

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246066

研究課題名(和文) 全光ヒルベルト変換・逆変換を用いた光単側波帯変調方式

研究課題名(英文) Hilbert Transformers and Inverse Transformations for Optical Single Sideband Modulation using Optical Signal Processing

研究代表者

高野 勝美 (Takano, Katsumi)

山形大学・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) 37,700,000円

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)ヒルベルト逆変換の方法と全光学的側波帯復元方法、(2)平均対ピーク強度比を改善するためのヒルベルト変換方法、(3)波長数増大時を念頭にした波長群ネットワークにおける波長数節約アルゴリズムの光ノード規模への影響に関する研究。

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 inverse Hilbert transformation for optical SSB receivers and all-optical sideband recovery method, (2) A study on improve method about peak-to-average power ratio of optical SSB modulation, (3) A study on the influence of wavelength saving scheme on network node scale in in optical waveband switching networks.

研究分野：情報通信工学

キーワード：光ファイバ 光通信 変復調 単側波帯変調 ヒルベルト変換 光信号処理

1. 研究開始当初の背景

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で制限されており、1.55 μm 帯 C バンドで約 4THz である。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が必要である。これまで、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、我々は光単側波帯(光 SSB)変調方式を用いた周波数利用効率向上を提案している。

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、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 変調を実現するには、位相シフト法を用いるのが有効で、そのためには信号位相変換処理(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、受信器におけるヒルベルト逆変換機能の実現方法が課題である。また、光 SSB 変調信号は、これまでの検討から、平均対ピーク電力比が大きく、光ファイバ伝送時に非線形光学現象を誘起して受信波形が乱れるという問題が懸念されている。これらについても、有効な解決法が必要とされている。

2. 研究の目的

光ファイバ帯域の有効利用のために、光単側波帯変調方式を実現するための技術開発研究を行う。そのために必要な信号位相変換処理(ヒルベルト変換)として、広帯域化を念頭に、光導波路をベースにした光回路を用いる方法を提案し、光波領域で信号処理を行う技術を開拓する。これまでの研究から得られた理論的知見を発展させ、光単側波帯変調信号光ファイバ伝送方式を検討するとともに、ヒルベルト逆変換の方式の提案を行う。これにより、既存の光送受信器を置き換えることなく周波数利用効率の高い光信号に変換することができ、波長多重されている複数の光チャンネルを一括して処理できる。さらに、周波数利用効率の高い波長多重光ネットワークを念頭に、そのネットワーク設計に関する研究を行う。

3. 研究の方法

(1) ヒルベルト逆変換とその全光学的手法の研究:

光 SSB 変調通信ではその受信器の構成が未解決であった。これまで、理想的なホモダイ

ン検波をベースに検討されてきた。光 SSB 変調では、片側側波帯を抑圧するためにヒルベルト変換成分を作り、源信号と和により片側側波帯を抑圧している。これまでの受信器構成では、その直交成分は廃棄することで、受信器内で源信号を復元していた。ヒルベルト変換信号をヒルベルト逆変換により源信号に戻すことができれば、受信エネルギーの半分を廃棄せずに済む。受信器内のヒルベルト逆変換法を提案する。

また、光 SSB 変調の光ネットワーク応用を考えたとき、エンドユーザの送受信装置は旧来の両側波帯(DSB)変調に対応したものを利用できることは大切である。ネットワークの逼迫する領域では周波数利用効率の高い光 SSB 変調信号を使うことが期待される。したがって、これらの変調変換を実現することが要求される。本研究では、光 SSB 信号から光 DSB 信号への光学的な変換法を提案し、理論的な性能の評価を行った。

(2) 光 SSB 変調信号の光ファイバ伝送および平均対ピーク電力低減方法の研究:

光 SSB 変調信号の光ファイバ伝送実験を行うために、OFDM 無線信号を入力信号とした、多チャネル一括光ファイバ増幅中継伝送を行った。

また、光 SSB 変調は高い平均対ピーク電力比(PAPR)が懸案事項であるので、それを低減するためのヒルベルト変換法に関して、高域通過型ヒルベルト変換器を利用する方法を提案し、その実証を理論及び実験的に行った。

(3) 高い周波数利用効率光伝送を利用した光ネットワークの設計法に関する研究:

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、スイッチノード規模を低減するために波長群スイッチング技術が期待されている。また、ネットワーク全体で波長数を低減することはネットワークの設備コストを小さくすることに役立つ。本研究では、低遅延波長群ネットワークに、波長数を低減できるアルゴリズムを加えたネットワーク設計法について検討した。

4. 研究成果

(1) 光 SSB 変調信号の受信器におけるヒルベルト逆変換法:

光 SSB 変調通信方式では、片側側波帯を抑圧するためのヒルベルト変換成分(図 1、Q 成分)を受信器内で廃棄し、信号を復元することができる。しかし、Q 成分の廃棄はエネルギーの損失につながる。Q 成分を廃棄せずに信号復元に利用できればエネルギー利用率が高くなる。そのために、Q 成分をヒルベルト逆変換する必要がある。

ヒルベルト変換はすべての周波数に対して位相を $-\pi/2$ 移相する処理である。定義的に

は逆変換は $\pi/2$ 移相する処理である。しかし、光 SSB 伝送では、送信器内で光を変調した後 $-\pi/2$ 移相し、受信器フロントエンドで光学的にさらに $-\pi/2$ 移相する。したがって、受信器内部でもう一度 $-\pi/2$ 移相する、すなわちヒルベルト変換をすれば、全体として逆変換を施した処理と等価であると着想した。

この原理にもとづき、図1下および図2のような光 SSB 受信器構成を提案した。伝送用光ファイバ出力光は受信器で光ハイブリッドカップラとバランスPDにより I 成分と Q 成分に分けられる。I 成分は信号を表し、Q 成分はヒルベルト変換成分である。Q 成分は AD 変換された後、送信側で利用したものと同一ヒルベルト変換器を用いる。このとき、光送信器の SSB 変調器および光受信器のハイブリッドカップラで Q 成分はそれぞれ $-\pi/2$ 移相するものとする。

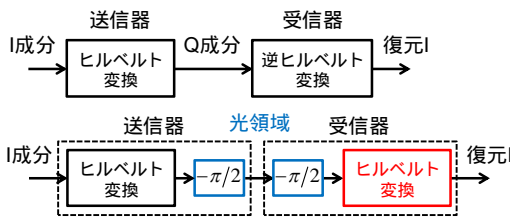


図1. ヒルベルト変換成分の逆変換に光位相回転を利用する原理図

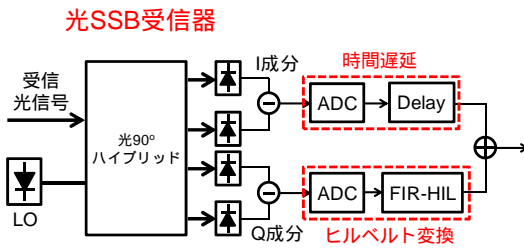


図2. 受信器にヒルベルト変換器を利用する受信器構成

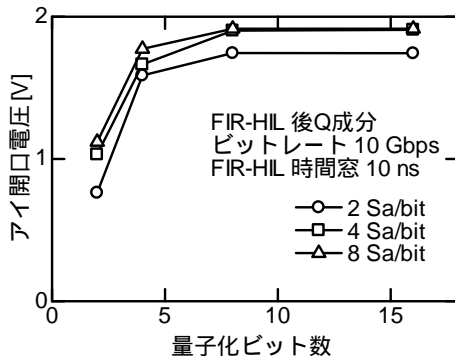


図3. AD 変換器の量子化ビット数と出力アイ開口度の関係

設計したヒルベルト変換器を用いて受信器の性能評価を行った。情報信号には、10 Gb/s NRZ 疑似ランダム符号 (PN7 段) を用い、ヒルベルト変換は定義に従った理想的なものを用いた。時間窓 10 ns でヒルベルト変換を行った場合の、AD コンバータのパラメータ (量子化ビット数およびタップ数) に対するアイ開口電圧を評価した。その結果、4

Sa/bit、量子化 8 bit 以上で開口電圧が最大になり、その値はおよそ 1.92 V であった。従前の Q 成分を廃棄する方法では、理想的には 1.0V の振幅であるので、受信強度をほぼ倍にできることが示された。フィルタ次数の低い場合では 8 Sa/bit の場合に比べ 2 Sa/bit、4 Sa/bit の方が高い開口電圧が得られた。これは、サンプリングレートが低い場合でも、時間窓を長くとることでヒルベルト変換器の特性を改善できるためである。

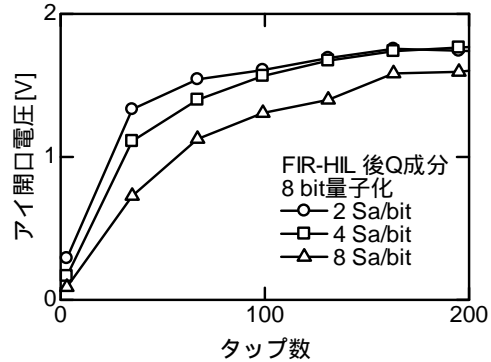


図4. 受信器内のヒルベルト変換器タップ数とアイ開口度の関係

(2) 光ファイバ中の非線形現象を利用したヒルベルト逆変換による光 SSB 信号の側波帯復元:

光 SSB 信号と光 DSB 信号間の相互変換技術があれば、トラフィ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。光両側波帯 (DSB) 信号から光 SSB 信号への光学的な変換技術は、引用文献で提案し実証実験結果を報告している。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。

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。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5)。

そこで、以下のような原理確認の理論検討を行った。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 疑似ランダム符号、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。このとき、PSA への入力信号平均光強度は 10 μ W、側波帯抑圧比は 47 dB であった。PSA は縮退 FWM を原理とし、その特性は、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。ノード最終段で混合するキャリア光は、波長および位相を PSA 出力光と同一とした。検波にはホモダイン検波を用い、局部発振光を 1 W とした。

図 6 下は、励起強度 0.5 W、媒質長 1 km の条件での出力光波形およびパワースペクトル密度である。同図上に入力光のそれを併せて示した。提案する変換方式により、光 SSB 信号を両側波帯化でき、出力時間波形の PAPR を抑えることができた。

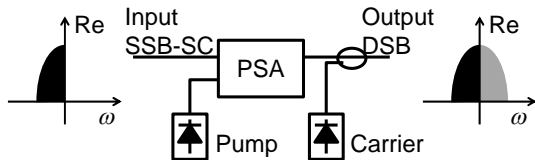


図 5 . 位相感応光増幅器を利用した光ヒルベルト逆変換による光 SSB 変調信号からの全光学的光 DSB 変調信号変換のブロック図

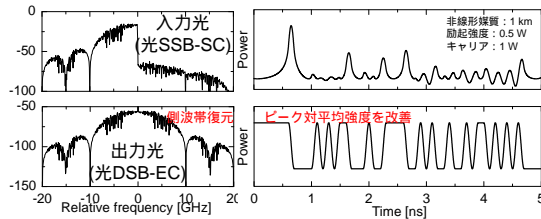


図 6 . 光 SSB/DSB 変換器の入力および出力のスペクトルと時間波形

(3) 光 SSB 変調光ファイバ伝送 :

光 SSB 変調信号の光ファイバ伝送の有効性を確認するために、地上波デジタル放送波を信号とし、100km の光ファイバ伝送実験を行った。この成果は、光 SSB 変調信号ファイバ伝送の実証としてだけでなく、地上波デジタル信号の難視聴問題の対策のひとつの解決策として応用が可能である。

光ファイバ伝送実験系を図 7 に示す。光 SSB 変調は、デュアルパラレルマツエンダー型光 SSB 変調器と、ヒルベルト変換器としてマイクロ波ハイブリッドカップラを用いた。地デジ放送波は、米沢天元台局 (送信電力: 100 W) から発せられた放送波を、山形大学工学部 7 号館屋上にて八木アンテナで受信し、その信号を利用した。6 つのチャンネルからなる。なお、受信アンテナの出力で観測した地デジ放送波 (28ch) の品質は、電界強度: 59 dB μ V、CNR: 30 dB、BER: 10^{-8} 以下であった。この放送波を光 SSB 変調器に印加した。印加信号電圧は約 170 mVpp であり、変調度は約 0.05 である。直流バイアスは変調器の変曲点に設定した。光変調器出力の側波帯抑圧比は、変調器のバイアス状態を調整して両側波帯変調および単側波帯変調の場合を作り、両者の受信光強度と地デジ信号電界強度から、10.04 dB と推定した。

伝送路光ファイバはシングルモード光ファイバ (SMF) を 100 km とし、その中間に EDFA

を配置した。光受信端では、フォトダイオードにより直接検波を行った。受信光強度を変えながら、地デジ信号のビット誤り率 (BER) を測定した。結果を図 8 に示す。どのチャンネルも 100km ファイバ伝送後も良好な映像が受信機で映し出された。また、BER が 2×10^{-4} 以下となるエラーフリーが観測された。

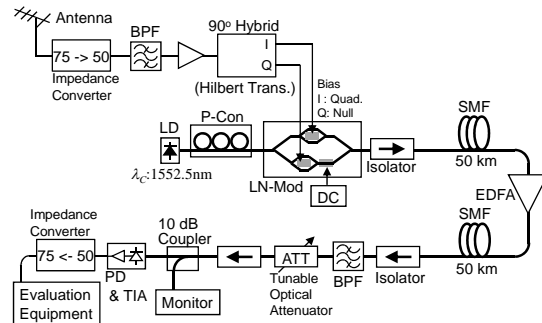


図 7 . 光 SSB 変調光ファイバ伝送実験の実験系

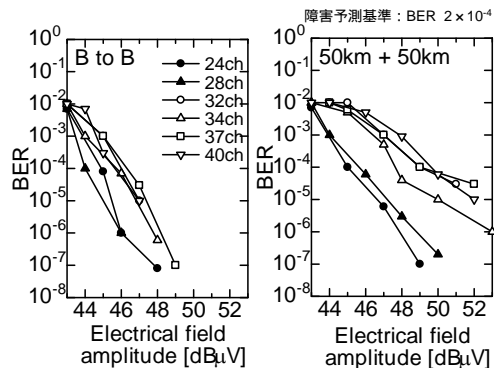


図 8 . 光ファイバ伝送におけるビット誤り率特性 (左: 0km、右: 100km)

(4) 光 SSB 変調信号の PAPR 改善 :

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、Mach-Zehnder 干渉計ベースの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。これを解決するために、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を図 9 に示す。ヒルベルト変換特性として、図 10 (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 10 Gbps、NRZ 疑似ランダム符号 (PN7 段) 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その平均対ピーク電力比 (PAPR) を評価した (図?)。その結果、カットオフ周波数を高くすれば、

PAPR を小さく抑えることができることがわかった。

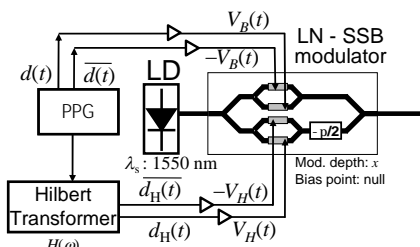


図 9 . ヒルベルト変換器を用いる光 SSB 変調器構成

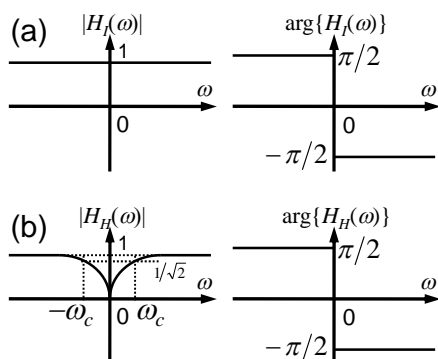


図 10 . ヒルベルト変換器の周波数特性 (a : 定義的ヒルベルト変換、b : 高域通過型ヒルベルト変換)

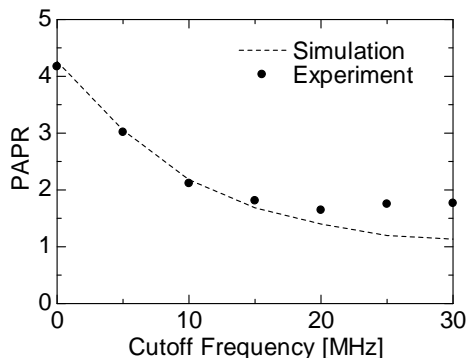


図 11 . 高域通過型ヒルベルト変換器のカットオフ周波数と光 SSB 変調信号の平均対平均電力比の関係

(5) 超高密度波長多重伝送光パスネットワークの効率的な設計法 :

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。また、ネットワーク全体で利用する波長数が増えると全体の設備コストが上昇するため、波長数を抑えた設計を行う必要がある。波長数が多大なリンクは波長群にまとめやすいが、設備コストのために波長数を抑えれば波長群としてまとめにくくなるというトレードオフの関係がある。そこで、波長群光ネットワークにおいて、波長数節約のための波長数均一化アルゴリズムを加えたネットワーク設計を行っ

た場合の光ノード規模を評価した。

数値モデルは、日本の都市間を接続するトポロジーであり、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、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、同一経路となる波長パスを波長群にグループ化する。

図 12 はその結果である。波長群を利用しないネットワークでは、波長均一化は大きく入力ポート低減に役立っている。サブパス法により波長群スイッチングを行う場合には、波長均一化の有無による入力ポート数に変化がないことがわかる。つまり、波長群ネットワークの設計時に波長数均一化を施しても悪影響はないことが示された。

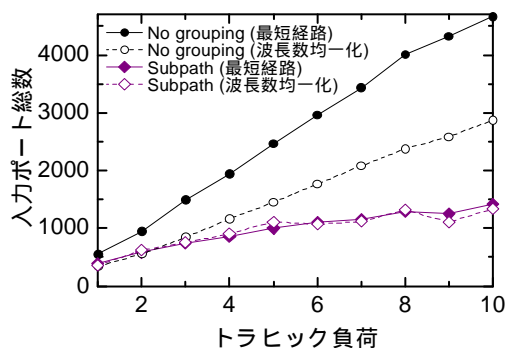


図 12 . 波長群を構成する最大・最小波長パス数とクロスコネクタ装置入力ポート数の関係

< 引用文献 >

K. Takano et al., 2007 Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, JThA48, (March 25-29, 2007).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

高野勝美、軽部良、齋藤慶太、武田利浩、伊藤智博、学術情報光コアネットワークにおける波長群スイッチングとリンク通過パス数均一化の効果、学術情報処理研究、査読有、16 巻、2012、pp. 131 - 137 .

[学会発表] (計 2 9 件)

Katsumi Takano, 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、クタ(インドネシア).
K. I. Amila Sampath, 高野勝美、搬送波抑圧光 SSB 信号のピーククリッピング法による PAPR 低減、電子情報通信学会 2015

年総合大会、2015年3月10日、立命館大学(滋賀県草津市)。

山田友章、高野勝美、光 SSB 変調信号の PSA を用いた全光学的 DSB 変換方法の検討、電子情報通信学会 2015 年総合大会、2015 年 3 月 10 日、立命館大学(滋賀県草津市)。
山田友章、高野勝美、位相感応増幅器を用いた光単側波帯信号の側波帯復元に関する検討、第 69 回応用物理学会東北支部学術講演会、2014 年 12 月 4 日、東北大学(宮城県仙台市)。

Katsumi Takano, Tomoaki Yamada, 100-km standard SMF transmission of Japanese digital terrestrial television broadcasting signal with EDFA and optical single sideband modulation, 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2014 年 10 月 20 日、札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)。

K. I. Amila Sampath, 高野勝美、LN 変調器変調曲線特性を利用した位相シフト型光 SSB 変調信号の PAPR 低減、電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会、2014 年 9 月 23 日、徳島大学(徳島県徳島市)。

K. I. Amila Sampath, Katsumi Takano, Optical VSB modulation based on phase-shift method and its PAPR characteristics for optical BPSK transmission, 2014 OptoElectronics and Communications Conference, 2014 年 7 月 6 日、メルボルン(豪州)。

K. I. Amila Sampath, 高野勝美、位相シフト型搬送波抑圧光残留側波帯変調とそのピーク対平均電力比、電子情報通信学会 2014 年総合大会、2014 年 3 月 18 日、新潟大学(新潟県新潟市)。

笠井真隆、高野勝美、FIR 型信号処理デジタルコヒーレント光 SSB 受信器の構成と性能、電子情報通信学会 2014 年総合大会、2014 年 3 月 18 日、新潟大学(新潟県新潟市)。

笠井真隆、K. I. Amila Sampath, 高野勝美、デジタル信号処理を用いた搬送波抑圧光 SSB 信号の受信器構成、電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会、2013 年 9 月 17 日、福岡工業大学(福岡県福岡市)。
高野勝美、K. I. Amila Sampath, 笠井真隆、45 度前置移相処理を用いる 2 値光単側波帯変調方式の提案、電子情報通信学会光通信システム研究会、2013 年 7 月 25 日、すみだ産業会館(東京都墨田区)。

K. I. Amila Sampath, Katsumi Takano, An analysis on sideband suppression of optical SSB modulation for driving signals with time delay, 2013 年電子情報通信学会総合大会、2013 年 3 月 19 日、岐阜大学(岐阜県岐阜市)。

高野勝美、効率の良い大容量光ファイバ通信に向けて、先端電力工学寄附講座主催

10 回研究交流会、招待講演、2012 年 11 月 2 日、東北大学(宮城県仙台市)。

高野勝美、山田友章、K. I. Amila Sampath、地デジ放送波の光 SSB 変調光ファイバ伝送実験、電子情報通信学会 2012 年ソサイエティ大会、2012 年 9 月 11 日、富山大学(富山県富山市)。

高野勝美、一條義明、K. I. Amila Sampath、及川幸一、位相シフト型光単側波帯変調における高域通過型ヒルベルト変換器の効果に関する検討、電子情報通信学会光通信システム研究会、2012 年 7 月 26 日、ニューウェルシティ湯河原(静岡県熱海市)。

高野勝美、軽部良、齋藤慶太、伊藤智博、中川清司、リンク間の波長数を均一化した波長群光ネットワークにおけるスイッチ規模低減効果の検討、電子情報通信学会光通信システム研究会、2012 年 6 月 22 日、山形大学(山形県米沢市)。

Katsumi Takano, Yoshiaki Ichijo, Koichi Oikawa, Masaru Sugimoto, Kiyoshi Nakagawa, Peak level mitigation of optical SSB modulation using highpass Hilbert transformations, Asia-Pacific Microwave Photonics Conference 2012, 2012 年 4 月 25 日、コープイン京都(京都市中京区)。

[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

佐藤 学 (SATO, Manabu)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50226007

(H24~H25)

(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・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