

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630146

研究課題名(和文) 直接検波光受信器を用いたストークスペクトル変復調方式の研究

研究課題名(英文) Optical communication systems using Stokes-vector direct detection

研究代表者

菊池 和朗 (Kikuchi, Kazuro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50134458

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)：光信号のストークスペクトルは、光の絶対位相に依存せず、 x および y 偏波間の位相差と振幅比で決定される。したがって、ストークスペクトルを変調パラメータに用いれば、光信号の絶対位相に不感応な光通信システムを実現できる。このようなシステムでは、ストークス空間で効率的な多値化が可能となり、しかも多値信号を直接検波を用いて復調できる。本研究では、ストークス空間での多値化の方法、復調アルゴリズムについて述べたのち、16相多値信号の符号誤り率特性のシミュレーション結果を示す。25Gsymbol/sで16多重することにより、100Gbit/sを実現できることを明らかにする。

研究成果の概要(英文)：The Stokes vector of an optical signal does not depend on its absolute phase; therefore, we can construct the phase-insensitive optical communication system, using the Stokes vector as a modulation parameter. In such a system, multi-level optical signals can effectively be designed in the three-dimensional Stokes space and demodulated by direct detection, where low-complexity digital-signal processing is employed. We discuss the receiver configuration for the multi-level signal in the Stokes space and the efficient DSP algorithm for demodulating such a signal. Simulation results demonstrate that 16-ary signals in the Stokes space have good bit-error rate characteristics. Especially, the 16-ary signal at the moderate symbol rate of 25 Gsymbol/s can reach the bit rate of 100 Gbit/s even by using direct detection.

研究分野：光通信

キーワード：光ファイバ通信

1. 研究開始当初の背景

デジタル・コヒーレント光ファイバ通信技術が実用化され、一波長あたり 100Gbit/s の伝送速度で、1,000km 級の基幹伝送システムへの導入が開始されている。一方、このようなデジタル・コヒーレント光ファイバ通信システムの実用化によっても、従来の直接検波方式の重要性が薄れたわけではない。光イーサネット伝送に代表されるような伝送距離数 10km 以下のシステムでは、一波長あたり 100Gbit/s の大容量伝送を、直接検波方式を用いて低価格、低消費電力で実現することが望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、3次元ストークス空間において、強度変調と偏波変調を含む自由度の高い多値光信号設計を行い、この信号を直接検波受信器によって復調する新しい光変復調方式を提案・実証する。この方式により、直接検波方式を用いた場合でも、一波長あたり 100Gbit/s の伝送速度が達成できることを示す。

光信号のストークスベクトルは、光の絶対位相に依存しない。したがって、ストークスベクトルを変調パラメータに用いれば、従来の直接検波受信器を用いて復調を行うことができる。一方、3次元ストークス空間での信号設計により、効率的な多値化が可能となるので、これまでのIM・DD方式の性能を凌駕する伝送性能が期待される。

本方式により、直接検波方式により100 Gbit/sの伝送速度が達成できることが示されれば、光イーサネット伝送など、低価格性、低消費電力性が要求される短距離・大容量光伝送技術に大きなインパクトを与えることができる。

3. 研究の方法

研究方法は以下の3項目からなる。

(1) 3次元ストークス空間での強度変調と偏

波変調を含む多値光信号設計法を確立し、100Gbit/s 多値光変調を可能にする光変調器の構成について検討する。

(2) 3次元ストークス空間での多値光信号を、直接検波方式を用いて復調するためのDSP アルゴリズムについて検討し、光回路と DSP 回路をあわせた受信器の設計を行う。

(3) 3次元ストークス空間における多値信号の符号誤り率特性(BER)を、計算機シミュレーションにより評価する。

本方式による 100Gbit/s 実現の可能性と課題を明らかにして、研究を完了する。

4. 研究成果

図1にストークスベクトル変調器の構成を示す。変調器 AM(Amplitude modulator)1 は、光強度 S_0 を変調する。変調器 AM2 は、この強度変調光を2つの出力ポートにパワー分岐するための、マッハ・ツェンダー(Mach Zehnder) 変調器である。PM(Phase modulator) は分岐された信号間に位相差を与えるための位相変調器である。これら2つのパスの信号光は、偏波ビームコンバイナ(Polarization beam combiner: PBC)を用いて、一方が x 偏波、他方が y 偏波となるように合波される。ストークスベクトルは、以下のように生成できる。

$$\mathbf{S} = S_0 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cos \delta \\ \sin \theta \sin \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

ストークス空間で偏波状態に対する多値変調を行う場合、パワー一定(すなわち S_0 一定)の条件のもとで、信号点間のユークリッド距離が最大となるような信号点配置をとることが望ましい。図2は、8相(Octal)ストークスベクトル変調信号の信号点配置である。正六面体の頂点に、それぞれ信号点を配置するのが最適であることは明らかである。すなわちこれらのストークスベクトルは

$$\mathbf{S}_r = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \pm 1 \\ \pm 1 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

で与えられる。さらに、この偏波状態を維持したまま光強度 S_0 、すなわち原点から信号点までの距離を I_0 と $3I_0$ ($I_0 > 0$) の間で2値変調すれば、さらに多値数を 16 に上げることができる。

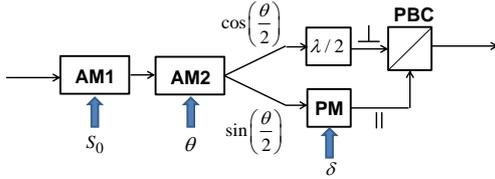


図1 ストークスベクトル変調器の構成。

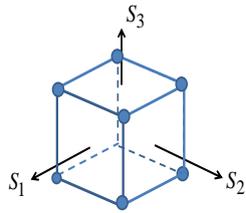


図2 8相ストークスベクトル変調方式の信号点配置。さらに強度を2値変調することにより、16相変調が実現できる。

図3の左半分の光回路は、ストークスアナライザと呼ばれる。ポラライザ(0° Pol)は、 x 偏波を通過させる。ポラライザ(45° Pol)は 45° 直線偏波を通過させる。 $1/4$ 波長板($\lambda/4$)の速軸は、 x 軸方向に調整される。信号光は4分岐され、それぞれの分岐路において信号強度 S_0 、 x 偏波成分 I_x 、 45° 直線偏波成分 I_{45} 、および右旋円偏波成分 I_R が測定される。

フォトダイオード(PD)からの4つの出力は4チャンネルのAD変換器(ADC)を用いてデジタル信号に変換される。第一分岐から抽出されたクロック(CLK)にしたがって、ADCによるサンプリングが行われる。サンプリングレートはシンボルあたり1サンプルである。ストークスベクトルは以下のように計算される。

$$\mathbf{S}(k) = \begin{bmatrix} 2I_x(k) - S_0(k) \\ 2I_{45}(k) - S_0(k) \\ 2I_R(k) - S_0(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで k はサンプル番号を示す。

信号光が光ファイバを伝送したとき、光ファイバの複屈折により SOP の初期値 $\mathbf{S}_r = [\pm 1 \ \pm 1 \ \pm 1]^T / \sqrt{3}$ は受信端で基準ベクトル $\mathbf{v}_i(k)$ ($i=1, \dots, 8$) に変化すると仮定する。これらをあらかじめ、トレーニング信号として測定しておく。次に基準ベクトル $\mathbf{v}_i(k)$ と測定されたストークスベクトル $\mathbf{S}(k)$ を用い、以下の操作によって復調を行う。

(1) 受信された規格化ストークスベクトル $\mathbf{S}(k)/S_0(k)$ と 8 つの基準ベクトル $\mathbf{v}_i(k)$ の内積をとる。内積が最大となる基準ベクトルを $\mathbf{v}_n(k)$ とする。

(2) 測定されたストークスベクトルの大きさ S_0 を 2 値に弁別する。

この操作により測定されたストークスベクトルはストークス空間で弁別され、復号が完了する。

基準ストークスベクトルは、光ファイバの複屈折の変動によってゆっくりと変化する。したがって基準ストークスベクトルの変動を追尾する必要がある。 k 番目のサンプルにおいて、測定された規格化ストークスベクトルが n 番目の基準ストークスベクトルと判定されたとしよう。すると n 番目の基準ストークスベクトルは、測定された規格化ストークスベクトルを用いて、以下の式で更新される。

$$\mathbf{v}_n(k+1) = \frac{\mathbf{v}_n(k) + \mu \mathbf{S}(k) / S_0(k)}{|\mathbf{v}_n(k) + \mu \mathbf{S}(k) / S_0(k)|} \quad (4)$$

ここで μ はステップサイズパラメータである。

ただし偏波変動の速度は高々 10kHz 程度であるので、必ずしもシンボルごとに基準ベクトルを更新する必要はない。このため、実装上問題となる図3におけるフィードバック遅

延が、DSP 性能を劣化させることはない。これらの特長は、上記アルゴリズムの実装を極めて容易にすると考えられる。その反面、上記のアルゴリズムでは、適応的な信号等化を行うことができない。これは、ストークスベクトルは信号の絶対位相を含まないためである。このため、ストークスベクトルを用いた光伝送は、偏波モード分散の影響が小さい 100km 程度の距離に限定されると思われる。

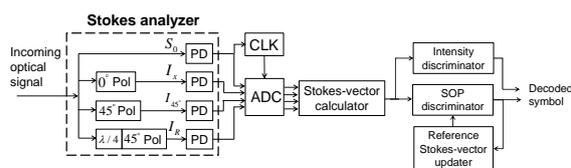


図 3 受信器構成および DSP アルゴリズムの概要。

計算機シミュレーションにより、16 相ストークスベクトル変調方式の符号誤り率特性を偏波、ビット当たりの CNR の関数として評価した。信号強度 S_0 は I_0 と $3I_0$ の 2 値で変調されており、強度弁別の閾値は $2I_0$ とした。光電界にはガウス雑音を付加し、CNR を変化させた。シンボル数 N は 2^{20} とした。また、信号光の位相雑音によるスペクトル線幅を $\delta f T = 10^{-2}$ とした。 T はシンボル間隔である。信号光の偏波状態(SOP)をポアンカレ球上でランダムに変化させた。緯度、経度の変化率は 2×10^{-6} rad/symbol であり、この値は実際のシステムで観測される値よりずっと大きい。SOP 追尾のためのステップサイズパラメータは $\mu = 1/2^7$ とした。

図 4 の赤丸は、CNR/bit/pol の関数として計算された BER 特性である。BER 特性は、レーザのスペクトル幅や SOP 変動によって劣化していないことを確認している。比較のために、偏波多重 QPSK 変調信号(DP-QPSK) および単一偏波強度変調信号 (SP-IM・DD) の符号誤り率特性を、それぞれ黒丸および青丸で示した。

この変調方式は、シンボルレート 25Gsymbol/s で 100Gbit/s の伝送速度が得られるが、100Gbit/s DP-QPSK 変調方式に対するペナルティーは 7dB 程度である。一方、SP-IM・DD 方式に対するペナルティーは 3dB である。信号等化が困難なこと、DP-QPSK に比べて受信感度が劣化するなどの欠点はあるものの、信号処理のための計算量は極めて少ないため、100km 以下の短距離の伝送には有効な方式であると考えられる。

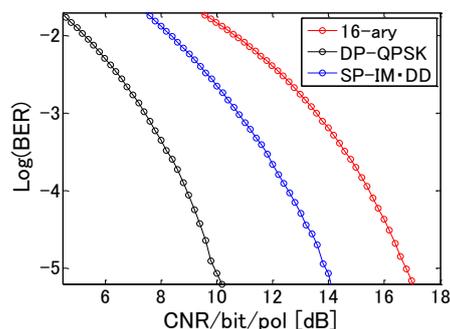


図 4 符号誤り率特性。

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 1 件)

- (1) K. Kikuchi and S. Kawakami, "Multi-level signaling in the Stokes space and its application to large-capacity optical communications," *Optics Express*, vol.22. no.7, pp.7374-7387, April 2014, 査読有, DOI:10.1364/OE.22.007374

[学会発表] (計 4 件)

- (1) K. Kikuchi, "Digital polarization demultiplexing at direct-detection receivers," Workshop on "Emerging Optical Access Networking Technologies" in Asia Communication and Photonics Conference (ACP 2015), Nov.20, 2015, Hong Kong, China
- (2) K. Kikuchi, "Simple and efficient algorithm for polarization tracking and demultiplexing in dual-polarization IM/DD systems," Optical Fiber Communications Conference (OFC 2015), Th1E.3, March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA
- (3) K. Kikuchi, "Digital manipulation of states of polarization at optical receivers," OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on

Optical Fibre Technology 2014
(OECC/ACOFT 2014), TU4C-1, July 6-10,
2014, Melbourne, Australia

- (4) 菊池 和朗, “偏波多重・多値強度変調信号を復調する新しい直接検波光受信器の提案と性能解析,”電子情報通信学会光通信システム研究会 2014 年 5 月 16 日, 機械振興会館(東京都港区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI, Kazuro)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 50134458