

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02017/030137

発行日 平成30年5月31日 (2018.5.31)

(43) 国際公開日 平成29年2月23日 (2017.2.23)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO4B 10/516 (2013.01)	HO4B 10/516	5K102
HO4B 10/61 (2013.01)	HO4B 10/61	
HO4J 14/04 (2006.01)	HO4J 14/04	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 24 頁)

出願番号 特願2017-535544 (P2017-535544)	(71) 出願人 504182255 国立大学法人横浜国立大学 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号
(21) 国際出願番号 PCT/JP2016/073965	
(22) 国際出願日 平成28年8月17日 (2016.8.17)	
(31) 優先権主張番号 特願2015-162724 (P2015-162724)	(74) 代理人 100103894 弁理士 冢入 健
(32) 優先日 平成27年8月20日 (2015.8.20)	(72) 発明者 園分 泰雄 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内
(33) 優先権主張国 日本国 (JP)	(72) 発明者 渡邊 達彦 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79番1号 国立大学法人横浜国立大学内
	Fターム(参考) 5K102 AA02 AA61 AD15 AH14 AH24 AH31 PA11 PH01 PH22 PH49

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 伝送装置、及び伝送方法

(57) 【要約】

モード空間多次元変調において、受信信号の同時性を確保し、モード間の群速度差による受信信号の遅延差を処理するデジタル信号処理の負荷を大幅に低減する。多次元変調において、変調空間内でシンボル間隔を大幅に狭めることなく1シンボル当たりのビット数を増加させ、信号強度に対する雑音の比率 (S/N比) を向上させる。変調を行う多次元の変調空間として、従来用いていなかったモード間の位相、及び偏光間の位相を用いることによって変調空間の次元を高めるものであり、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの複数の振幅及び位相を多次元の変調空間として用いる。モード間の位相、及び偏光間の位相を変調空間として用いて、多次元変調の変調の次元数を高め、1シンボル当たりの伝送情報量を高める。

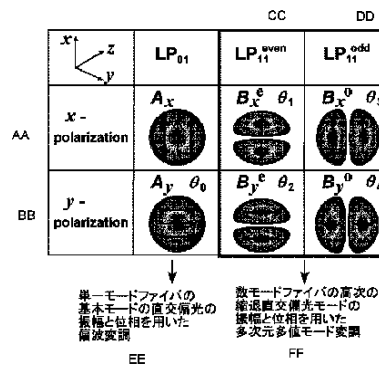


図1

AA x-polarization
 BB y-polarization
 CC even
 DD odd
 EE Polarization modulation using amplitude and phase of fundamental mode orthogonal polarized light in a single-mode fiber
 FF Multidimensional multi-level mode-modulation using amplitude and phase of high-order degenerate orthogonal polarization modes of multi-mode fibers

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

数モードファイバを伝送路とし、前記数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送を行う伝送装置において、

送信部のモード変調、伝送路のモード伝搬、及び受信部のモード復調において、多値の伝送情報を、前記数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの複数の振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行うことを特徴とする、伝送装置。

【請求項 2】

前記数モードファイバの高次モードにおいて縮退モードのLPモードと直交偏光成分とを用い、前記各縮退モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多値の伝送情報を前記多次元の変調空間の各座標に対応付ける多次元多値モード変調を行った信号光を送信する送信部と、

前記信号光を受信し、前記多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光をコヒーレント検出によって検出し、

前記検出した干渉光から偏波分離によって直交偏光成分を分離し、

前記縮退直交偏光成分から縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調する多次元多値モード復調を行って前記伝送情報を出力する受信部とを備えることを特徴とする、請求項 1 に記載の伝送装置。

【請求項 3】

数モードファイバを伝送路とし、前記数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送を行う伝送方法において、

モード変調、モード伝搬、及びモード復調において、多値の伝送情報を、前記数モードファイバの高次モードの複数の縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行うことを特徴とする、伝送方法。

【請求項 4】

送信側において、前記数モードファイバの高次モードにおいて縮退モードのLPモードと直交偏光成分とを用い、前記各縮退モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多値の伝送情報を前記多次元の変調空間の各座標に対応付ける多次元多値モード変調を行い、多次元多値モード変調で得られた信号光を送信し、

受信側において、前記信号光を受信し、前記多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光をコヒーレント検出によって検出し、

前記検出した干渉光から偏波分離によって直交偏光成分を分離し、

前記直交偏光成分から縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調する多次元多値モード復調を行って前記伝送情報を出力することを特徴とする、請求項 3 に記載の伝送方法。

【請求項 5】

数モードファイバを伝送路とし、前記数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送情報を送信する送信機において、

搬送光の光源、前記搬送光を複数の分岐光に分岐する光分岐器、及び、前記複数の分岐光に多次元多値モード変調を施す多次元多値モード変調器を備え、

前記多次元多値モード変調器は、複数の多値変調器及びモード合波器を備え、

前記多値変調器は、前記伝送情報に基づいて、前記搬送光について前記数モードファイバの高次モードの各縮退直交偏光モードの振幅及び位相を変調し、

前記モード合波器は、前記各多値変調器で変調した複数の縮退直交偏光モードの成分を合波し、

送信機のモード変調において、多値の伝送情報を、前記数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調に

10

20

30

40

50

よる伝送を行うことを特徴とする、送信機。

【請求項 6】

前記多値変調器は、縮退直交偏光モードの x 偏光成分及び y 偏光成分について、x 偏光成分の振幅を変調する X 側振幅変調器、及び x 偏光成分の位相を変調する X 側位相変調器と、y 偏光成分の振幅を変調する Y 側振幅変調器、及び y 偏光成分の位相を変調する Y 側位相変調器と、

x 偏光成分を変調した x 偏波と y 偏光成分を変調した y 偏波とを偏波合波する偏光ビームスプリッタとを備えることを特徴とする、請求項 5 に記載の送信機。

【請求項 7】

数モードファイバを伝送路とし、前記数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送情報を受信する受信機において、

多次元多値モード復調によって、前記縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調し伝送情報を出力する多次元多値モード復調器を備え、

前記多次元多値モード復調器は、

前記伝送路の出射端の信号光と局部発振光とを混合して干渉光を生成して、前記多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光を出力する混合器と、

前記干渉光を偏波分離して、直交偏光成分の x 偏光成分及び y 偏光成分を分離する偏波分離器と、

各偏光成分に分離した干渉光を検出する光検出器と、

前記光検出器で検出した交流成分の加減算によって、前記直交偏光成分から各縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を得る演算器を備え、

受信機のモード復調において、多値の伝送情報を、前記数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行うことを特徴とする、受信機。

【請求項 8】

前記混合器は、局部発振光を発する局部発振器と半透明鏡とを備え、

前記半透明鏡の一方の入射端に前記伝送路の出射端の信号光を入射させ、前記半透明鏡の他方の入射端に前記局部発振器が発する局部発振光を入射させ、出射端から信号光と局部発振光とを混合して得られる干渉光を出射し、

前記光検出器は、前記偏波分離器が分離した x 偏光成分の出射光を入射させる X 側 4 象限分割光検出器と、前記偏波分離器が分離した y 偏光成分の出射光を入射させる Y 側 4 象限分割光検出器とを備え、X 側 4 象限分割光検出器及び Y 側 4 象限分割光検出器はそれぞれ 4 つの各象限から位相を異にする出力信号を出し、

前記演算器は、X 側 4 象限分割光検出器の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して x 偏光成分の振幅及び位相を演算する X 偏光成分演算器と、Y 側 4 象限分割光検出器の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して y 偏光成分の振幅及び位相を演算する Y 偏光成分演算器とを備えることを特徴とする、請求項 7 に記載の受信機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本願発明は、光ファイバ通信による伝送技術に関し、多次元多値モード変調による伝送装置、及び伝送方法、並びに伝送装置を構成する送信機並びに受信機に関する。

【背景技術】

【0002】

大容量光通信技術において、伝送媒体として単一モードファイバの他、より大きな通信容量を有したモード多重用数モードファイバが用いられようとしている。複数モードの伝送を可能とするファイバとして、コア径が太いマルチモードファイバや、コア径を単一モードファイバと多モードファイバとの中間とする数モードファイバがある。数モードファイバでは 10 個程度以下の複数の伝搬モードに異なる情報を載せてモード多重伝送を行う

10

20

30

40

50

。モード多重伝送では、伝送時に複数の単一モード信号をモード多重信号に合波して多モード伝送路で送信し、受信側において受信したモード多重信号を複数の単一モード信号に分波した後に復号する。

【 0 0 0 3 】

光ファイバ通信では大容量化のために多値変調技術に加えて多次元変調技術が提案されている。多次元変調空間としてストークス空間内の偏波変調を用いる3次元多値変調（非特許文献1）や、高次モードを変調空間に用いる多次元変調（非特許文献2, 3）が提案されている。

【 0 0 0 4 】

なお、ここで、モード多重は複数の信号光を光ファイバの複数の異なる伝搬モードで伝送する多重伝送であり、多値変調は複数の光の状態に複数の伝送情報に対応付ける変調であり、変調空間は多次元変調を行う符号空間の数学的な次元をもつ空間である。

10

【先行技術文献】

【非特許文献】

【 0 0 0 5 】

【非特許文献1】K. Kikuchi. And S.Kawakami. Optics Express. Vol.22. no.7 pp.7374-7387. Apr.2014

【非特許文献2】L.B.Djordjevic, T. Liu, L.Xu. and T. Wang, Photonics J., vol.4. no.5. pp.1325-1332, Oct.2012

【非特許文献3】S.O.Arik, D.S. Millar, T. Koike-Akino, K. Kojima, and K. Parsons, OFC2014, San Francisco. W4J.1.March 2014.

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 6 】

上記した非特許文献1に記載の偏波変調は、単一モードファイバにおいて基本モードのx偏光とy偏光の振幅のほかに、x偏光とy偏光間の位相差を変調の次元に用いる3次元変調空間における多値変調であるが、高次モードを用いるモード変調ではない。また、上記した非特許文献2と非特許文献3の多値変調技術は、モード空間多次元変調において、多値変調を行う変調次元として全てのモード空間を平等に扱っている。同時に伝送される複数の伝搬モードは、モード間で群速度に差異があるため、全てのモード空間を用いて伝送を行うと、モード間の群速度差によって受信信号に遅延差が生じる。そのため、受信端において到達時間が異なる複数の受信信号を処理するために、MIMO処理等のデジタル信号処理が必要となる。このMIMO処理は受信信号の遅延差が大きいとデジタル信号処理の大きな処理量が必要であるため、受信端側の負荷が大きくなるという問題がある。

30

【 0 0 0 7 】

また、多値変調において、IQ面上の信号点を増やすQAM変調によって1シンボル当たりのビット数を増やすことができる。例えば16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 変調によれば、1シンボルで4ビットを伝送できる。しかしながら、IQ面上の2次元の面内で信号点を増やすことでビット数を増やすことができるが、IQ面内でのシンボル間の間隔（符号間距離）が狭くなり、信号強度に対する雑音の比率であるS/N比が犠牲になるという問題がある。したがって、長距離伝送して雑音が累積しているような場合には、多値変調信号は符号誤りを起こし易くなるという問題がある。

40

【 0 0 0 8 】

そこで、本願発明は、前記した従来の問題点を解決し、モード空間多次元変調において、受信信号の同時性を確保し、モード間の群速度差による受信信号の遅延差を処理するデジタル信号処理の負荷を大幅に低減することを目的とする。

【 0 0 0 9 】

また、多次元変調において、変調空間内でシンボル間の符号間隔を大幅に狭めることなく1シンボル当たりのビット数を増加させ、信号強度に対する雑音の比率（S/N比）を向上させることを目的とする。

50

【課題を解決するための手段】

【0010】

本願発明の伝送装置及び伝送方法は、多次元多値モード変調によって情報伝送を行うものである。多次元多値モード変調において、「多次元」は変調を加える変数（あるいはパラメータ）の数が3つ以上の複数あることを表し、「多値」はその変調に用いる変数に0または1のみではなく多段階の変調を加えることを表し、「モード変調」は光ファイバ内を伝播する複数の固有モードの振幅と位相を多次元変調の変数に利用することを表している。

【0011】

本願発明は、空間変調を行う多次元の変調空間として、従来用いていなかったモード間の位相、及び偏光間の位相を用いることによって変調空間の次元を高めるものであり、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの複数の振幅及び位相を多次元の変調空間として用いる。

10

【0012】

送信側においてモード間の変調を行う変調器や、受信側においてモード間の復調を行う復調器は、通常、モード合分波器で構成されており、モード間の位相については考慮されていない。また、複数の伝搬モードはモード間に群速度差があるため、各モードの信号伝搬時間に同時性がなく、偏光間の位相についても考慮されていない。従来は、モード間の位相、及び偏光間の位相を変調空間として用いられていない。

20

【0013】

本願発明は、モード間の位相、及び偏光間の位相を変調空間として用いて、多次元変調の変調の次元数を高め、1シンボル当たりの伝送情報量を高めることができる。

【0014】

本願発明の伝送装置及び伝送方法は、数モードファイバを伝送路とし、この数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送を行う。

【0015】

送信側ではモード変調を行い、伝送路ではモード伝搬を行い、受信側ではモード復調を行う。モード変調、モード伝搬、及びモード復調は、多次元多値モード変調による時間領域の変調を用いた伝送である。多次元多値モード変調では、多値の伝送情報を、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの複数の振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付ける。

30

【0016】

(多次元多値モード変調)

光ファイバを伝搬する導波モードにおいて、伝搬定数がほぼ等しく、重ね合わせによって直線偏波を構成できるモード群はLPモードと呼ばれる。LPモードは基本モード(LP_{0,1}モード)及び高次モードを備える。単一モードファイバはLP_{0,1}モードのみが伝搬し、数モードファイバはLP_{0,1}モードに加えてLP_{1,1}モード等の高次モードが伝搬する。

【0017】

LP_{1,1}モードには、電磁界強度分布において、x方向にモード関数の節を持つLP_{1,1}^{even}モードと、y方向にモード関数の節を持つLP_{1,1}^{odd}モードがあり、LP_{1,1}^{even}モードとLP_{1,1}^{odd}モードは伝搬定数が等しく縮退している。LP_{1,1}^{even}モードとLP_{1,1}^{odd}モードは、それぞれ偏光方向を90度異にする2つの電磁界分布が存在するため、x偏光及びy偏光を合わせて同じ伝搬定数を持つ4つの異なる電磁界分布によって4重縮退の状態となっている。

40

【0018】

したがって、LP_{μ,m}(μ>0)モードのモード群は、モード関数において回転対称な2つのモード電磁界分布を有すると共に、偏光方向が直交する2つのモードの全4つの電磁界分布が4重縮退している。なお、LP_{0,m}モードは電磁界分布が中心軸対称なので、直交する偏光の2つのモードが縮退している。

50

【 0 0 1 9 】

LPモードの各電磁界分布は以下の式で表すことができる。

光角周波数を ω とし振幅を A_x とすると、LP_{0,1}モードのx偏光成分の電界分布（電界ベクトル）を $E_{0,1}^{(x)}(x,y,z;t)$ は、

【数1】

$$E_{01}^{(x)}(x,y,z;t) = A_x f_{01}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_0 z)] \quad \dots (1)$$

で表され、LP_{0,1}モードのy偏光成分 $E_{0,1}^{(y)}(x,y,z;t)$ は、

【数2】

$$E_{01}^{(y)}(x,y,z;t) = A_y f_{01}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_0 z + \theta_0)] \quad \dots (2)$$

で表される。ここで $f_{0,1}(x,y)$ は電界振幅関数であり、この関数はx偏光でもy偏光でも同じである。

【 0 0 2 0 】

LP_{1,1}モードの場合も同様であり、LP_{1,1}モードは偏光方向がx偏光とy偏光の2種類に加えて、さらにモード関数がx方向に節をもつか（evenモード（偶モード））、y方向に節をもつか（oddモード（奇モード））の区別があるため、全部で4通りの縮退したモードが存在する。縮退モードでは、伝搬定数は同じで電界分布が異なる。これら4通りの縮退したモードは以下の式で表される。

【数3】

$$E_{11}^{(even,x)}(x,y,z;t) = B_x^{even} f_{11}^{(even)}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \theta_1)] \quad \dots (3)$$

$$E_{11}^{(even,y)}(x,y,z;t) = B_y^{even} f_{11}^{(even)}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \theta_2)] \quad \dots (4)$$

$$E_{11}^{(odd,x)}(x,y,z;t) = B_x^{odd} f_{11}^{(odd)}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \theta_3)] \quad \dots (5)$$

$$E_{11}^{(odd,y)}(x,y,z;t) = B_y^{odd} f_{11}^{(odd)}(x,y) \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \theta_4)] \quad \dots (6)$$

【 0 0 2 1 】

なお、ここでは、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ を全てLP_{0,1}モードのx偏光成分を基準とした相対位相で表している。

【 0 0 2 2 】

図1は、LP_{0,1}モード、LP_{1,1} evenモード、及びLP_{1,1} oddモードの電磁界分布と振幅及び位相を表している。図1において、モード電磁界分布は、強度分布と電界の向きを同時に表現している。また、LP_{1,1}モードにおいて、節の上下（あるいは左右）で電界振幅の符号が逆であり、図では逆方向の電界ベクトルで表している。

【 0 0 2 3 】

LP_{0,1}モードとLP_{1,1}モードの伝搬定数が異なっているため、入射端においてこれらのLPモードを全て含めた変調空間（モード空間）で多次元変調を行うと、信号が到達する時間がモードごとに大幅に異なるため、受信端でのデジタル信号処理に多大な負荷がかかるという問題が発生する。

【 0 0 2 4 】

これに対して、本願発明の多次元多値モード変調では、LP_{1,1} evenモードとLP_{1,1} oddモードのx偏光およびy偏光の各成分 $B_x^e, B_y^e, B_x^o, B_y^o$ と、これらの間の位相差 $\theta_1 - \theta_2, \theta_1 - \theta_3, \theta_1 - \theta_4$ のみを多次元変調のパラメータ（変数）として用い、これによって信号伝搬速度の相違による問題を解消する。なお、各位相 $\theta_1 \sim \theta_4$ は伝搬に伴って変化するが、位相差は一定であるため、位相差を用いることで伝搬に伴う変調符号の変化を防いでいる。

【 0 0 2 5 】

振幅 $B_x^e, B_y^e, B_x^o, B_y^o$ と、位相差 $\theta_1 - \theta_2, \theta_1 - \theta_3, \theta_1 - \theta_4$

10

20

30

40

50

の7つのパラメータ(変数)を用いることによって、7次元の多次元モード変調が可能となり、1シンボルで7ビットの伝送が可能となる。さらに、信号振幅および位相差に対する変調で多値化を行うことで1シンボル当たりのビット数を増加させることができる。

【0026】

伝搬に伴って座標軸そのものが回転座標変換を受け、また、偏光の基準となる座標軸の回転や偏光間位相差の変化も発生するが、これらは座標変換であるため、逆変換して戻すことが可能である。

【0027】

多値変調における送信側での振幅と位相は多次元の変調空間で1つの点に対応するが、伝搬中に座標軸の方向などが変化するため、受信側では同じ変調空間の点とならない。しかしながら、変調空間における送信側の点(座標)と受信側の点(座標)は1対1に対応するため、その対応関係をあらかじめパイロット信号によって把握することによって、座標変換を逆変換することで信号を複号することができる。

10

【0028】

本願発明による多次元多値モード変調による伝送は、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードが備える複数の振幅及び位相を多次元の変調空間におけるパラメータとし、このパラメータで定まる各座標に対して伝送情報を対応付ける。

【0029】

図2は本願発明による多次元多値モード変調を説明するための図である。

本願発明の伝送装置は、モード変調を行う送信部A、モード搬送を行う伝送部B、及びモード復調を行う受信部Cを備える。送信部Aは、数モードファイバの高次モードにおいて縮退モードのLPモードと直交偏光成分とを用い、各縮退モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間A1に対して、多値の伝送情報を多次元の変調空間の各座標に対応付ける多次元多値モード変調を行い、得られた信号光を送信する。

20

【0030】

受信部Cは、信号光を受信し、多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光をコヒーレント検出光学系C1によって局部発振光と合波させ、合波された干渉光から偏波分離C2によって直交偏光成分を分離し、直交偏光成分から縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調する多次元多値モード復調を行って伝送情報を出力する。

30

【0031】

伝送部Bの入射端で多次元多値モード変調を加えた信号を入射したとき、 $LP_{1,1}^{e,v}$ モードや $LP_{1,1}^{o,d}$ モードの電磁界分布の基準になる座標軸(x軸、y軸)が伝搬に伴って回転するため、出射端ではその基準になる座標軸が回転する。

【0032】

また、x軸方向の偏光やy軸方向の偏光に合わせて入射させた場合であっても、出射端ではその偏光の座標軸も回転する。したがって、入射端で多次元多値モード変調を加えたときの符号は出射端では座標変換を受けているため、座標逆変換を加える必要がある。

【0033】

受信部Cでは、X側偏光成分差分演算器からのx偏光成分とY側偏光成分差分演算器からのy偏光成分を後段の復号器で座標逆変換を行い、座標変換された符号を戻す。

40

【0034】

また、本願発明の伝送方法は、送信部A側において、数モードファイバの高次モードにおいて縮退モードのLPモードと直交偏光成分とを用い、各縮退モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間A1に対して、多値の伝送情報を多次元の変調空間の各座標に対応付ける多次元多値モード変調を行い、多次元多値モード変調で得られた信号光を送信し、受信部C側において信号光を受信し、多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光をコヒーレント検出光学系C1によって局部発振光と合波させ、合波された干渉光から偏波分離器C2によって直交偏光成分を分離し、直交偏光成分から縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調する多次元多値モード復調を行っ

50

て伝送情報を出力する。

【0035】

(送信機)

本願発明の送信部を構成する送信機は、伝送路の数モードファイバの高次モードの振幅と位相差を変調空間の変数に用いて伝送情報を送信する送信機であり、図4に示すように、搬送光の光源、搬送光を複数の分岐光に分岐する光分岐器、及び、複数の分岐光に多次元多値モード変調を施す多次元多値モード変調器を備える。

【0036】

多次元多値モード変調器は、複数の多値変調器及びモード合波器を備える。多値変調器は、伝送情報に基づいて、搬送光について数モードファイバの高次モードの各縮退直交偏光モードの振幅及び位相を変調する。

10

【0037】

多値変調器は、図5に示すように、縮退直交偏光モードのx偏光成分及びy偏光成分について、x偏光成分の振幅を変調するX側振幅変調器、及びx偏光成分の位相を変調するX側位相変調器と、y偏光成分の振幅を変調するY側振幅変調器、及びy偏光成分の位相を変調するY側位相変調器と、x偏光成分を変調したx偏波とy偏光成分を変調したy偏波とを偏波合波する偏光ビームスプリッタとを備える。

【0038】

モード合波器は、各多値変調器で変調した複数の縮退直交偏光モードを合波し、送信機のモード変調において、多値の伝送情報を、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行う。

20

【0039】

(受信機)

本願発明の受信部を構成する受信機は、数モードファイバを伝送路とし、前記数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送情報を受信する受信機であり、多次元多値モード復調によって、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復調し伝送情報を出力する多次元多値モード復調器を備える。

【0040】

受信機の多次元多値モード復調器は2つの形態とすることができる。第1の形態は、偏波分離器と領域分割光検出器でコヒーレント検出して得た偏光成分を差分演算することによって位相及び振幅を求め、第2の形態は、モード分波器を用いることによって位相及び振幅を求める。

30

【0041】

(第1の形態)

第1の形態の多次元多値モード復調器は、混合器と偏波分離器と光検出器と演算器を備える。混合器は、伝送路の出射端の信号光と局部発振光とを混合して干渉光を生成して、多次元多値モード変調された多次元の変調空間の各座標に対応する干渉光を出射する。

【0042】

混合器は、図6に示す様に、局部発振光を発する局部発振器と半透明鏡とを備える構成とすることができる。

40

【0043】

半透明鏡の一方の入射端に伝送路の出射端の信号光を入射させ、半透明鏡の他方の入射端に局部発振器が発する局部発振光を入射させ、出射端から信号光と局部発振光とを混合して得られる干渉光を出射する。

【0044】

偏波分離器は、干渉光を偏波分離して、縮退直交偏光モードのx偏光成分及びy偏光成分を分離する。

【0045】

光検出器は、各偏光成分に分離した干渉光を検出する。光検出器は、偏波分離器が分離

50

した x 偏光成分の出射光を入射させる X 側 4 象限分割光検出器と、偏波分離器が分離した y 偏光成分の出射光を入射させる Y 側 4 象限分割光検出器とを備え、X 側 4 象限分割光検出器及び Y 側 4 象限分割光検出器はそれぞれ 4 つの各象限から位相を異にする交流出力信号を出力する。

【0046】

演算器は、光検出器で検出した交流成分の加減算によって、縮退直交偏光成分から各縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を得る。演算器は、X 側 4 象限分割光検出器の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して x 偏光成分の振幅及び位相を演算する X 偏光成分演算器と、Y 側 4 象限分割光検出器の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して y 偏光成分の振幅及び位相を演算する Y 偏光成分演算器とを備える。

10

【0047】

受信機のモード復調において、多値の伝送情報は、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行う。

【0048】

コヒーレント検出はヘテロダイン検出回路で構成することができる。コヒーレント検出では、信号光の光角周波数 ω_0 と局部発振器が発する局部発振光の角周波数 ω_1 との差の角周波数 $\omega_0 - \omega_1$ が電気信号の角周波数として検出される。なお、位相は周期 $2\pi / (\omega_0 - \omega_1)$ の数サイクル分の検出時間内の交流信号に基づいて検出される。

20

【0049】

(第2の形態)

第2の形態の多次元多値モード復調器はモード分波器を用いる形態であり、モード分波器で分波したモード成分を偏波分離器で分離した後、光検出器でコヒーレント検出を行う形態である。

【0050】

第2の形態では、モード分波器で分波したモード成分を混合器で局部発振光と混合した後、偏波分離器で x 偏光と y 偏光に分離する第1の構成と、混合器で局部発振光と混合した後にモード分波器でモード成分に分波する第2の構成とすることができる。

【0051】

(多次元変調による効果)

本願発明の多次元多値モード変調は、変調空間を多次元とすることによって、シンボル間の距離(符号間距離)を大きくすることができるため、S/N比を大きくすることができる。したがって、多値度を上げて1シンボルで多くのビット数を送ることができる。

30

【0052】

例えば、従来の2次元変調空間で3ビット(8値QAM)変調をする場合において、電力一定($P = |E|^2$)の条件では、符号間距離は約 $0.765E (= (2 - \sqrt{2}) \cdot E)$ となる。一方、図3に示すように3次元変調空間での3ビット変調(8値の偏波変調)では符号間距離は $1.1547E (= (2 \cdot E) / \sqrt{3})$ となり、2次元変調に比べて符号間距離を約1.5倍大きくすることができる。

40

【0053】

なお、図3は3次元変調空間による多値偏波変調の例を示し、図3(a)はQPSK変調を、図3(b)は4値偏波変調を示している。図3(b)の4値偏波変調の信号点間距離は、図3(a)のQPSK変調の信号点間距離よりも大きい。図3(c)は8値偏波変調を示している。

【発明の効果】

【0054】

以上説明したように、本願発明によれば、モード空間多次元変調において、受信信号の同時性を確保し、モード間の群速度差による受信信号の遅延差を処理するデジタル信号処理の負荷を大幅に低減することができる。

50

【 0 0 5 5 】

本願発明によれば、多次元変調において、変調空間内でシンボル間の間隔を大幅に狭めることなく1シンボル当たりのビット数を増加させ、信号強度に対する雑音の比率（S/N比）を向上させる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 6 】

【 図 1 】 $LP_{0,1}$ モード、 $LP_{1,1}^{evn}$ モード、及び $LP_{1,1}^{odd}$ モードの電磁界分布と振幅及び位相を表す図である。

【 図 2 】 本願発明による多次元多値モード変調を説明するための図である。

【 図 3 】 3次元変調空間による多値偏波変調の例を示す図である。

10

【 図 4 】 本願発明の伝送装置を説明するための図である。

【 図 5 】 本願発明の送信器を説明するための図である。

【 図 6 】 本願発明の受信器を説明するための図である。

【 図 7 】 X偏光成分演算器とY偏光成分演算器の構成例を説明するための図である。

【 図 8 】 本願発明の受信機が備える多次元多値モード復調器の他の構成例を説明するための図である。

【 図 9 】 本願発明の受信機の第1の構成において、 $LP_{0,1}$ モード、 $LP_{1,1}^{evn}$ モード、及び $LP_{1,1}^{odd}$ モードの各モードの構成例を説明するための図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 5 7 】

20

以下、本願発明の実施の形態について、図を参照しながら詳細に説明する。以下、図4を用いて本願発明の伝送装置を説明し、図5を用いて本願発明の送信器を説明し、図6～9を用いて本願発明の受信器を説明する。

【 0 0 5 8 】

（伝送装置）

図4において、本願発明の伝送装置10は、送信部として送信機20、伝送路として数モードファイバ30、及び受信部として受信機40を備える。

【 0 0 5 9 】

送信部を構成する送信機20は、数モードファイバの高次モードを変調空間に用いて伝送情報を送信する送信機であり、搬送光の光源21、搬送光を複数の分岐光に分岐する光分岐器22、複数の分岐光に対して多次元多値モード変調を施す多次元多値モード変調器23を備える。

30

【 0 0 6 0 】

多次元多値モード変調器23は、複数の多値変調器23A～23Dと、多値変調器23A～23Dで多値変調された複数のモード信号を合波するモード合波器23Iを備える。なお、多値変調器23B、23C、23Dは図5に示されている。多値変調器23Aは、伝送情報に基づいて、搬送光を分岐した分岐光について数モードファイバの高次モードの各縮退直交偏光モードの振幅及び位相を変調する。多値変調器23Aにおいて、縮退直交偏光モードの振幅及び位相を変調する変調信号は伝送情報に基づいて符号器24で得ることができる。符号器24における伝送情報と変調信号との関係は、変調によって得られる振幅及び位相との対応関係を予め求めておくことで取得することができる。

40

【 0 0 6 1 】

モード合波器23Iは、各多値変調器23A～23Dで変調した複数の縮退直交偏光モードを合波する。これによって、送信機20のモード変調において、多値の伝送情報を、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けする。

【 0 0 6 2 】

数モードファイバ30は、多次元多値モード変調された光信号を伝送する。受信部を構成する受信機40は、数モードファイバ30で伝送された光信号を受信し、数モードファ

50

イバの高次モードを変調空間に用いて伝送情報を取得する受信機であり、多次元多値モード復調器 4 1 と、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復号して伝送情報を求める復号器 4 2 を備える。

【 0 0 6 3 】

多次元多値モード復調器 4 1 は、混合器 4 1 A と偏波分離器 4 1 B と光検出器 4 1 C と演算器 4 1 D を備え、多次元多値モード変調された光信号を多次元多値モード復調し、復調した縮退直交偏光モードの振幅及び位相差の電気信号を出力する。

【 0 0 6 4 】

混合器 4 1 A は、伝送路の出射端の信号光と局部発振光とを混合して干渉光を出力する。偏波分離器 4 1 B は、混合器 4 1 A から出力された干渉光を偏波分離して、x 偏光成分及び y 偏光成分を分離する。光検出器 4 1 C は、各偏光成分に分離した干渉光を検出して電気信号を出力する。演算器 4 1 D は、光検出器 4 1 C で検出した交流成分を加減算することによって、各縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を演算によって取得する。

10

【 0 0 6 5 】

復号器 4 2 は、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復号して伝送情報を求める。振幅及び位相差と伝送情報との対応関係は、符号器 2 4 において求めておいた伝送情報と変調信号との対応関係から得ることができる。

【 0 0 6 6 】

(送信機の多次元多値モード変調器)

図 5 は本願発明の送信機が備える多次元多値モード変調器の一構成例を説明するための図である。

20

【 0 0 6 7 】

多次元多値モード変調器 2 3 は、縮退直交偏光モードに応じて複数の多値変調器 2 3 A ~ 2 3 D、及びモード合波器 2 3 I を備える。図 5 では、 LP_{11}^{ev} モード、 LP_{11}^{od} モード、 LP_{01} モードの各変調モードを多値変調する多値変調器 2 3 A、2 3 B、及び 2 3 C を示している。多値変調器 2 3 D は他の $LP_{\mu m}$ モードを多値変調する多値変調器を表している。

【 0 0 6 8 】

以下では、 LP_{11} モードの内の LP_{11}^{ev} モードにおいて多値変調を行う多値変調器 2 3 A について説明するが、 LP_{01} モード、 LP_{11}^{od} モード、 $LP_{\mu m}$ モードにおいて多値変調を行う多値変調器についても同様の構成とすることができる。

30

【 0 0 6 9 】

符号器 2 4 は伝送情報を変換して制御器 2 5 を駆動する制御信号を生成する。制御器 2 5 は多値変調器 2 3 A が備える X 側駆動回路 2 3 A a 及び Y 側駆動回路 2 3 A b を駆動する。

【 0 0 7 0 】

X 側駆動回路 2 3 A a は、分岐光の縮退直交偏光モードの x 偏光成分について、X 側振幅変調器 2 3 A c を駆動して x 偏光成分の振幅を振幅 B_x^e に変調し、X 側位相変調器 2 3 A e を駆動して x 偏光成分の位相を位相 ϕ_1 に変調する。

【 0 0 7 1 】

40

一方、Y 側駆動回路 2 3 A b は、分岐光の縮退直交偏光モードの y 偏光成分について、Y 側振幅変調器 2 3 A d を駆動して y 偏光成分の振幅を振幅 B_y^e に変調し、Y 側位相変調器 2 3 A f を駆動して y 偏光成分の位相を位相 ϕ_2 に変調する。

【 0 0 7 2 】

多値変調器 2 3 A は、x 偏光成分の振幅と位相を多値変調した X 偏波と、y 偏光成分の振幅と位相を多値変調した Y 偏波とを偏波合成する偏波合成器を備える。偏波合成器は偏光ビームスプリッタ 2 3 A g で構成することができる。

【 0 0 7 3 】

制御器 2 5 は、複数の多値変調器 2 3 A ~ 2 3 D の中から多値変調を行う多値変調器を選択する。

50

【 0 0 7 4 】

数モードファイバの伝搬光の群速度は異なるモード間で差異があるため、群速度差によって受信側に到達する時間差を避けるには、群速度差を有するモードを多次元多値モード変調の変数（変調空間）に使用しないことが必要である。このことから、制御器 25 は、複数のモードの内、伝搬定数がほぼ等しい縮退している高次モードを選択し、選択した高次モードで多値変調を行う。例えば、 LP_{11}^{ev} モードのみを多値変調する。ここで、 LP_{11}^{ev} モードと LP_{11}^{od} モードとはモード電磁界分布が相互に90度回転対称であって伝搬定数が等しく群速度が同じであるため、x偏波及びy偏波について多値変調した後、偏波合成する。

【 0 0 7 5 】

上記構成によって、多値変調器 23A からは、振幅及び位相を変調したx偏波及びy偏波が偏波合成された光信号が出力される。

【 0 0 7 6 】

各多値変調器 23A ~ 23D の光信号は数モードファイバ 23E ~ 23H を介してモード合成器 23I に送られる。単一モードファイバ 23E ~ 23H は、各多値変調器 23A ~ 23D で変調した信号光を伝送する。

【 0 0 7 7 】

モード合波器 23I は、各多値変調器 23A ~ 23D で変調した複数の縮退直交偏光モード成分の内、制御器 25 で選択され多値変調された、伝搬定数がほぼ等しい高次モードをモード合波する。

【 0 0 7 8 】

上記した送信機の構成によって、送信機のモード変調において、多値の伝送情報を、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けし、多次元多値モード変調による伝送を行う。

【 0 0 7 9 】

（受信機の多次元多値モード復調器）

受信機の多次元多値モード復調器は2つの形態とすることができる。第1の形態は、偏波分離器と領域分割光検出器でコヒーレント検出して得た偏光成分を差分演算することによって位相及び振幅を求める。また、第2の形態は、モード分波器を用いることによって差分演算を行うこと無く位相及び振幅を求める。

【 0 0 8 0 】

（多次元多値モード復調器の第1の形態）

図6は本願発明の受信機が備える多次元多値モード復調器の一構成例を説明するための図であり、光検出器で検出して得た偏光成分を差分演算することによって位相及び振幅を求める第1の形態の構成例である。

【 0 0 8 1 】

多次元多値モード復調器 41 は、混合器 41A と偏波分離器 41B と光検出器 41C と演算器 41D を備える。

【 0 0 8 2 】

混合器 41A は、信号光の光角周波数 ω_0 と局部発振器が発する局部発振光の角周波数 ω_1 との差の角周波数 $\omega_0 - \omega_1$ の成分を含む干渉光を生成する機構であり、局部発振光を発する局部発振器 41Aa と、 $\lambda/4$ 波長板 41Ab と、半透明鏡 41Ac とを備える。

【 0 0 8 3 】

局部発振器 41Aa から発せられた局部発振光は、偏波面保持ファイバ 45 を介してレンズ 46 及び $\lambda/4$ 波長板 41Ab に導かれる。なお、通常の単一モードファイバでは射出端での偏光状態が楕円偏光でありその偏光状態は不安定であるため、ここでは、局部発振光の偏光状態を保持したまま $\lambda/4$ 波長板 41Ab に導くために偏波面保持ファイバ 45 を用いている。また、レンズ 46 は、局部発振光を平行光にして $\lambda/4$ 波長板 41Ab に入射させるレンズである。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 4 】

/ 4 波長板 4 1 A b の主軸を局部発振光の直線偏光の偏光方向に対して 4 5 ° 回転させた状態で設置して、局部発振光を円偏光として混合器 4 1 A に入射させて、信号光の如何なる偏光成分にも干渉させる。なお、 / 4 波長板に代えて、 / 2 波長板を、その主軸が局部発振光の直線偏光の偏光方向とモード分析装置の座標系における x 軸との中間の角度をなすように回転させた状態で設置して、局部発振光の偏光方向がモード分析装置の座標系の x 軸に対して 4 5 ° 傾いた角度で混合器 4 1 A に入射させても良い。さらには、局部発振光からの光をレンズに導く偏波面保持ファイバ 4 5 の偏光主軸をモード分析装置の座標系の x 軸に対して 4 5 ° 傾けて配置して、局部発振光の偏光方向がモード分析装置の座標系の x 軸に対して 4 5 ° 傾いた角度で混合器 4 1 A に入射させても良い。

10

【 0 0 8 5 】

半透明鏡 4 1 A c の一方の入射端に伝送路（数モードファイバ 3 0）の出射端の信号光をレンズ 4 4 を介して入射させ、半透明鏡 4 1 A c の他方の入射端に局部発振器 4 1 A a が発する局部発振光を入射させ、出射端から信号光と局部発振光とを混合して得られる干渉光を出射する。

【 0 0 8 6 】

なお、数モードファイバ 3 0 と半透明鏡 4 1 A c の一方の入射端との間に設けるレンズ 4 4 は平行光を生成するためである。

【 0 0 8 7 】

偏波分離器 4 1 B は偏光ビームスプリッタで構成することができ、混合器 4 1 A で生成した干渉光を偏波分離して、縮退直交偏光モードの x 偏光成分及び y 偏光成分を分離する。

20

【 0 0 8 8 】

光検出器 4 1 C は、偏波分離器 4 1 B で各偏光成分に分離した干渉光を検出する。光検出器 4 1 C は、偏波分離器 4 1 B が分離した x 偏光成分の干渉光を入射させる X 側 4 象限分割光検出器 4 1 C x と、偏波分離器 4 1 B が分離した y 偏光成分の干渉光を入射させる Y 側 4 象限分割光検出器 4 1 C y とを備え、X 側 4 象限分割光検出器 4 1 C x 及び Y 側 4 象限分割光検出器 4 1 C y はそれぞれ 4 つの各象限から位相を異にする出力信号 I_{x1} , I_{x2} , I_{x3} , I_{x4} 、出力信号 I_{y1} , I_{y2} , I_{y3} , I_{y4} を出力する。

【 0 0 8 9 】

演算器 4 1 D は、光検出器 4 1 C で検出した交流成分の電気信号の加減算によって、縮退直交偏光成分から各縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を得る。演算器 4 1 D は、X 側 4 象限分割光検出器 4 1 C x の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して x 偏光成分の振幅及び位相を演算する X 偏光成分演算器 4 1 D x と、Y 側 4 象限分割光検出器 4 1 C y の 4 つの出力信号を入力し、各出力信号を加減算して y 偏光成分の振幅及び位相を演算する Y 偏光成分演算器 4 1 D y とを備える。

30

【 0 0 9 0 】

モード分離について、 LP_{01} 、 LP_{11}^{ev} 、 LP_{11}^{od} の 3 つのモードを例にして説明する。

【 0 0 9 1 】

数モードファイバの出射端での信号光の LP_{01} 、 LP_{11}^{ev} 、 LP_{11}^{od} の 3 つのモードの x 偏光と y 偏光成分をすべて含む混合状態の電界振幅 (A_x , A_y , B_x^e , B_y^e , B_x^o , B_y^o) と、 LP_{01} モードの x 偏光を基準とする各モードの位相差 (θ_0 - θ_4) を以下の式 (7) で定義する。

40

【 数 4 】

$$E_{total} = \{A_x e_x + A_y e_y e^{j\theta_0}\} E_{LP_{01}}(x, y) \\ + \{B_x^e e^{j\theta_1} e_x + B_y^e e^{j\theta_2} e_y\} E_{LP_{11}^e}(x, y) \\ + \{B_x^o e^{j\theta_3} e_x + B_y^o e^{j\theta_4} e_y\} E_{LP_{11}^o}(x, y) \quad \dots (7)$$

50

【 0 0 9 2 】

局部発振光（電界を E_{LO} とする）と干渉し、偏光ビームスプリッタ（通過する偏光方向の単位ベクトルを e_{pol} とする）を通過した後の信号光の光電力は式（8）で表される。

【 数 5 】

$$P = |(\mathbf{E}_{total} + \mathbf{E}_{LO}) \cdot \mathbf{e}_{pol}|^2 \quad \dots (8)$$

【 0 0 9 3 】

ここで、干渉光の交流成分について、4象限分割光検出器の第 象限で生じる電流 I_{AC} は以下の式（9）で表される。

【 数 6 】

$$I_{\nu AC} = \int_Q P_{AC} da = \xi A_x \cos(\Delta\omega t) + e^{j[\frac{\nu}{2}]_{int} \cdot \pi} \cdot \eta B_x^e \cos(\Delta\omega t - \theta_1) + e^{j[\frac{\nu-1}{2}]_{int} \cdot \pi} \cdot \eta B_x^o \cos(\Delta\omega t - \theta_3) \quad \dots (9)$$

ただし、係数 と は

【 数 7 】

$$\xi = \frac{DN_0^2 w_0^2 \pi}{2}, \quad \eta = D\sqrt{2\pi} N_0 N_1 w_0^2 \quad \dots (10)$$

で表され、 w_0 は基本モードの $LP_{0,1}$ モード電磁界分布をガウス関数で近似した場合のスポットサイズであり、 D は局部発振光を平面波近似した場合の電界振幅、 N_0 と N_1 はそれぞれ $LP_{0,1}$ モードと $LP_{1,1}$ モードの電磁界分布関数の規格化定数である。

【 0 0 9 4 】

また、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差は、以下の表 1 で表されるように各象限の交流電流の加減算で求めることができる。

【 表 1 】

	LP_{01}	LP_{11}^e	LP_{11}^o
x_{pol}	$A_x \leftarrow \sum_{\nu=1}^4 I_{\nu AC}^x$	$B_x^e \leftarrow I_1^x - I_2^x$ $\theta_1 \leftarrow \arg[I_1^x - I_2^x]$	$B_x^o \leftarrow I_1^x - I_4^x$ $\theta_3 \leftarrow \arg[I_1^x - I_4^x]$
y_{pol}	$A_y \leftarrow \sum_{\nu=1}^4 I_{\nu AC}^y$ $\theta_0 = \arg \left[\sum_{\nu=1}^4 I_{\nu AC}^y \right]$	$B_y^e \leftarrow I_1^y - I_2^y$ $\theta_2 \leftarrow \arg[I_1^y - I_2^y]$	$B_y^o \leftarrow I_1^y - I_4^y$ $\theta_4 \leftarrow \arg[I_1^y - I_4^y]$

【 0 0 9 5 】

図 7 は X 偏光成分演算器と Y 偏光成分演算器の構成例を説明するための図である。

表 1 で示したように、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差は、各象限の交流電流 I_{AC} の加減算で求めることができる。ここで、 は象限 1 ~ 4 に対応している。

【 0 0 9 6 】

図 7 (a) は、縮退直交偏光モードの x 偏光成分の振幅 A_x , B_x^e , B_x^o 、及び x 偏光成分の位相 θ_1 , θ_3 を演算する構成例を示している。

10

20

30

40

50

【0097】

LP₀₁モードのx偏光成分の振幅 A_x 及びx偏光成分の位相は、X側4象限分割光検出器41Cxの出力信号 I_{x1} 、 I_{x2} 、 I_{x3} 、 I_{x4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後に加算器で加算し、振幅及び位相検波器を通すことで得ることができる。なお、ここでは、LP₀₁モードのx偏光成分の位相を位相基準とするために“0”としている。

【0098】

LP₁₁^{even}モードのx偏光成分の振幅 B_x^e 及びx偏光成分の位相 θ_1 は、X側4象限分割光検出器41Cxの出力信号 I_{x1} 、 I_{x2} 、 I_{x3} 、 I_{x4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後、減算器で求めた出力信号 I_{x1} と I_{x2} との差分($I_{x1} - I_{x2}$)と、減算器で求めた出力信号 I_{x4} と I_{x3} との差分($I_{x4} - I_{x3}$)とを加算器で加算し、振幅及び位相検波器を通すことで得ることができる。

10

【0099】

LP₁₁^{odd}モードのx偏光成分の振幅 B_x^o 及びx偏光成分の位相 θ_3 は、X側4象限分割光検出器41Cxの出力信号 I_{x1} 、 I_{x2} 、 I_{x3} 、 I_{x4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後、減算器で求めた出力信号 I_{x1} と I_{x4} の差分($I_{x1} - I_{x4}$)と、減算器で求めた出力信号 I_{x2} と I_{x3} との差分($I_{x2} - I_{x3}$)とを加算器で加算し、振幅及び位相検波器を通すことで得ることができる。

【0100】

図7(b)は、縮退直交偏光モードのy偏光成分の振幅 A_y 、 B_y^e 、 B_y^o 、及びy偏光成分の位相 θ_0 、 θ_2 、 θ_4 を演算する構成例を示している。

20

【0101】

LP₀₁モードのy偏光成分の振幅 A_y 及びy偏光成分の位相 θ_0 は、X側4象限分割光検出器41Cyの出力信号 I_{y1} 、 I_{y2} 、 I_{y3} 、 I_{y4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後に加算器で加算し、振幅及び位相検波器を通すことで得ることができる。なお、ここでは、LP₀₁モードのy偏光成分の位相をx偏光成分の位相基準に対して θ_0 としている。

【0102】

LP₁₁^{even}モードのy偏光成分の振幅 B_y^e 及びy偏光成分の位相 θ_2 は、X側4象限分割光検出器41Cyの出力信号 I_{y1} 、 I_{y2} 、 I_{y3} 、 I_{y4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後、減算器で求めた出力信号 I_{y1} と I_{y2} との差分($I_{y1} - I_{y2}$)と、減算器で求めた出力信号 I_{y4} と I_{y3} との差分($I_{y4} - I_{y3}$)とを加算器で加算し、位相検波器を通すことで得ることができる。

30

【0103】

LP₁₁^{odd}モードのy偏光成分の振幅 B_y^o 及びy偏光成分の位相 θ_4 は、X側4象限分割光検出器41Cyの出力信号 I_{y1} 、 I_{y2} 、 I_{y3} 、 I_{y4} を帯域透過フィルタで各周波数の交流成分のみを取り出した後、減算器で求めた出力信号 I_{y1} と I_{y4} の差分($I_{y1} - I_{y4}$)と、減算器で求めた出力信号 I_{y2} と I_{y3} との差分($I_{y2} - I_{y3}$)とを加算器で加算し、位相検波器を通すことで得ることができる。

【0104】

受信機のモード復調において、多値の伝送情報は、数モードファイバの高次モードの縮退直交偏光モードの振幅及び位相をパラメータとする多次元の変調空間に対して、当該多次元の変調空間のパラメータで定まる各座標に対応付けしており、数モードファイバを伝送中に、座標軸が回転座標変換した場合であっても変調空間における送信側の点(座標)と受信側の点(座標)は1対1に対応するため、その対応関係をあらかじめパイロット信号によって把握することによって、座標変換を逆変換することで信号を復号することができる。復号器42は、縮退直交偏光モードの振幅及び位相差を復号して伝送情報を求める。振幅及び位相差と伝送情報との対応関係は、符号器24において求めておいた伝送情報と変調信号との対応関係から得ることができる。

40

【0105】

50

なお、送信機 20 側において、多値変調器 23 A ~ 23 D の出力端、あるいはモード合波器 23 I の出力端に、出力光の一部を分岐させた後に受信機 40 と同様の構成を設け、各出力光を検出するモニタ（図 5 には示していない）を設ける構成としてもよい。

【0106】

（多次元多値モード復調器の第 2 の形態）

図 8 は本願発明の受信機が備える多次元多値モード復調器の他の構成例を説明するための図であり、モード分波器を用いることによって位相及び振幅を求める第 2 の形態であり、モード分波器で分波したモード成分を偏波分離器で分離した後、光検出器でコヒーレント検出を行う。第 2 の形態は、コヒーレント受信する際に 2 つの構成で実現することができる。

10

【0107】

（第 1 の構成）

第 1 の構成は、モード分波器で分波したモード成分を混合器で局部発振光と混合した後、偏波分離器で x 偏光と y 偏光に分離する。図 8 (a) は第 1 の構成を説明するための図である。

【0108】

モード分波器を用いる第 1 の構成は、複数のモードをモード分波器 41 E で、一旦モード分波して単一モード導波路または単一モードファイバに入射させてから、混合器 41 A でそれぞれのモード成分に局部発振光を混合させ、さらに偏波分離器 41 B を通して x 偏光と y 偏光成分に分離した後、光検出器 41 C で検出する構成であり、光検出器 41 C でコヒーレント検出を行って振幅と位相を求める。

20

【0109】

偏光分離器 41 B は導波路型の方向性結合器を用いると 90 度ハイブリッドを構成でき、また入射ポートと出射ポートが 2 つあるため、混合器 41 A と偏光分離器 41 B を共用する構成とすることもできる。

【0110】

図 9 は、第 1 の構成において、 $LP_{0,1}$ モード、 $LP_{1,1}$ モードの各モードの直交偏光成分を受信して復号する構成例を示している。 $LP_{1,1}$ モードは $LP_{1,1}^{e\ v\ e\ n}$ モードと $LP_{1,1}^{o\ d\ d}$ モードとを含む。

【0111】

各モードの構成は、例えば $LP_{1,1}$ モードでは、モード分波器 41 E でモード分波したモード成分を混合器 41 A ($41A^e$, $41A^o$) で局部発振光と混合させ、偏波分離器 41 B ($41B^e$, $41B^o$) で x 偏光成分と y 偏光成分に分離し、x 偏光側光検出器 $41C_x$ ($41C_x^e$, $41C_x^o$) で x 偏光成分を検出し、y 偏光側光検出器 $41C_y$ ($41C_y^e$, $41C_y^o$) で y 偏光成分の振幅及び位相を検出する。復号器 42 (42^e , 42^o) は検出した x 偏光成分と y 偏光成分の振幅及び位相から復号した受信信号を出力する。(even と odd については光検出器 41 C ($41C_x^e$, $41C_y^e$, $41C_x^o$, $41C_y^o$) の出力で区別できる。) $LP_{0,1}$ モードについても同様とすることができるため、ここでの説明を省略する。

30

【0112】

（第 2 の構成）

第 2 の構成は、混合器で局部発振光と混合した後にモード分波器でモード成分に分波し、偏波分離器で x 偏光と y 偏光に分離する。図 8 (b) は第 2 の構成を説明するための図である。

40

【0113】

モード分波器を用いる第 2 の構成は、モード分波器 41 E に入射させる前に信号光と局部発振光を混合器 41 A で混合させ、その後、モード分波器 41 E でそれぞれのモードに分波した後に、偏光分離器 41 B で x 偏光成分と y 偏光成分に分離してから光検出器 41 C でコヒーレント検出する。

【0114】

50

第2の構成は、モード分波器の前に行う局部発振光との混合は空間光学系で行うことができる。空間光学系の一構成例は、レンズを用いた空間光学系であり、混合器41Aの後にレンズで集光して導波路型モード分波器に入射させる。また、空間光学系の他の構成例は、レンズを用いて導波路型モード分波器に入射させない空間光学系であり、混合器41Aの後、空間ビームのまま空間ビーム型モード分波器に入射させる。

【0115】

なお、本願発明は前記各実施の形態に限定されるものではない。本願発明の趣旨に基づいて種々変形することが可能であり、これらを本願発明の範囲から排除するものではない。

【産業上の利用可能性】

10

【0116】

本願発明の伝送装置及び伝送方法は、光ファイバ通信の高次モードを利用した多次元多値伝送に適用することができる。

【符号の説明】

【0117】

10	伝送装置	
20	送信機	
21	光源	
22	光分岐器	
23	多次元多値モード変調器	20
23A ~ 23D	多値変調器	
23Aa	X側駆動回路	
23Ab	Y側駆動回路	
23Ac	X側振幅変調器	
23Ad	Y側振幅変調器	
23Ae	X側位相変調器	
23Af	Y側位相変調器	
23Ag	偏波ビームスプリッタ	
23E - 23H	単一モードモードファイバ	
23I	モード合成器	30
24	符号器	
25	制御器	
30	数モードファイバ	
40	受信機	
41	多次元多値モード復調器	
41A	混合器	
41Aa	局部発振器	
41Ab	波長板	
41Ac	半透明鏡	
41B	偏波分離器	40
41C	光検出器	
41Cx	4象限分割光検出器	
41Cy	4象限分割光検出器	
41D	演算器	
41Dx	X偏光成分演算器	
41Dy	Y偏光成分演算器	
41E	モード分波器	
42	復号器	
44	レンズ	
45	偏波面保持ファイバ	50

- 4 6 レンズ
- A 1 変調空間
- B 数モードファイバ
- C 受信部
- C 1 コヒーレント検出光学系
- C 2 偏波分離

【 図 1 】

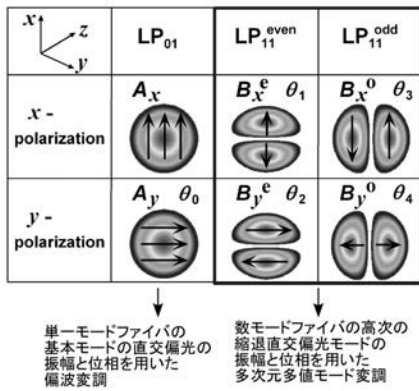


図 1

【 図 2 】

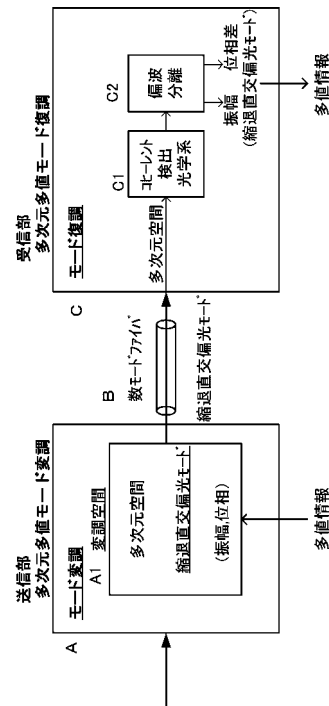
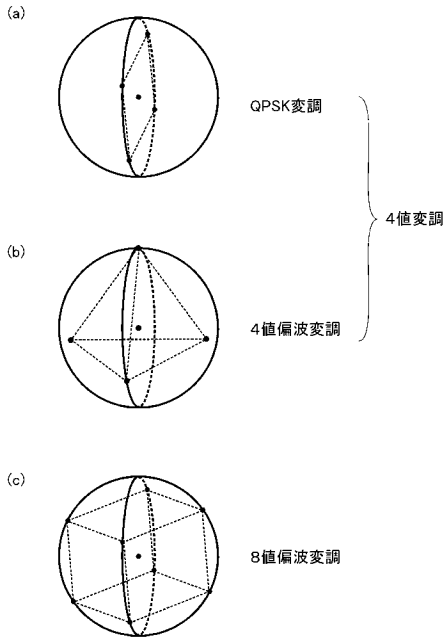


図 2

【 図 3 】

図3 多値偏波変調(3次元変調空間)



【 図 4 】

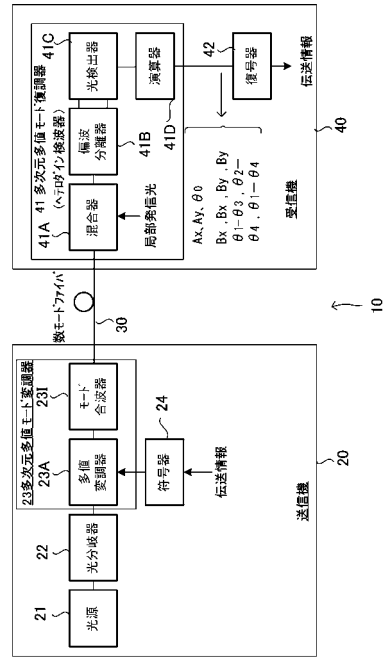
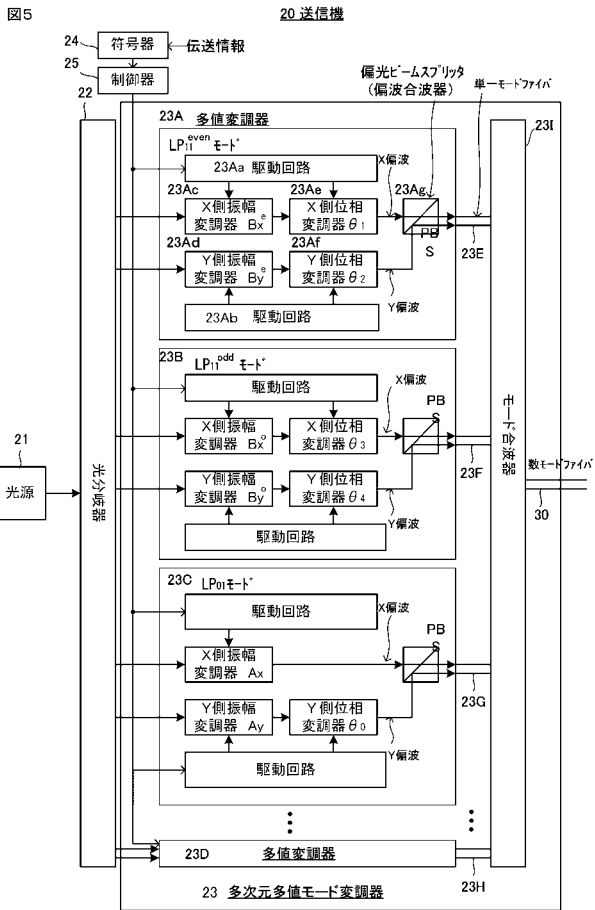


図4

【 図 5 】



【 図 6 】

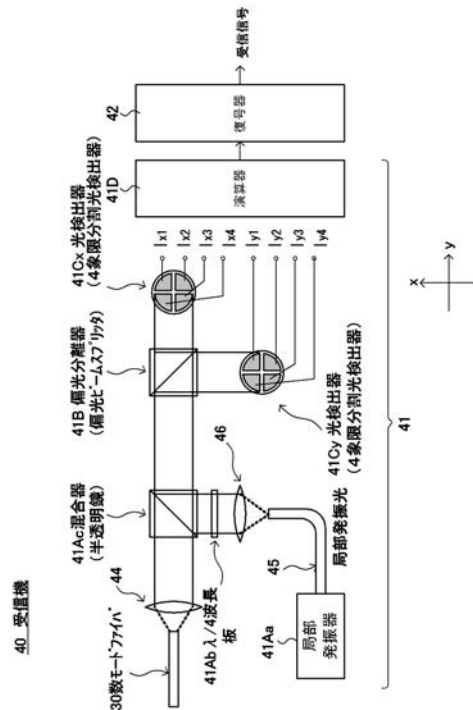
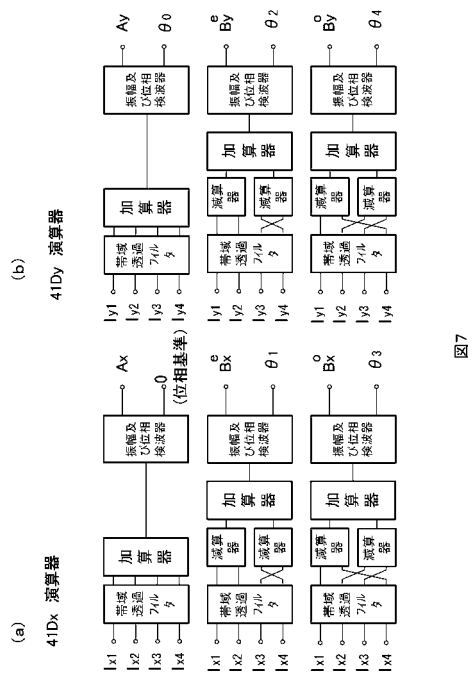
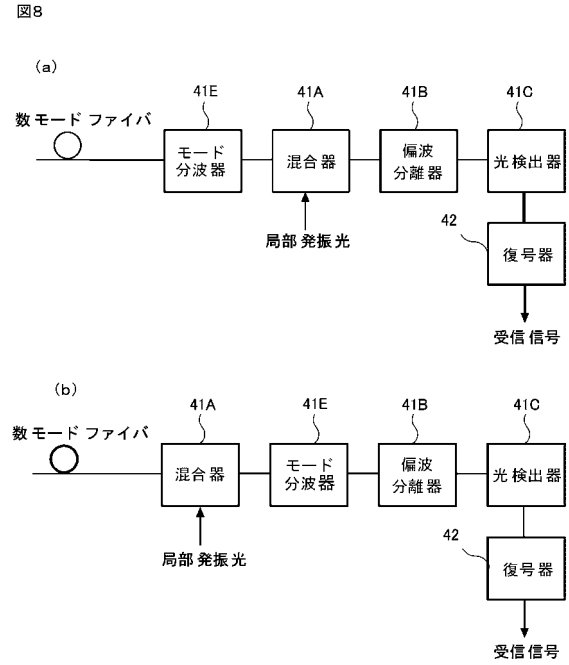


図6

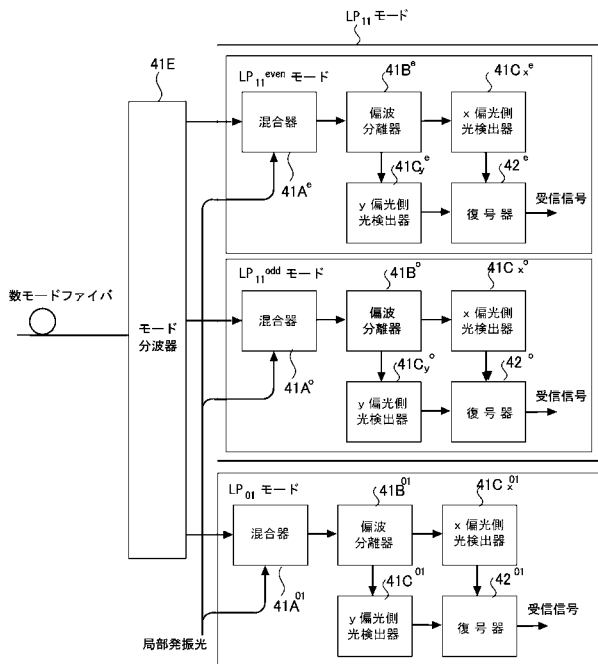
【 図 7 】



【 図 8 】



【 図 9 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2016/073965
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H04B10/2581(2013.01)i, G02F1/01(2006.01)i, G02F2/00(2006.01)i, H04B10/516(2013.01)i, H04B10/61(2013.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H04B10/2581, G02F1/01, G02F2/00, H04B10/516, H04B10/61 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2016 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2016 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2016 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) IEEE Xplore		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2014/0219653 A1 (NEC LABORATORIES AMERICA, INC.), 07 August 2014 (07.08.2014), paragraphs [0026] to [0042]; fig. 1 to 6 (Family: none)	1-8
A	DJORDJEVIC, Ivan B. et al., Spatial-domain-based multidimensional modulation for multi-Tb/s serial optical transmission, OPTICS EXPRESS, 2011.03.28, Vol. 19, No. 7, pp. 6845 - 6857	1-8
A	JP 2013-175831 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 05 September 2013 (05.09.2013), paragraphs [0009] to [0010] (Family: none)	1-8
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 05 October 2016 (05.10.16)		Date of mailing of the international search report 18 October 2016 (18.10.16)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 6 / 0 7 3 9 6 5	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H04B10/2581(2013.01)i, G02F1/01(2006.01)i, G02F2/00(2006.01)i, H04B10/516(2013.01)i, H04B10/61(2013.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H04B10/2581, G02F1/01, G02F2/00, H04B10/516, H04B10/61			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2016年 日本国実用新案登録公報 1996-2016年 日本国登録実用新案公報 1994-2016年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) IBEE Xplore			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	US 2014/0219653 A1 (NEC LABORATORIES AMERICA, INC.) 2014.08.07, 段落[0026]-[0042], 図 1-6 (ファミリーなし)	1-8	
A	DJORDJEVIC, Ivan B. et al., Spatial-domain-based multidimensional modulation for multi-Tb/s serial optical transmission, OPTICS EXPRESS, 2011.03.28, Vol. 19, No. 7, pp. 6845 - 6857	1-8	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 05.10.2016		国際調査報告の発送日 18.10.2016	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 後澤 瑞征 電話番号 03-3581-1101 内線 3596	5 X 4 5 4 0

国際調査報告		国際出願番号 PCT/JP2016/073965
C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2013-175831 A (日本電信電話株式会社) 2013.09.05, 段落[0009]-[0010] (ファミリーなし)	1-8

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(出願人による申告) 本出願は情報通信研究機構との平成25年8月27日付け委託契約に基づく研究開発課題「革新的光ファイバの実用化に関する研究開発」に係るもので、産業技術力強化法第19条適用を受ける特許出願である。

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。