法による搬送波抑圧光 SSB 信号はヒルベルト変換信号を用いるため、ビットパターンに依存して同相成分に対し直交成分のピーク強度が高くなる。そのため、マツハツェンダー干渉計をベースにした外部変調器では変調度が制限される他、光信号のピーク対平均電力比が大きく、ファイバ伝送に際し自己位相変調(SPM)効果に起因した波形歪みが生じるなどの問題があった。本研究では、問題の解決のために、時間領域処理の方法と周波数領域の方法をそれぞれ提案する。前者は本節で扱い、後者は次節で述べる。

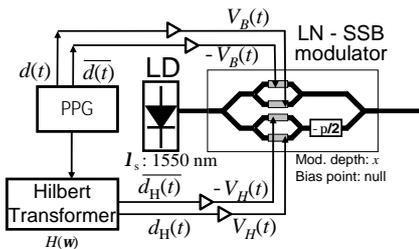


図4 . ヒルベルト変換器を用いる光 SSB 変調器構成

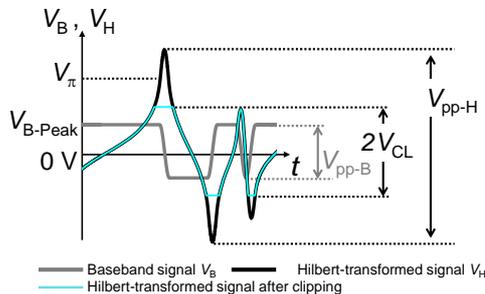


図5 . ピーククリッピング方式による光単側波帯変調信号のピーク電力抑制方法

位相シフト法による光 SSB 信号の変調方式は、情報源信号で光を変調し、同時に情報源をヒルベルト変換した波形で直交位相光を

変調する。それらを合波することで片側側波帯を抑圧する。その変調器構成を図4に示す。ピーク対平均電力比を低減するために、主たるピークの原因であるヒルベルト変換波形がある値以上の場合には固定値にしてしまう方法をピーククリッピング法として提案する(図5)。

クリッピング電圧を小さくしていくと、図6に見られるように時間波形のピークがなくなるのがわかる。その一方で、変調スペクトルの抑圧側波帯が次第に大きくなり、サイドバンド抑圧比 SSR が劣化していく(図7)。ピーク対平均電力比と側波帯抑圧比にはトレードオフの関係がある。クリッピング電圧の設定は、想定されるアプリケーションごと最適に選択することになる。

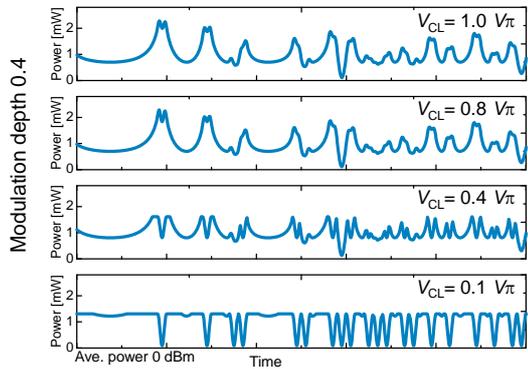


図6 . クリッピング電圧の変化に伴う光電力波形の変化

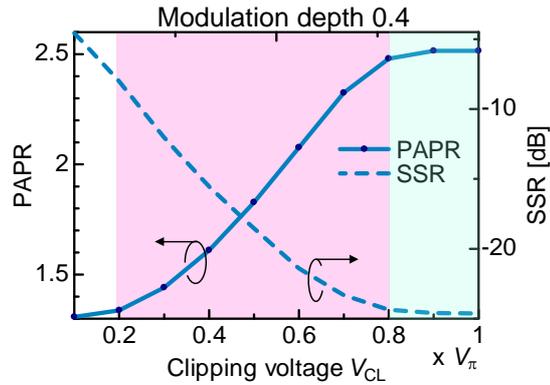


図7 . クリッピング電圧とピーク対平均電力比 PAPR および側波帯抑圧比 SSR の関係

(2-2) 光単側波帯変調信号のピーク対平均電力低減方法(高域通過ヒルベルト変換方式)：

光単側波帯変調信号のピーク対平均電力低減するために、ヒルベルト変換器の周波数特性を改善する方法を検討した。位相シフト法による SSB 変調にはヒルベルト変換器というオールパスフィルタが必要であるが、これを高域通過型とする方法を提案した。

検討した変調器周辺の構成は前節と同一(図4)である。ヒルベルト変換特性として、図8(a)は定義に基づく特性であるが、同図(b)のように高域通過型ヒルベルト変換器を用いる。ベースバンド信号は 2.5 Gbps、NRZ

疑似ランダム符号とし、高域通過型ヒルベルト変換器のカットオフ周波数を変えて、光電界の複素振幅軌跡を実験的に観測した。その結果を図9(a)-(b)に示す。図(a)はオールパスフィルタの状態であり、(b)はカットオフ周波数が0.5 GHzの高域通過型ヒルベルト変換を用いた結果である。この振幅軌跡が円に近いほど平均対ピーク電力比が小さい。したがって、この結果から高域通過型ヒルベルト変換法が有効であることがわかる。同図(c)-(d)はそれぞれの光スペクトルである。帯域幅に大きな劣化は見られないことがわかる。

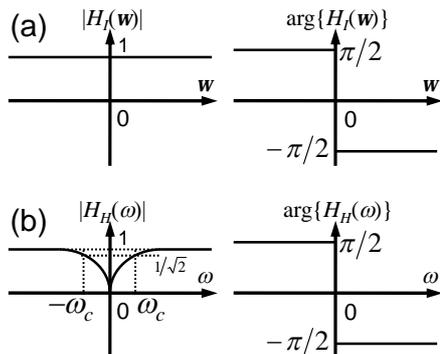


図8 . ヒルベルト変換器の周波数特性 ( a : 定義的ヒルベルト変換、 b : 高域通過型ヒルベルト変換 )

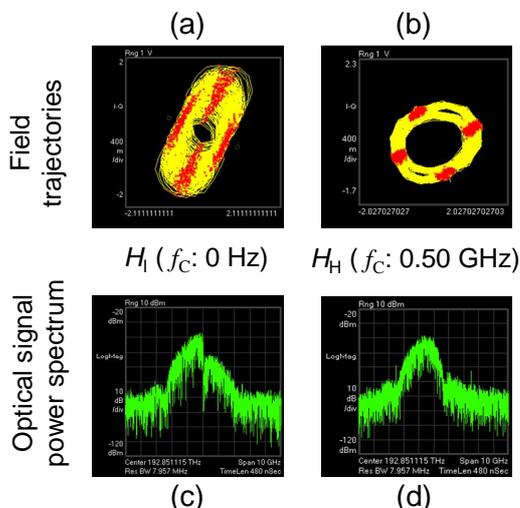


図9 . 高域通過型ヒルベルト変換器のカットオフ周波数と光SSB変調信号の平均対平均電力比の関係

### (3) 波長多重光通信網における超高速ネットワークの論理機能とその性能評価：

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。波長を経路に割り当てる光パスネットワークでは、電気信号処理を用いる必要がなく、通信のボトルネックが解消される。その一方で、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、同一波長群は同一のスイッチを利用することで、ネットワーク全体のスイッチ数を減らし、ひい

ては、全体の設備コストを抑えることができると思われる。本研究課題では、光パスネットワークの波長グループ化方法として3つの提案を行い、その性能を評価した。

ネットワークのトポロジーモデルは、日本の都市間を接続した形態を仮定した。ノードには波長群パスおよび波長パスをスイッチングする階層型光クロスコネクタを配置するものとした。光ノード規模は、このクロスコネクタの入力ポート総数で評価する。設計アルゴリズムは、最短経路が重要視されるように、まずダイクストラ法により各パスに最短経路を割り当て、その後、ネットワーク全体の波長数を低減するために、波長数均一化を行っていくつかのパスの経路を修正する。その後、経路の類似性をもとに、複数の波長パスを波長群にグループ化する。

グループ化方法は、以下の3つである。すなわち、(1) エンド-エンド法：スタートノードからデスティネーションノードまで全て同一経路である光パスを同一グループとする、(2) ワンエンド法：スタートノードが同一で、エンドノードが異なるが途中までの経路が同一である光パスを同一グループとする、(3) サブパス法：スタートノードおよびデスティネーションノードは異なるが、途中の経路が同一の光パスを同一のグループとする、である。

図10はその結果である。比較のためにグループ化しない場合をNo Groupingとしてプロットした。検証したいずれのグループ化方式も、グループ化しない場合に比して大幅にポート数を小さくできていることがわかる。この効果はトラフィックロードが4以上で顕著である。グループ化方式間での性能を比較すると、ワンエンド法とサブパス法がほぼ同等の性能であり、ワンエンド法に比してノード規模を小さくできることがわかった。

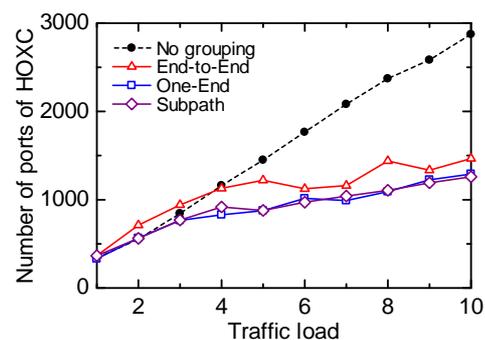


図10 . 波長群を構成する最大・最小波長パス数とクロスコネクタ装置入力ポート数の関係

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

K. I. Amila Sampath and Katsumi Takano, Phase-shift Method-based Optical VSB Modulation using High-pass Hilbert transform, IEEE Photonics Journal, 査

読有、vol. 8、no. 5、2016、Article #:5501513、DOI:10.1109/JPHOT.2016.2603236.

K. I. Amila Sampath and Katsumi Takano, Performance evaluation of peak-clipped optical BPSK-SSB modulated signal, *OSA Optics Express*, 査読有、Vol. 23, Issue 15、2015、pp. 19813 -19820、doi: 10.1364/OE.23.019813.

〔学会発表〕(計15件)

K. I. Amila Sampath、Masaki Shiraiwa、Yoshinari Awaji、Joji Maeda、and Katsumi Takano、50-km transmission experiment of phase-shift method-based carrier-emitted optical SSB signal without dispersion compensation、The 12th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems、2017年12月15日、Tu2E-04、pp.1-4、スリランカ。

K. I. Amila Sampath、Masaki Shiraiwa、Yoshinari Awaji、and Katsumi Takano、Experimentally observed field trajectories of optical BPSK-SSB/VSB modulated signals、The 24th Congress of the International Commission for Optics、2017年8月21日、Tu2E-04、東京都新宿区。

アミラサムパット、白岩雅輝、淡路祥成、高野勝美、位相シフト型搬送波抑圧光 SSB/VSB 変調の信号点軌跡、電子情報通信学会 2017 年総合大会、2017 年 3 月 22 日、B-10-18、通信講演論文集 2、p. 271、愛知県名古屋市。

阿部英宗、K. I. Amila Sampath、高野勝美、FIR ヒルベルト変換器窓関数による光 SSB 変調信号の側波帯抑圧比への影響、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会、2017 年 1 月 7 日、G508p1V2、徳島県徳島市。

阿部英宗、K. I. Amila Sampath、高野勝美、オーバーラップ周波数領域ヒルベルト変換を用いた光 SSB 変調の検討、2016 年映像情報メディア学会冬季大会、2016 年 12 月 21 日、12A-1、東京都新宿区。

高野勝美、光ファイバ通信用変復調技術の基礎、電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会 チュートリアルセッション「初学者のための光ファイバ通信」、招待講演、2016 年 9 月 20 日、BT-2-3、通信講演論文集 2、p. SS-30-31、北海道札幌市。

K. I. Amila Sampath、Katsumi Takano and Manabu Sato、Self-phase modulation based signal distortions of optical SSB-SC signal with pilot carrier、" The 21th Opto-Electronics and Communications Conference、2016 年 7 月 3 日、ThB1-3、新潟県新潟市。

K. I. Amila Sampath、高野勝美、パイロットキャリア光 SSB-SC 信号のキャリア電力と SPM 歪み、電子情報通信学会 2016 年総合大会、2016 年 3 月 15 日、B-10-60、通信講演論文集 2、p. 353、福岡県福岡市。

高野勝美、山田友章、遠藤雅人、位相感応光増幅器の光単側波帯変調信号に対する応答に関する検討、平成 27 年度情報処理学会東北支部研究会、2016 年 3 月 7 日、A3-4、pp.1-5、山形県米沢市。

K. I. Amila Sampath、Katsumi Takano and Manabu Sato、Transmission performance of peak-clipped carrier-suppressed optical SSB signal with variable clipping voltage、The 10th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems、2015 年 12 月 17 日、CIT-3-5、スリランカ。

K. I. Amila Sampath、高野勝美、LN 変調器変調曲線を利用した波形折り返しによる光 SSB 信号の PAPR 低減、電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2015 年 10 月 29 日、LQE2015-90、pp.149-153 大分県大分市。

Takahiro Suzuki and Katsumi Takano、Optical single sideband modulation with pre-processing of phase rotation for IoT networks、The 3rd International Conference on Smart Systems Engineering 2015、2015 年 10 月 8 日、CL10、山形県米沢市。

K. I. Amila Sampath、高野勝美、ピーククリッピング光 SSB 信号におけるクリッピングレベルの影響、電子情報通信学会 2015 年ソサイエティ大会、2015 年 9 月 8 日、B-10-61、通信講演論文集 2、p. 225、宮城県仙台市。

K. I. Amila Sampath and Katsumi Takano、PAPR reduction technique for optical SSB modulation using peak folding、" The 20th Opto-Electronics and Communications Conference、2015 年 6 月 28 日、JTua.35、上海、中国。

Katsumi Takano and Ryo Karube、Impact of wavelength grouping method on waveband switching size in Japan topology network、2015 IEEE International Broadband and Photonics Conference、2015 年 4 月 23 日、P1-2、pp. 19-22、バリ、インドネシア。

〔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