

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2013年10月31日(31.10.2013)



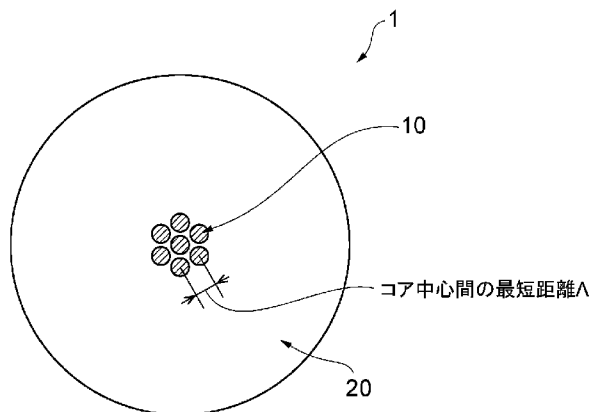
(10) 国際公開番号  
WO 2013/161825 A1

- (51) 国際特許分類:  
G02B 6/04 (2006.01) G02B 6/44 (2006.01)  
G02B 6/02 (2006.01) H04B 10/2581 (2013.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/061940
- (22) 国際出願日: 2013年4月23日(23.04.2013)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2012-101254 2012年4月26日(26.04.2012) JP
- (71) 出願人: 住友電気工業株式会社 (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 林 哲也(HAYASHI Tetsuya); 〒2448588 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内 Kanagawa (JP).
- (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA Yoshiki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目1番1号丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル) 9階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロシヤ (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: MULTICORE OPTICAL FIBER, MULTICORE OPTICAL FIBER CABLE, AND MULTICORE OPTICAL FIBER TRANSMISSION SYSTEM

(54) 発明の名称: マルチコア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、および、マルチコア光ファイバ伝送システム



A Shortest distance between centers of cores

(57) Abstract: The present invention relates to a multimode optical fiber which enables a calculation that effectively uses the MIMO technique. This multimode optical fiber is provided with a plurality of cores and a clad, and rotates about a core fiber axis, and a conditional expression defined by a mean torsion ( $\gamma$  (rad/m)), a shortest distance ( $\Delta$ (m)) between the centers of cores, a group refractive index ( $n_g$ ), a bend radius ( $R$  (m)) during use, a light speed ( $c$  (m/s)) in vacuum, and a circumference ratio ( $\pi$ ) is, as an example,  $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>) or less.

(57) 要約: 本発明は、MIMO技術を効果的に用いた計算を可能にするマルチモード光ファイバに関する。当該マルチモード光ファイバは、複数のコアと、クラッドを備え、コアファイバ軸を中心に回転しており、平均捻じれ率  $\gamma$  (rad/m)、コアの中心間最短距離  $\Delta$  (m)、群屈折率  $n_g$ 、使用時曲げ半径を  $R$  (m)、真空中の光速  $c$  (m/s)、円周率  $\pi$  で規定される条件式が、一例として、 $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>) 以下となる。

WO 2013/161825 A1

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

### 発明の名称：

マルチコア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、および、マルチコア光ファイバ伝送システム

### 技術分野

[0001] 本発明は、マルチコア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、および、マルチコア光ファイバ伝送システムに関するものである。

### 背景技術

[0002] 所定軸に伸びたコアの内部に光を閉じ込めて伝送する光ファイバにおいて偏波モード分散（PMD）を低減させるために、コアを捻る技術が用いられる。例えば、特許文献1では、シングルコア光ファイバの線引き時に、熔融された状態のガラスを捻る（スピン）ことで、コアが非円であることや円対称ではない残留応力の影響を特定の方向に偏らせずランダマイズし、ファイバ自体に起因するPMDを減少させる構成が示されている。また、特許文献2では、ガラスが固化した後に、シングルコア光ファイバを捻る（ツイスト）ことで、ファイバ曲げや側圧等のファイバの外部に起因するPMDを減少させる構成が示されている。

[0003] また、マルチコア光ファイバにおいてもコアを捻る技術について検討されている。例えば、非特許文献1では、複数のコア間のクロストークを小さくして信号同士の干渉を抑えた非結合型マルチコア光ファイバにおいて、クロストークの大きさ（統計的平均値）は、少なくとも光ファイバの捻れに依存しないということが示されている。また、非特許文献2では、単位長さあたりの捻れレートを精密にコントロールし、且つ、100回転/m程度の一定の短ピッチとした場合に、非結合型マルチコア光ファイバにおけるコア間クロストークを大きく低減することができる可能性を示すシミュレーション結果が示されている。

### 先行技術文献

## 特許文献

- [0004] 特許文献1：特許第2981088号明細書  
特許文献2：国際公開第2009/107667号

## 非特許文献

- [0005] 非特許文献1：T.Hayashi et al., “CrosstalkVariation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend,” ECOC2010, We.8.F.6  
非特許文献2：J.M. Fini et al., “Crosstalkin multicore fibers with randomness: gradual drift vs. short-length variations,” Optics Express, vol.20, no. 2, pp.949-959  
非特許文献3：R. Ryf, et al.,” Space-DivisionMultiplexed Transmission over 4200-km 3-Core Microstructured Fiber,” OFC/NFoEC2012paper PDP5C.2, March 8, 2012

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

- [0006] 発明者は、従来のマルチコア光ファイバについて検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、近年、MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 技術を用いて、空間モード間のクロストークを補償し、空間多重伝送を行う技術が用いられるようになった。しかしながら、空間多重伝送の場合は、空間モード間の群遅延差（空間モード間DGD）が大きいことに由来し、MIMO技術を用いたクロストーク補償のための計算（MIMO計算）の負荷が大きいという課題があった。なお、非特許文献3には、結合型マルチコア光ファイバ（コア間のクロストークの高いマルチコア光ファイバ）を用いて信号を伝送し、クロストークにより混ざり合った各コアの信号をMIMO技術により分離、復号する手法が記載されている。
- [0007] これに対して、空間多重伝送に用いられるような結合型マルチコア光ファイバでは、各コアにおける光の封じ込めを強めることやコア間隔を大きくすることでスーパーモード間のDGDを低減させることは既に知られているも

の、個別のコアの空間モード間のDGD（コア間DGD）については検討が必ずしも十分ではなく、コアを捻った（スピン・ツイスト）場合のコア間DGDに対する影響についても検討されておらず、MIMO技術を用いるために好ましいマルチコア光ファイバを選択することが困難であった。

[0008] 本発明は上述のような課題を解決するためになされたものであり、MIMO技術を効果的に用いた計算を可能にするマルチコア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、および、マルチコア光ファイバ伝送システムを提供することを目的としている。

### 課題を解決するための手段

[0009] 本実施形態に係るマルチコア光ファイバは、第1の態様として、所定軸（当該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って伸びる軸）に沿ってそれぞれ伸びるとともに該所定軸に対して垂直な断面上に配置された複数のコアと、複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備え、複数のコアは、所定軸を中心に螺旋状に回転している。この第1の態様に係るマルチコア光ファイバは、当該マルチコア光ファイバの、単位長さあたりに複数のコアが回転する角度の絶対値を当該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m)とし、複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m)とし、複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$ とし、当該マルチコア光ファイバの使用時における曲げ半径で規定される使用時曲げ半径を $R$  (m)とし、真空中の光速を $c$  (m/s)とし、円周率を $\pi$ とするとき、以下の第1～第3の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たし、且つ、以下の第4～第5の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たす。

[0010] なお、上記第1の条件は、下記の式(1)が $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>)以下であることで規定される。上記第2の条件は、半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m)のボビンに巻かれた状態において、下記の式(2)が $7.91 \times 10^{-12} \times 1/R_{\text{bobbin}}$  (s/m<sup>1/2</sup>)以下であることで規定される。上記第3の条件は、最短距離 $\Lambda$ が約 $2.5 \times 10^{-6}$  m以下であり、且つ、平均捻じれ率 $\gamma$ が約4

、 $72 \text{ rad/m}$ 以上であることで規定される。上記第4の条件は、最短距離 $\Lambda$ が約 $25 \times 10^{-6} \text{ m}$ 以下であることで規定される。上記第5の条件は、最も近い隣接コア同士のクロストークが $-15 \text{ dB}$ 以上であることで規定される。

[数1]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR \sqrt{\gamma \pi}} \quad (1)$$

[数2]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR_{\text{bobbin}} \sqrt{\gamma \pi}} \quad (2)$$

[0011] 上記第1の態様に適用可能な第2の態様として、半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、上記式(2)は $7.91 \times 10^{-12} \times 0.2 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s/m}^{1/2}$ ) 以下であるのが好ましい。また、上記第1および第2の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第3の態様として、上記第1の条件が、上記式(1)が $1.58 \times 10^{-13}$  ( $\text{s/m}^{1/2}$ ) 以下であることで規定され、上記第2の条件が、半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、上記式(2)が $1.58 \times 10^{-13} \times 1 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s/m}^{1/2}$ ) 以下であることで規定され、上記第1～第2の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たすのが好ましい。上記第1～第3の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第4の態様として、半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、上記式(2)は $1.58 \times 10^{-13} \times 0.2 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s/m}^{1/2}$ ) 以下であるのが好ましい。上記第1～第4の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第5の態様として、使用時曲げ半径 $R$ は1 m以上であるのが好ましい。上記第1～第5の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第6の態様として、使用時曲げ半径 $R$ は0.2 m以上であるのが好ましい。

[0012] さらに、上記第1～第6の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第7の態様として、当該マルチコア光ファイバは、複数のコアのうち断面

において同一円の円周上に等間隔で配置された複数のコアにより構成された少なくとも1つのコア群を備えてもよい。この場合、コア群に属するコアそれぞれは同一構造であり、該記コア群に属するコアのうち隣接コア同士のクロストークは $-15\text{ dB}$ 以上であるのが好ましい。更に、この第7の態様に係るマルチコア光ファイバは、上述の複数のコアにより複数のコア群が構成されてもよく、このように複数のコア群は配置された構成において、コア群間のクロストークが $-15\text{ dB}$ 以下になる様に、それぞれのコア群は十分離された状態で配置される。なお、上記第1～第7の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第8の態様として、当該マルチコア光ファイバにおいて上述の複数のコアにより複数のコア群が構成されている場合、全てのコア群に属するコアは、複数の同心円の何れかの円周上に配置されるのが好ましい。

[0013] 本実施形態に係るマルチコア光ファイバケーブルは、第9の態様として、所定軸に沿ってそれぞれ伸びるとともに該所定軸に対して垂直な断面上に配置された複数のコアと、複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコア光ファイバを内蔵し、複数のコアは、前記所定軸を中心に回転している。この第9の態様に係るマルチコア光ファイバケーブルは、マルチコア光ファイバの、単位長さ当たりに複数のコアが回転する角度の絶対値を該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m) とし、複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m) とし、複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$  とし、マルチコア光ファイバの使用時における曲げ半径で規定される使用時曲げ半径を $R$  (m) とし、真空中の光速を $c$  (m/s) とし、円周率を $\pi$  とするとき、下記の式(3)が $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>) 以下となるような状態を保持して、マルチコア光ファイバが内蔵されている。

[数3]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \quad (3)$$

[0014] 上記第9の態様に適用可能な第10の態様として、上記式(3)は $1.58 \times 10^{-13}$  (s/m<sup>1/2</sup>)以下となるような状態を保持して、マルチコア光ファイバが内蔵されるのが好ましい。また、上記第9および第10の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第11態様として、当該マルチコア光ファイバケーブルにおいて、マルチコア光ファイバは、その長手方向に沿った曲げ半径の平均値が0.2m以上となるように内蔵されるのが好ましい。上記第9~11の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第11態様として、最短距離 $\Lambda$ は $25 \times 10^{-6}$ m以下であるのが好ましい。更に、上記第9~12の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第13態様として、複数のコアのうち最も近い隣接コア同士のクロストークが-15dB以上であるのが好ましい。

[0015] 本実施形態に係るマルチコア光ファイバ伝送システムは、第14の態様として、所定軸に沿ってそれぞれ伸びるとともに該所定軸に対して垂直な断面上で配置された複数のコアと、複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコア光ファイバを伝送路として用いる。この第14の態様に係るマルチコア光ファイバ伝送システムは、マルチコア光ファイバの、単位長さ当たりに複数のコアが回転する角度の絶対値を当該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m)とし、複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m)とし、複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$ とし、マルチコア光ファイバの、その長手方向に沿った曲げ半径の平均値で規定される長手方向平均値を $R$  (m)とし、真空中の光速を $c$  (m/s)とし、円周率を $\pi$ とし、信号変調のシンボルレートを $f_{\text{symbol}}$  (Baud)とするとき、MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数 $N_{\text{tap}}$ が、以下の式(4)で規定される関係を満たすように設定される。

[数4]

$$\frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \leq 2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}} \quad (4)$$

[0016] なお、上記第14の態様に適用可能な第15の態様として、最短距離 $\Lambda$ が $2.5 \times 10^{-6}$  m以下であるのが好ましい。

[0017] 本実施形態に係るマルチコア光ファイバは、第16の態様として、上記第1～第8の態様のうち少なくとも何れかの態様に係るマルチコア光ファイバが伝送路として適用されても良い。この場合、第16の態様に係るマルチコア光ファイバ伝送システムにおいて、送信機と受信機間のファイバリンク長を $L$  (m) とし、信号変調のシンボルレートを $f_{\text{symbol}}$  (Baud) とするとき、MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数 $N_{\text{tap}}$ が、以下の式(5)で規定される関係を満たすように設定されるのが好ましい。

[数5]

$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \quad (5)$$

[0018] さらに、本実施形態に係るマルチコア光ファイバ伝送システムは、第17の態様として、上記第9～第13の態様のうち少なくとも何れかの態様に係るマルチコア光ファイバケーブルが伝送路として適用されても良い。この場合、第17の態様に係るマルチコア光ファイバにおいて、送信機と受信機間のファイバリンク長を $L$  (m) とし、信号変調のシンボルレートを $f_{\text{symbol}}$  (Baud) とするとき、MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数 $N_{\text{tap}}$ が、以下の式(6)で規定される関係を満たすように設定されるのが好ましい。

[数6]

$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \quad (6)$$

[0019] 更に、上記第14～第17の態様のうち少なくとも何れかの態様に適用可能な第18の態様として、複数のコアのうち最も近い隣接コア間のクロストークが $-15$  dB以上であるのが好ましい。

## 発明の効果

[0020] 本発明によれば、MIMO技術を効果的に用いた計算を可能にするマルチ

コア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、および、マルチコア光ファイバ伝送システムが提供される。

### 図面の簡単な説明

[0021] [図1]本実施形態に係るマルチコア光ファイバにおけるコア配置の第1例を説明する断面図およびボビンに巻かれた状態を説明する斜視図である。

[図2]本実施形態に係るマルチコア光ファイバにおけるコア配置の第2例を説明する断面図である。

[図3]本実施形態に係るマルチコア光ファイバにおけるコア配置の第3例を説明する断面図である。

[図4]本実施形態に係るマルチコア光ファイバの構成を説明する断面図である。

[図5]本実施形態に係るマルチコア光ファイバの他の構成を説明する断面図である。

[図6]本実施形態に係るマルチコア光ファイバケーブルの一例を説明する図である。

[図7]螺旋の半径  $r_n$  と螺旋のピッチ  $L_p$  との関係を示す図である。

### 発明を実施するための形態

[0022] 以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための形態を詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。

[0023] まず、以下の説明においては、MIMO (multiple-Input and Multiple-Output) 技術においてコア間DGDの大きさが与える影響について説明した後、本実施形態に係るマルチコア光ファイバ等について説明する。

[0024] MIMO技術において、空間モード間のクロストークを補償し、空間多重(コア多重/モード多重)伝送を行う技術が知られているが、計算量の大きさから、実時間処理は実現されていない。具体的には、空間モード間の群遅延差(空間モード間DGD)が大きいと、その大きさに比例してMIMO計算を行う際の計算量も大きくする必要がある。例えば、DGDの無い場合に

、MIMO技術を用いて、Mチャンネル分の混ざり合った信号 $(x_1, \dots, x_M)$ を元の信号 $(y_1, \dots, y_M)$ に分離する計算は、簡単にすると、下記の式(7)に示すことができる。

[数7]

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1} & \cdots & b_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix} \quad (7)$$

[0025] 式(7)に示された行列計算では、計算量はMの二乗に比例する。ここで、光ファイバに於けるチャンネル数Mは、空間モード数と偏波モード数との積である。例えば、各コアがシングルモード動作するマルチコア光ファイバ(MCF)の場合は、コア数の2倍がチャンネル数Mとなる。一方、DGDがある場合は、有限インパルス応答(FIR)フィルタを用いた計算が必要となるので、MIMO技術を用いて、混ざり合った信号xを元の信号yに分離する計算は、 $y[n]$ および $x[n]$ をそれぞれ信号列として、用いた場合、下記の式(8)で示すことができる。

[数8]

$$\begin{pmatrix} y_1[n] \\ \vdots \\ y_M[n] \end{pmatrix} = \sum_{l=0}^N \begin{pmatrix} b_{11}[l] & \cdots & b_{1M}[l] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1}[l] & \cdots & b_{MM}[l] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1[n-l] \\ \vdots \\ x_M[n-l] \end{pmatrix} \quad (8)$$

[0026] この場合、 $y[n]$ を複合するために必要な信号がDGDに由来して $x[n-N]$ から $x[n]$ の範囲に広がって分布するために、計算量が式(7)の場合と比較してN+1倍となる。

[0027] ここで、N+1のことを一般にタップ数 $N_{tap}$ といい、タップ数が少ないほど計算量を抑えることができる。DGDが小さければ、時間軸上の受信信号の広がり小さくなりタップ数を小さくできる。シンボルレート(単位時間当たりの変調シンボル個数)が小さい場合、時間軸上での受信信号の広がりが一定であっても、単位時間当たりの信号サンプリング回数が小さくなるため、タップ数は小さくできるが、伝送信号の高速化のためにはシンボルレートは大きい方が望ましい。

- [0028] このように、MIMO技術を用いた計算を行う場合、空間モード間のDGDは小さい方が望ましいので、数モードの光ファイバでは、DGD低減のための手法が幾つか報告されている。一方、結合型マルチコア光ファイバにおけるスーパーモード間のDGDは、各コアへの光の閉じ込めを強めるかコア間隔を離すことで低減できる可能性があることが知られている。しかしながら、個別のコアの空間モード間のDGD（コア間DGD）についてはあまり検討されておらず、光ファイバのスピンのツイストがコア間DGDに対してどのように影響するかについてもこれまで明らかではなかった。
- [0029] これに対して、検討した結果をいかに説明する。なお、以下の説明においてコア間のクロストークの値を用いて議論する場合、その値は「クロストークの統計分布の平均値」をいう。例えば、コアmとコアnの間のクロストークの統計分布の平均値XTの場合、 $XT = P_{nm} / P_{mm}$ と定義した値を用いる。ただし、ここで、 $P_{nm}$ はコアmに光を入射した場合のコアnからの出射光パワーの統計的平均を意味する。
- [0030] 最初に、結合型MCFのコア間DGDの分布を、簡単のために2コアファイバについて考えてみる。
- [0031] まず、非特許文献1によると、ファイバを曲げると、ファイバ内のコアの位置によって各コアの曲げ径が極僅かに異なるため、各コアの光路差も異なってくる。これを直線導波路として扱う場合、等価屈折率を用いる必要がある。等価屈折率は実際の屈折率に、 $(1 + x/R)$ を掛けることで求められる。ただし、Rは基準とするコアの曲げ半径、xは曲げ径方向の基準コアからのずれ量である。よって、MCF中の各コアは、MCFの曲げと捻れにより異なる等価屈折率を持ち得る。
- [0032] また、非特許文献2によるとMCFに含まれるコアmとコアnとの間のクロストーク、または、パワーの交換は、その殆どが、コアmとコアnとの等価屈折率が等しくなる位相整合点で発生することから、MCF中のクロストークを位相整合点でのみ離散的に起こるコア間のパワーの交換というようにモデル化することができる。

[0033] このとき、簡単のために、MCF中で等間隔に位相整合点が存在すると考え、各位相整合点でコアm中のパワーの半分がコアnに、コアn中のパワーの半分がコアmに移行すると考えて、DGDがファイバ長に対してどの様に変化するかを考える。

[0034] コアmとコアnの群屈折率をそれぞれ $n_{g,m}$ と $n_{g,n}$ とし、コアmとコアnとの中間点を基準とすることで、曲げと捻れの影響を考慮したコアmの等価的な群屈折率を式(9)と表すことができ、コアnの等価群屈折率を式(10)と表すことができる。ただし、 $\Lambda$ はコアmの中心とコアnの中心の間の距離(コア間隔)、 $\theta$ は、「コアmとコアnとの中間点」からみた「コアm」の、MCF断面上での位置の曲げ径方向に対する角度(rad)である。

[数9]

$$n_{g,eq,m} = n_{g,m} \left( 1 + \frac{\Lambda}{2R(z)} \cos\theta(z) \right) \quad (9)$$

[数10]

$$n_{g,eq,n} = n_{g,n} \left( 1 - \frac{\Lambda}{2R(z)} \cos\theta(z) \right) \quad (10)$$

[0035] ここで、簡単のために、MCFが一定の捻れレート $\gamma$ (rad/単位長さ)で捻れている場合を考えると $\theta$ は式(11)のように表すことができる。

[数11]

$$\theta(z) = \gamma z \quad (11)$$

[0036] 上記の式(9)～式(11)の場合を考えると、ある隣り合う2つの位相整合点に挟まれた1区間(長さ $\pi/\gamma$ )は、下記の式(12)の範囲内になると考えられる。

[数12]

$$\frac{\pi}{2\gamma} \leq z \leq \frac{3\pi}{2\gamma} \quad (12)$$

[0037] このとき、簡単のためにRを一定とすると、コアmを通った光が式(12)の1区間で感じる平均等価群屈折率は、式(13)の値を実際の群屈折率

$n_{g,m}$ に加えた値となる。

[数13]

$$\begin{aligned}\delta n_{g,eq,m} &= \frac{1}{\pi/\gamma} \int_{\frac{\pi}{2\gamma}}^{\frac{3\pi}{2\gamma}} \left[ n_{g,m} \left( 1 + \frac{\Lambda}{2R} \cos \gamma z \right) - n_{g,m} \right] dz \\ &= -\frac{n_{g,m}\Lambda}{\pi R}\end{aligned}\quad (13)$$

[0038] 同様に、コア n を通った光の感じる平均等価群屈折率は、式 (14) の値を実際の群屈折率  $n_{g,n}$  に加えた値となる。

[数14]

$$\begin{aligned}\delta n_{g,eq,n} &= \frac{1}{\pi/\gamma} \int_{\frac{\pi}{2\gamma}}^{\frac{3\pi}{2\gamma}} \left[ n_{g,n} \left( 1 - \frac{\Lambda}{2R} \cos \gamma z \right) - n_{g,n} \right] dz \\ &= \frac{n_{g,n}\Lambda}{\pi R}\end{aligned}\quad (14)$$

[0039] 式 (12) の区間に隣り合う区間では、式 (13) と式 (14) の符号を逆にした値をそれぞれ実際の群屈折率に加えた値が、それぞれのコアを通った光の感じる平均等価群屈折率となる。

[0040] ここで、隣り合う2つの位相整合点に挟まれた1区間の長さは、下記の式 (15) で表すことができるので、コア m、コア n を通った光の群遅延に、隣り合う2つの位相整合点に挟まれた1区間ごとに、下記の式 (16 a) および式 (16 b) で示す変化が生じる (復号同順)。なお、ただし、c は真空中の光速を示す。

[数15]

$$L_c = \frac{\pi}{\gamma} \quad (15)$$

[数16]

$$\tau_m = \frac{L_c}{c/(n_{g,m} + \delta n_{g,eq,m})} = n_{g,m} \left( 1 \mp \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right) \quad (16 a)$$

$$\tau_n = \frac{L_c}{c/(n_{g,n} + \delta n_{g,eq,n})} = n_{g,n} \left( 1 \mp \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right) \quad (16 b)$$

[0041] したがって、コア m とコア n の間で生じる群遅延差は、下記の式 (17) で示す値となる。

[数17]

$$\delta\tau = |\tau_m - \tau_n| = \left| (n_{g,m} - n_{g,n}) \mp (n_{g,m} + n_{g,n}) \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right| \quad (17)$$

[0042] ここで、上記数式 (17) で示されるコア間の群遅延差を小さくする為には、まず、 $n_{g,m}$   
 $= n_{g,n}$  であることが、望ましい。 $n_{g,m} = n_{g,n}$  であるには、コア m とコア n が同一構造であることが望ましい。

[0043] より詳しく考えると、あるコアのあるモードの群屈折率  $n_g$  は、前記あるモードの伝搬定数を  $\beta$  とし、光の角周波数を  $\omega$  とすると、下記の式 (18) で表され、更に、前記あるモードの伝搬定数  $\beta$  は、周辺のコアの影響を受ける。

[数18]

$$n_g = c \frac{d\beta}{d\omega} \quad (18)$$

[0044] よって、MIMO 計算によりクロストーク補償を行う必要のある高クロストークで結合している複数のコア同士で、それぞれのコアのモードの伝搬定数が等しくなり、さらに群屈折率が等しくなる為には、前記高クロストークで結合している複数のコアが同一構造を有し、且つ、それぞれのコアを基準とした他コアの配置が合同であることが望ましい。より具体的に説明するため、図1～図3には、複数のコア10がクラッド20内に配置されたマルチコア光ファイバ1a～1cの断面構造等が示されている。すなわち、隣接するコア同士が高クロストーク（例えば-15dB以上）となるコア配置として、図1(a)に示されるマルチコア光ファイバ1aの様に同一円上に等間隔（コア間隔 $\Lambda_1$ ）にコア10が配置されていることが望ましい。なお、図1(b)には、マルチコア光ファイバ1aが巻かれるボビン30（中心軸AXに沿って半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m)の胴部を有する）に巻かれたマルチコア光ファイバ1aの様子が示されている。図1(c)には、マルチコア光ファイバ1

aを伝送路として用いたマルチコア光ファイバ伝送システムが示されている。このマルチコア光ファイバ1 aの一方の端部には送信機1 1 1が光学的に接続されており、他方の端部には受信機1 1 2は光学的に接続されている。以下に説明される種々のマルチコア光ファイバがボビン3 0に巻かれてもよい。また、図2に示されるマルチコア光ファイバ1 bの様に、同一円上に等間隔に複数のコア1 0が配置されているコア群（図2の例では、それぞれコア間隔 $\Lambda_1$ 、 $\Lambda_2$ 、 $\Lambda_3$ で配置されたコア1 0により構成された3つのコア群）を複数備え、コア群内の複数のコア1 0はそれぞれのコア群内で同一構造であり、コア群内の隣接するコア同士のクロストークは $-15$  dB以上であるのも望ましい。このとき、コア群間のクロストークが $-15$  dB以下になる様に、それぞれのコア群は十分離れていることが望ましい。複数のコア群を備えるとき、更に、あるコア群内のコアの伝搬定数への、他のコア群のコアからの影響を均一化する為には、図3に示されるマルチコア光ファイバ1 cの様に、「全てのコア群に属するコアが、複数の同心円上に配置されていること」が、更に望ましい。すなわち、図3の例では、内側円の円周上にはコア間隔 $\Lambda_1$ でコア1 0が配置され、外側円の円周上にコア間隔 $\Lambda_2$ でコア1 0が配置されている。なお、コア間隔 $\Lambda_1 \sim \Lambda_3$ は、隣接するコア同士の中心間の最短距離で規定される。これらマルチコア光ファイバ1 b、1 cも、図1 (c)に示されたマルチコア光ファイバ伝送システムの伝送路に適用可能である。

[0045] ここで、 $n_g = n_{g, m}$   
 $= n_{g, n}$ とすると、隣り合う2つの位相整合点に挟まれた1区間で生じる群遅延差の分散は、下記の式(19)で示す値となり、また、ファイバ長をLとしたときに、MCF中の位相整合点の数Nは、下記の数式(20)で求めることができる。

[数19]

$$\sigma_{\tau_c}^2 = \left( 2 \frac{n_g \Lambda}{c \gamma R} \right)^2 \quad (19)$$

[数20]

$$N = \frac{L}{L_c} \quad (20)$$

[0046] 上記の位相整合点間の群遅延と、位相整合点に於けるクロストーク（コア n とコア m 間でのパワーの移行）を考慮すると、N の数が十分に大きい場合中心極限定理により、MCF 各コアのインパルス応答は、正規分布となり、前記正規分布の分散  $\sigma_\tau^2$  は  $\sigma_{\tau_c}^2 N$  となると考えられる。上記の正規分布の標準偏差を、式 (15)、式 (19) および式 (20) を用いて整理すると、下記の式 (21) の通りとなる。

[数21]

$$\begin{aligned} \sigma_\tau &= \sqrt{\sigma_{\tau_c}^2 N} \\ &= 2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma\pi}} \end{aligned} \quad (21)$$

[0047] ここでは、 $\gamma$  が一定の場合について考えたが、 $\gamma$  をファイバ長さ当たりの前記回転の回数の絶対値をファイバ長手方向で平均した値とみなすこともできる。ここで、 $\sigma_\tau$  はコア間 DGD の二乗平均平方根と考えられることから、コア間 DGD を小さくするためには、コア間隔  $\Lambda$  が小さい方が望ましく、ファイバの曲げ半径  $R$  が大きい方が望ましく、ファイバの捻れレート  $\gamma$  が大きい方が望ましいことが分かる。

[0048] 本実施形態に係る MCF を用いて伝送を行う場合、コア間クロストークは MIMO 技術により補償可能であり、クロストーク低減のためにコア間隔  $\Lambda$  を大きくする必要がないので、例えば  $\Lambda$  が  $25 \mu\text{m}$  以下の短いコア間隔が好適であり、 $\Lambda$  が  $20 \mu\text{m}$  以下の短いコア間隔が更に好適であり、 $\Lambda$  が  $15 \mu\text{m}$  以下の短いコア間隔が更に好適であり、 $\Lambda$  が  $10 \mu\text{m}$  以下の短いコア間隔が更に好適である。

[0049] ここで、例えば、元の信号の 95.44% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、時間軸上で  $4 \sigma_\tau$  以上の時間をカバーできるようにタップ数を設定する必要がある。また、99.74% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、時間軸上で  $6 \sigma_\tau$  以上の時間をカバーできるように

タップ数を設定する必要がある。

[0050] ここで、信号のサンプリングレート（単位時間当たりのサンプリング回数）を  $f_{\text{sample}}$  とすると、元の信号の 95.44% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、 $4\sigma_{\tau} f_{\text{sample}}$  以上のタップ数を設定する必要がある、更に、元の信号の 99.74% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、時間軸上で  $6\sigma_{\tau} f_{\text{sample}}$  以上のタップ数を設定する必要がある。

[0051] また、 $f_{\text{sample}}$  は、シンボルレート  $f_{\text{symbol}}$  の倍以上の頻度に設定する必要があるので、元の信号の 95.44% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、 $8\sigma_{\tau} f_{\text{symbol}}$  以上のタップ数を設定する必要がある、更に、元の信号の 99.74% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、時間軸上で  $12\sigma_{\tau} f_{\text{symbol}}$  以上のタップ数を設定する必要がある。

[0052] つまり、所望のシンボルレート  $f_{\text{symbol}}$  およびタップ数  $N_{\text{tap}}$  が与えられれば、元の信号の 95.44% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、下記の式 (22) を満たす必要があることを意味する。また、元の信号の 99.74% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、下記の式 (23) を満たす必要があることを意味する。

[数22]

$$\sigma_{\tau} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}} \quad (22)$$

[数23]

$$\sigma_{\tau} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \quad (23)$$

[0053] 上記式 (21) ~ 式 (23) を整理すると、元の信号の 95.44% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、MCF は下記の式 (24) を満たすことが望ましく、また、元の信号の 99.74% 以上のパワーを MIMO 計算に反映させるためには、MCF は下記の式 (25) を満たすこと

がさらに望ましい。

[数24]

$$2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8 f_{\text{symbol}}} \quad (24)$$

[数25]

$$2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{12 f_{\text{symbol}}} \quad (25)$$

[0054] ここで、 $f_{\text{symbol}}$ が例えば25GBaud (=  $2.5 \times 10^{10}$  Baud : 1秒当たり  $2.5 \times 10^{10}$ シンボル) 以上の場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい  $2 n_g \Lambda / (cR) \cdot (L / \gamma \pi)^{1/2}$  を、式(24) および式(25) を用いて計算したものを表1に示す。

[表1]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$2.5 \times 10^9$ 以下	$1.67 \times 10^9$ 以下
450以下	$2.25 \times 10^9$ 以下	$1.5 \times 10^9$ 以下
400以下	$2.0 \times 10^9$ 以下	$1.33 \times 10^9$ 以下
350以下	$1.75 \times 10^9$ 以下	$1.17 \times 10^9$ 以下
300以下	$1.5 \times 10^9$ 以下	$1.0 \times 10^9$ 以下
250以下	$1.25 \times 10^9$ 以下	$8.33 \times 10^{10}$ 以下
200以下	$1.0 \times 10^9$ 以下	$6.67 \times 10^{10}$ 以下
150以下	$7.5 \times 10^{10}$ 以下	$5.0 \times 10^{10}$ 以下
100以下	$5.0 \times 10^{10}$ 以下	$3.33 \times 10^{10}$ 以下
50以下	$2.5 \times 10^{10}$ 以下	$1.67 \times 10^{10}$ 以下

[0055] また、所望の伝送距離がLで与えられる場合、元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させるためには、MCFは下記の式(26)を満たすことが望ましく、また、元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させるためには、MCFは下記の式(27)を満たすことがさらに望ましい。

[数26]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}\sqrt{L}} \quad (26)$$

[数27]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}\sqrt{L}} \quad (27)$$

ここで、例として、 $f_{\text{symbol}}$ が25 GBaud ( $=2.5 \times 10^{10}$  Baud : 1秒当たり $2.5 \times 10^{10}$ シンボル)以上で少なくとも $L=100 \text{ km} = 1 \times 10^5 \text{ m}$ の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma\pi)^{-1/2}$ を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表2に示す。また、 $f_{\text{symbol}}$ が25 GBaud ( $=2.5 \times 10^{10}$  Baud : 1秒当たり $2.5 \times 10^{10}$ シンボル)以上で少なくとも $L=1000 \text{ km} = 1 \times 10^6 \text{ m}$ の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma\pi)^{-1/2}$ を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表3に示す。式(19)～式(20)を用いて計算し、表3にまとめた。すなわち、MCFは、 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma\pi)^{-1/2}$ が表2または表3の値を満たすように、適切な $\Lambda$ と $\gamma$ の値を持ち、適切なRを保持するようにケーブル化されることが望ましい。

[表2]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の 95.44%以上のパワーを MIMO 計算に反映させる場合	元の信号の 99.74%以上のパワーを MIMO 計算に反映させ
500 以下	$7.91 \times 10^{-12}$ 以下	$5.27 \times 10^{-12}$ 以下
450 以下	$7.12 \times 10^{-12}$ 以下	$4.74 \times 10^{-12}$ 以下
400 以下	$6.32 \times 10^{-12}$ 以下	$4.22 \times 10^{-12}$ 以下
350 以下	$5.53 \times 10^{-12}$ 以下	$3.69 \times 10^{-12}$ 以下
300 以下	$4.74 \times 10^{-12}$ 以下	$3.16 \times 10^{-12}$ 以下
250 以下	$3.95 \times 10^{-12}$ 以下	$2.64 \times 10^{-12}$ 以下
200 以下	$3.16 \times 10^{-12}$ 以下	$2.11 \times 10^{-12}$ 以下
150 以下	$2.37 \times 10^{-12}$ 以下	$1.58 \times 10^{-12}$ 以下
100 以下	$1.58 \times 10^{-12}$ 以下	$1.05 \times 10^{-12}$ 以下
50 以下	$7.91 \times 10^{-13}$ 以下	$5.27 \times 10^{-13}$ 以下

[表3]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の 95.44%以上のパワーを MIMO 計算に反映させる場合	元の信号の 99.74%以上のパワーを MIMO 計算に反映させ
500 以下	$2.5 \times 10^{-12}$ 以下	$1.67 \times 10^{-12}$ 以下
450 以下	$2.25 \times 10^{-12}$ 以下	$1.5 \times 10^{-12}$ 以下
400 以下	$2.0 \times 10^{-12}$ 以下	$1.33 \times 10^{-12}$ 以下
350 以下	$1.75 \times 10^{-12}$ 以下	$1.17 \times 10^{-12}$ 以下
300 以下	$1.5 \times 10^{-12}$ 以下	$1.0 \times 10^{-12}$ 以下
250 以下	$1.25 \times 10^{-12}$ 以下	$8.33 \times 10^{-13}$ 以下
200 以下	$1.0 \times 10^{-12}$ 以下	$6.67 \times 10^{-13}$ 以下
150 以下	$7.5 \times 10^{-13}$ 以下	$5.0 \times 10^{-13}$ 以下
100 以下	$5.0 \times 10^{-13}$ 以下	$3.33 \times 10^{-13}$ 以下
50 以下	$2.5 \times 10^{-13}$ 以下	$1.67 \times 10^{-13}$ 以下

[0056] また、ケーブル化後または敷設後の MCF 使用時において MCF の曲げ半径  $R$  を  $0.1 \text{ m}$  と仮定した場合、 $f_{\text{symbol}}$  が  $25 \text{ GBaud}$  ( $= 2.5 \times 10^{10} \text{ Baud}$  : 1 秒当たり  $2.5 \times 10^{10}$  シンボル) 以上で少なくとも  $L = 1000 \text{ km} = 1 \times 10^5 \text{ m}$  の距離を伝送させる場合に、タップ数を 500 以下、450 以下、400 以下、350 以下、300 以下、250 以下、200 以下、150 以下、100 以下、50 以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい  $2 n_g \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$  を、式 (26) および式 (27) を用いて計算したものを表 4 に示す。また、 $f_{\text{symbol}}$  が  $25 \text{ GBaud}$  ( $= 2.5 \times 10^{10} \text{ Baud}$  : 1 秒当たり  $2.5 \times 10^{10}$  シンボル) 以上で少なくとも  $L = 10000 \text{ km} = 1 \times 10^6 \text{ m}$  の距離を伝送させる場合

に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい  $2 n_{\text{tap}} \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$  を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表5に示す。

[表4]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$7.91 \times 10^{-13}$ 以下	$5.27 \times 10^{-13}$ 以下
450以下	$7.12 \times 10^{-13}$ 以下	$4.74 \times 10^{-13}$ 以下
400以下	$6.32 \times 10^{-13}$ 以下	$4.22 \times 10^{-13}$ 以下
350以下	$5.53 \times 10^{-13}$ 以下	$3.69 \times 10^{-13}$ 以下
300以下	$4.74 \times 10^{-13}$ 以下	$3.16 \times 10^{-13}$ 以下
250以下	$3.95 \times 10^{-13}$ 以下	$2.64 \times 10^{-13}$ 以下
200以下	$3.16 \times 10^{-13}$ 以下	$2.11 \times 10^{-13}$ 以下
150以下	$2.37 \times 10^{-13}$ 以下	$1.58 \times 10^{-13}$ 以下
100以下	$1.58 \times 10^{-13}$ 以下	$1.05 \times 10^{-13}$ 以下
50以下	$7.91 \times 10^{-14}$ 以下	$5.27 \times 10^{-14}$ 以下

[表5]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$2.5 \times 10^{-13}$ 以下	$1.67 \times 10^{-13}$ 以下
450以下	$2.25 \times 10^{-13}$ 以下	$1.5 \times 10^{-13}$ 以下
400以下	$2.0 \times 10^{-13}$ 以下	$1.33 \times 10^{-13}$ 以下
350以下	$1.75 \times 10^{-13}$ 以下	$1.17 \times 10^{-13}$ 以下
300以下	$1.5 \times 10^{-13}$ 以下	$1.0 \times 10^{-13}$ 以下
250以下	$1.25 \times 10^{-13}$ 以下	$8.33 \times 10^{-14}$ 以下
200以下	$1.0 \times 10^{-13}$ 以下	$6.67 \times 10^{-14}$ 以下
150以下	$7.5 \times 10^{-14}$ 以下	$5.0 \times 10^{-14}$ 以下
100以下	$5.0 \times 10^{-14}$ 以下	$3.33 \times 10^{-14}$ 以下
50以下	$2.5 \times 10^{-14}$ 以下	$1.67 \times 10^{-14}$ 以下

[0057] また、ケーブル化後または敷設後のMCF使用時においてMCFの曲げ半径Rを1mと仮定した場合、 $f_{\text{symbol}}$ が25GBaud(=  $2.5 \times 10^{10}$  Baud: 1秒当たり  $2.5 \times 10^{10}$ シンボル)以上で少なくとも  $L = 100 \text{ km} = 1 \times 10^5 \text{ m}$ の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下

、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい  $2 n_g \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$  を、式(26)および式(29)を用いて計算したものを表6に示す。また、 $f_{\text{symbol}}$  が 25 G B a u d (=  $2.5 \times 10^{10}$  B a u d : 1秒当たり  $2.5 \times 10^{10}$  シンボル) 以上で少なくとも  $L = 1000 \text{ km} = 1 \times 10^6 \text{ m}$  の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい  $2 n_g \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$  を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表7に示す。

[表6]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$7.91 \times 10^{-12}$ 以下	$5.27 \times 10^{-12}$ 以下
450以下	$7.12 \times 10^{-12}$ 以下	$4.74 \times 10^{-12}$ 以下
400以下	$6.32 \times 10^{-12}$ 以下	$4.22 \times 10^{-12}$ 以下
350以下	$5.53 \times 10^{-12}$ 以下	$3.69 \times 10^{-12}$ 以下
300以下	$4.74 \times 10^{-12}$ 以下	$3.16 \times 10^{-12}$ 以下
250以下	$3.95 \times 10^{-12}$ 以下	$2.64 \times 10^{-12}$ 以下
200以下	$3.16 \times 10^{-12}$ 以下	$2.11 \times 10^{-12}$ 以下
150以下	$2.37 \times 10^{-12}$ 以下	$1.58 \times 10^{-12}$ 以下
100以下	$1.58 \times 10^{-12}$ 以下	$1.05 \times 10^{-12}$ 以下
50以下	$7.91 \times 10^{-13}$ 以下	$5.27 \times 10^{-13}$ 以下

[表7]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$2.5 \times 10^{-12}$ 以下	$1.67 \times 10^{-12}$ 以下
450以下	$2.25 \times 10^{-12}$ 以下	$1.5 \times 10^{-12}$ 以下
400以下	$2.0 \times 10^{-12}$ 以下	$1.33 \times 10^{-12}$ 以下
350以下	$1.75 \times 10^{-12}$ 以下	$1.17 \times 10^{-12}$ 以下
300以下	$1.5 \times 10^{-12}$ 以下	$1.0 \times 10^{-12}$ 以下
250以下	$1.25 \times 10^{-12}$ 以下	$8.33 \times 10^{-13}$ 以下
200以下	$1.0 \times 10^{-12}$ 以下	$6.67 \times 10^{-13}$ 以下
150以下	$7.5 \times 10^{-13}$ 以下	$5.0 \times 10^{-13}$ 以下
100以下	$5.0 \times 10^{-13}$ 以下	$3.33 \times 10^{-13}$ 以下
50以下	$2.5 \times 10^{-13}$ 以下	$1.67 \times 10^{-13}$ 以下

[0058] また、ケーブル化後または敷設後のMCF使用時においてMCFの曲げ半

径Rを10mと仮定した場合、 $f_{\text{symbol}}$ が25GBaud ( $=2.5 \times 10^{10}$  Baud : 1秒当たり $2.5 \times 10^{10}$ シンボル)以上で少なくとも $L=1000\text{ km}=1 \times 10^6\text{ m}$ の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい $2n_g \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表8に示す。また、 $f_{\text{symbol}}$ が25GBaud ( $=2.5 \times 10^{10}$  Baud : 1秒当たり $2.5 \times 10^{10}$ シンボル)以上で少なくとも $L=1000\text{ km}=1 \times 10^6\text{ m}$ の距離を伝送させる場合に、タップ数を500以下、450以下、400以下、350以下、300以下、250以下、200以下、150以下、100以下、50以下にするためには、ファイバが満たす状態にあることが望ましい $2n_g \Lambda / c \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ を、式(26)および式(27)を用いて計算したものを表9に示す。

[表8]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$7.91 \times 10^{-11}$ 以下	$5.27 \times 10^{-11}$ 以下
450以下	$7.12 \times 10^{-11}$ 以下	$4.74 \times 10^{-11}$ 以下
400以下	$6.32 \times 10^{-11}$ 以下	$4.22 \times 10^{-11}$ 以下
350以下	$5.53 \times 10^{-11}$ 以下	$3.69 \times 10^{-11}$ 以下
300以下	$4.74 \times 10^{-11}$ 以下	$3.16 \times 10^{-11}$ 以下
250以下	$3.95 \times 10^{-11}$ 以下	$2.64 \times 10^{-11}$ 以下
200以下	$3.16 \times 10^{-11}$ 以下	$2.11 \times 10^{-11}$ 以下
150以下	$2.37 \times 10^{-11}$ 以下	$1.58 \times 10^{-11}$ 以下
100以下	$1.58 \times 10^{-11}$ 以下	$1.05 \times 10^{-11}$ 以下
50以下	$7.91 \times 10^{-12}$ 以下	$5.27 \times 10^{-12}$ 以下

[表9]

$N_{\text{tap}}$	元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合	元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させ
500以下	$2.5 \times 10^{-11}$ 以下	$1.67 \times 10^{-11}$ 以下
450以下	$2.25 \times 10^{-11}$ 以下	$1.5 \times 10^{-11}$ 以下
400以下	$2.0 \times 10^{-11}$ 以下	$1.33 \times 10^{-11}$ 以下
350以下	$1.75 \times 10^{-11}$ 以下	$1.17 \times 10^{-11}$ 以下
300以下	$1.5 \times 10^{-11}$ 以下	$1.0 \times 10^{-11}$ 以下
250以下	$1.25 \times 10^{-11}$ 以下	$8.33 \times 10^{-12}$ 以下
200以下	$1.0 \times 10^{-11}$ 以下	$6.67 \times 10^{-12}$ 以下
150以下	$7.5 \times 10^{-12}$ 以下	$5.0 \times 10^{-12}$ 以下
100以下	$5.0 \times 10^{-12}$ 以下	$3.33 \times 10^{-12}$ 以下
50以下	$2.5 \times 10^{-12}$ 以下	$1.67 \times 10^{-12}$ 以下

[0059] ここで、更に、 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が汎用シングルモードファイバ（SSMF）におけるPMDと同等以下か、少なくとも10倍以下に抑えることができれば、タップ数の増加を10倍以下に抑えることができるため、さらに望ましい。SSMFのPMDは一般に最大でも $0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ （すなわち約 $1.58 \times 10^{-14} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ）以下である。

[0060]  $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が、 $0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ の10倍以下、すなわち $5.0 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ （すなわち約 $1.58 \times 10^{-13} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ）以下になるためには、上記式（21）に基づいて、本発明のマルチコア光ファイバは、下記の式（28）を満たすことが望ましい。また、 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が $0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ の5倍以下、すなわち $2.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ （すなわち約 $7.91 \times 10^{-14} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ）以下になるためには、下記の式（29）を満たすことが望ましい。さらに、 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が $0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ の2倍以下、すなわち $1.0 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ （すなわち約 $3.16 \times 10^{-14} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ）以下になるためには、下記の式（30）を満たすことが望ましい。そして、 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が $0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ と同等（すなわち約 $1.58 \times 10^{-13} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ）以下になるためには、下記の式（31）を満たすことが望ましい。ただし、それぞれのパラメータの単位は、 $L$ （m）、 $\Lambda$ （m）、 $c$ （m/s）、 $R$ （m）、 $\gamma$ （rad/m）である。

[数28]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 1.58 \times 10^{-13} \quad (28)$$

[数29]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 7.91 \times 10^{-14} \quad (29)$$

[数30]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 3.16 \times 10^{-14} \quad (30)$$

[数31]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 1.58 \times 10^{-14} \quad (31)$$

[0061] ケーブル化後または敷設後のMCF使用時においてMCFの曲げ半径Rを10m以上、5m以上、3m以上、2m以上、1m以上、0.2m以上と仮定した場合に、式(28)～式(31)を満たすために、本発明のマルチコア光ファイバが満たすことが望ましい $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma\pi)^{-1/2}$ を表10に示す。また、 $n_g = 1.46$ 、 $\Lambda$ が $25 \mu\text{m} (= 25 \times 10^{-6}\text{m})$ 以下と仮定した場合に、表10の値を実現するために望ましい $\gamma$ (rad/m)の値を表11に示す。

[0062] 例えば、一般的なテープスロット型ケーブルを考えた場合、ケーブル化後のファイバに付与される曲げ半径は0.2乃至2mの範囲にあるものが殆どなので、表10より、マルチコア光ファイバにおける $2n_g \Lambda / c \cdot (\gamma\pi)^{-1/2}$ が $3.16 \times 10^{-14}$ 以下であれば、一般的なテープスロット型ケーブルで当該マルチコア光ファイバをケーブル化した際には、 $\sigma_\tau / L^{1/2}$ を $5.0 \text{ ps} / \text{km}^{1/2}$ 以下にすることが可能になると考えられる。また、同様にして、表11より、 $\Lambda$ が $25 \mu\text{m} (= 25 \times 10^{-6}\text{m})$ 以下であり、且つ、 $\gamma$ が約 $4.72 \text{ rad} / \text{m}$ 以上であれば、一般的なテープスロット型ケーブルで当該マルチコア光ファイバをケーブル化した際には、 $\sigma_\tau / L^{1/2}$ を $5.0 \text{ ps} / \text{km}^{1/2}$ 以下にすることが可能になると考えられる。

[表10]

$R \backslash \sigma_r/L^{1/2}$	5.0 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	2.5 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	1.0 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	0.5 ps/km <sup>1/2</sup> 以下
10m 以上	1.58×10 <sup>-12</sup> 以下	7.91×10 <sup>-13</sup> 以下	3.16×10 <sup>-13</sup> 以下	1.58×10 <sup>-13</sup> 以下
5m 以上	7.91×10 <sup>-13</sup> 以下	3.95×10 <sup>-13</sup> 以下	1.58×10 <sup>-13</sup> 以下	7.91×10 <sup>-14</sup> 以下
3m 以上	4.74×10 <sup>-13</sup> 以下	2.37×10 <sup>-13</sup> 以下	9.49×10 <sup>-14</sup> 以下	4.74×10 <sup>-14</sup> 以下
2m 以上	3.16×10 <sup>-13</sup> 以下	1.58×10 <sup>-13</sup> 以下	6.32×10 <sup>-14</sup> 以下	3.16×10 <sup>-14</sup> 以下
1m 以上	1.58×10 <sup>-13</sup> 以下	7.91×10 <sup>-14</sup> 以下	3.16×10 <sup>-14</sup> 以下	1.58×10 <sup>-14</sup> 以下
0.2m 以上	3.16×10 <sup>-14</sup> 以下	1.58×10 <sup>-14</sup> 以下	6.32×10 <sup>-15</sup> 以下	3.16×10 <sup>-15</sup> 以下

[表11]

$R \backslash \sigma_r/L^{1/2}$	5.0 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	2.5 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	1.0 ps/km <sup>1/2</sup> 以下	0.5 ps/km <sup>1/2</sup> 以下
10m 以上	0.002 rad/m 以上	0.008 rad/m 以上	0.05 rad/m 以上	0.19 rad/m 以上
5m 以上	0.008 rad/m 以上	0.03 rad/m 以上	0.19 rad/m 以上	0.75 rad/m 以上
3m 以上	0.02 rad/m 以上	0.08 rad/m 以上	0.52 rad/m 以上	2.10 rad/m 以上
2m 以上	0.05 rad/m 以上	0.19 rad/m 以上	1.18 rad/m 以上	4.72 rad/m 以上
1m 以上	0.19 rad/m 以上	0.75 rad/m 以上	4.72 rad/m 以上	18.9 rad/m 以上
0.2m 以上	4.72 rad/m 以上	18.9 rad/m 以上	118 rad/m 以上	472 rad/m 以上

[0063] ここで、使用時のファイバの曲げ半径をRとし、ポビン巻き状態でのファイバの曲げ半径をR<sub>bobbin</sub>とした場合に、使用時に $\sigma_r/L^{1/2}$ が目標Aを満たすためには、式(21)に基づいて式(32)を満たすことが望ましい。このとき、ポビン巻き時に満たすべき目標は式(33)より、 $AR/R_{bobbin}$ となる。

[数32]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq A \tag{32}$$

[数33]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} = \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \frac{R}{R_{bobbin}} \leq A \frac{R}{R_{bobbin}} \tag{33}$$

[0064] 次に、式(28)を満たす本発明のマルチコア光ファイバを用いた伝送時の望ましいN<sub>tap</sub>とf<sub>symbol</sub>の関係について考える。元の信号の95.44%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合N<sub>tap</sub>とf<sub>symbol</sub>は式(22)を満たすことが望ましく、元の信号の99.74%以上のパワーをMIMO計算に反映させる場合N<sub>tap</sub>とf<sub>symbol</sub>は式(23)を満たすことが更

に望ましいが、必要以上の割合のパワーをMIMO計算に反映させると $N_{\text{tap}}$ の増加を招き、ひいては計算量の増加を招く。そこで、元の信号の95.44%以上且つ99.74%以下のパワーをMIMO計算に反映させることが望ましく、下記の式(34)を満たす様に、 $N_{\text{tap}}$ と $f_{\text{symbol}}$ の関係を設定することが望ましく、また、上記式(21)より、下記の式(35)を満たすことが望ましい。

[数34]

$$\frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \leq \sigma_{\tau} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}} \quad (34)$$

[数35]

$$\frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \leq 2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}} \quad (35)$$

[0065] ここで、式(34)を $N_{\text{tap}}/f_{\text{symbol}}$ について整理すると、下記の式(36)となる。

[数36]

$$8\sigma_{\tau} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12\sigma_{\tau} \quad (36)$$

[0066] よって、 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ が $5.0 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$  (すなわち約 $1.58 \times 10^{-13} \text{ s}/\text{m}^{1/2}$ ) 以下のマルチコア光ファイバを用いて伝送を行う場合、式(36)から、 $N_{\text{tap}}$ と $f_{\text{symbol}}$ の関係は、少なくとも下記の式(37)を満たすことが望ましい。なお、ここでは、 $f_{\text{symbol}}$ の単位はBaud、Lの単位はmである。

[数37]

$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \quad (37)$$

[0067] 本実施形態に係るマルチコア光ファイバは、複数のコアが、物理的に近接し光学的に結合した状態で配置されているのが好適である。この様なマルチコア光ファイバの断面図の例を図4に示す。図4に示されたマルチコア光ファイバ1では、複数のコア10が近接配置され、その周囲にクラッド20が

設けられている。複数のコア10同士は物理的に接触していてもよいが、接触せずに離間していた方が各コア10への信号の入出力が容易になる。したがって、各コア10の縁同士が少なくとも約1  $\mu$ m以上離れていることが望ましく、各コア10の縁同士が少なくとも約5  $\mu$ m以上離れていることが更に望ましく、各コア10の縁同士が少なくとも約10  $\mu$ m以上離れていることが望ましい。ここで、光学的に結合した状態とはコア間のクロストークが十分大きいことをいう。隣接コア間のクロストークは、-15 dB以上が望ましく、-10 dB以上が更に望ましく、-5 dB以上が更に望ましく、おおよそ0 dBが更に望ましい。コア間のDGDは、前述の通り、コア間隔が大きいほど大きくなることから、ここまで $\wedge$ として挙げられてきた値は、少なくとも「複数のコアそれぞれの中心の間の最短距離」であることが望ましく、「物理的に近接し光学的に結合した複数のコアそれぞれの中心の間の最長距離」であることが更に望ましい。

[0068] また、本実施形態に係るマルチコア光ファイバとしては、内蔵する複数のコアのうち、全てではない一部且つ複数のコアが、物理的に近接し光学的に結合したコアで構成されるコア群を複数個形成し、それぞれのコア群同士の間のクロストークは適切に抑圧された状態で配置されているのが好適である。コア群内の隣接コア同士の間のクロストークは-15 dB以上であることが望ましく、-10 dB以上が更に望ましく、-5 dB以上が更に望ましく、おおよそ0 dBが更に望ましい。コア群同士の間のクロストークは少なくとも-16.7 dB以下であることが望ましく、-20 dB以下であることが更に望ましく、-30 dB以下であることが更に望ましい。このようなマルチコア光ファイバの断面図の例を図5に示す。

[0069] 図5に示されたマルチコア光ファイバ2は、7個のコア10からなるコア群11が、ファイバ内に7個形成され、これらがクラッド20によりおおわれている。なお、これらの数はこの値に限られない。また、図4の例は、コア群が1つの場合ということも可能である（図1(a)参照）。このようなMCFを伝送路として用いる場合、個別のコア群11内における空間多重信

号の分離・復号に個別にMIMO技術を適用し、全てのコアに一体としてMIMO技術を適用しない場合、MIMO計算の計算量を削減できるため好適である。

[0070] また、本実施形態に係るマルチコア光ファイバを伝送路として用いたマルチコア光ファイバ伝送システムは、上記のコア群11が一体として導波する複数のスーパーモードに信号を多重化するのではなく（すなわち、送信機からマルチコア光ファイバへの結合時に送信機の空間多重用の各信号をMCFのコア群が導波する各スーパーモードに結合し、マルチコア光ファイバから受信機への結合時にMCFの各スーパーモードから受信機のMIMO処理前の各信号を空間分離するのではなく）、上記のコア群11内の各コア10が導波する空間モードに信号を多重化する（送信機からMCFへの結合時に送信機の空間多重用の各信号をマルチコア光ファイバの各コアが個別に導波する空間モードに結合し、MCFから受信機への結合時にマルチコア光ファイバの各空間モードから受信機のMIMO処理前の各信号を空間分離する）ことで、多重化に用いている空間モード間のDGDを小さくすることができる。

[0071] また、本実施形態に係るマルチコア光ファイバが内蔵するコアは、それぞれがシングルモード動作することが望ましい。これは、同一コア内でのモード間DGD（すなわちDMD）の発生を抑止できるためである。ここで、「物理的に近接し光学的に結合したコアで構成されるコア群に含まれるコアそれぞれがシングルモード動作する」と言うことは、「コア群は、コア群に含まれるコア数と同じ次数の空間モードまでは導波するが、それよりも大きな次数の空間モードはカットオフされる」と言い換えることも出来る。一方、本実施形態に係るMCFが内蔵するコアは、それぞれが複数の空間モードを導波することが望ましい。これは、複数の空間モードを導波するコアにおいて、空間モード間でのランダムな結合を長手方向に高い頻度で発生させるためである。単一のコアや、非結合の複数のコアそれぞれが、複数の空間モードを導波する場合は、空間モード間のランダムな結合を、長手方向に高い頻

度で発生させることは難しい。このようなランダムな結合は、せいぜい数  $k$   $m$  ほどのファイバ接続点で発生する程度である。これに対して、本実施形態に係るマルチコア光ファイバでは、内蔵されるコアそれぞれが複数の空間モードを導波する様にすることで、コア間で同次数のコアモード同士の間や、異なる次数のコアモード同士の間におけるランダムなモード結合を、それぞれの位相整合点で発生させることができる。そのため、本実施形態に係るマルチモード光ファイバでは、高い空間モード密度と低い DGD の両立が可能になる。上記実施形態に係るマルチコア光ファイバに内蔵されるコアは、それぞれがマルチモード動作する場合、DMD が十分小さいことが望ましい。

[0072] また、本実施形態に係るマルチコア光ファイバをケーブル化する際には、適切なケーブル化によりマルチコア光ファイバの曲げ半径を制御することができる図 6 にその一例を示す。図 6 (a) および図 6 (b) に示された光ファイバケーブル (マルチコア光ファイバケーブル) 300 は、中心部材 310 と、中心部材 310 に所定ピッチで巻きつけられた複数の光ファイバ 100 と、その巻きつけられた状態を保持するように複数の光ファイバ上に巻きつけられた押え巻き 250 と、押え巻き 250 の周りを覆う外被 200 を備える。なお、光ファイバケーブル 300 も、図 1 (c) に示されたマルチコア光ファイバ伝送システムの伝送路に適用可能である。また、上述のマルチコア光ファイバ 1、2 も、図 1 (c) に示されたマルチコア光ファイバ伝送システムの伝送路に適用可能である。光ファイバ 100 は、マルチコア光ファイバ 100A と、マルチコア光ファイバ 100A を全体的に覆った樹脂被覆 130 からなる。複数の光ファイバ 100 それぞれは、その長手方向に沿って所定のピッチで中心部材 310 に巻きつけられることにより、一定の曲率半径の曲げが付与されている。外被 200 は、光ファイバ 100 を外力から保護するように、押え巻き 250 の全体を覆っている。なお、図 6 (b) において、光ファイバ 100 は、記載簡略のため、1 芯のみ記載しているが、実際には当該光ファイバケーブル 300 に含まれる全光ファイバ 100 が

中心部材 310 に巻かれている。図 6 (a) および図 6 (b) の光ファイバケーブルのように、テンションメンバなどの所定の軸の周囲に MCF を螺旋状に巻き付けるようにケーブル化すれば、螺旋の半径  $r_h$  と螺旋のピッチ  $L_p$  を調整することで、MCF の曲げ半径  $R$  を制御することができる。図 7 に、螺旋の半径  $r_h$  と螺旋のピッチ  $L_p$  の関係を示す。所定軸の長手方向を  $z$  軸として、この  $z$  軸に直交する  $x-y$  平面上で  $z$  軸を基準に極座標  $(r, \theta)$  をとると、MCF は、 $r = r_h$ 、 $\theta = 2\pi z / L_p$  となる配置を示している。

[0073] 以上のように、本実施形態にかかるマルチコア光ファイバ、マルチコア光ファイバケーブル、およびマルチコア光ファイバ伝送システムによれば、MIMO 技術を効果的に用いた計算を行うことが可能となる。なお、本発明は上記実施形態に限定されず種々の変更を行うことができる。

#### 符号の説明

[0074] 1a～1c、1、2…マルチコア光ファイバ (MCF)、10…コア、11…コア群、20…クラッド、300…光ファイバケーブル。

## 請求の範囲

[請求項1]

所定軸に沿ってそれぞれ伸びるとともに前記所定軸に対して垂直な断面上に配置された複数のコアと、前記複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコア光ファイバであって、

前記複数のコアは、前記所定軸を中心に回転しており、

当該マルチコア光ファイバの、単位長さ当たりに前記複数のコアが回転する角度の絶対値を当該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m) とし、

前記複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m) とし、

前記複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$  とし、

当該マルチコア光ファイバの使用時における曲げ半径で規定される使用時曲げ半径を $R$  (m) とし、

真空中の光速を $c$  (m/s) とし、

円周率を $\pi$  とするとき、

第1の条件が、下記の式(1)が $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>) 以下であることで規定され、

第2の条件が、半径 $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、下記の式(2)が $7.91 \times 10^{-12} \times 1/R_{\text{bobbin}}$  (s/m<sup>1/2</sup>) 以下であることで規定され、

第3の条件が、前記最短距離 $\Lambda$ が約 $2.5 \times 10^{-6}$  m以下であり、且つ、前記平均捻じれ率 $\gamma$ が約 $4.72$  rad/m以上であることで規定され、

第4の条件が、前記最短距離 $\Lambda$ が約 $2.5 \times 10^{-6}$  m以下であることで規定され、

第5の条件が、最も近い隣接コア同士のクロストークが $-15$  dB

以上であることで規定され、

前記第 1 ～ 第 3 の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たし、且つ、前記第 4 ～ 第 5 の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たすことを特徴とするマルチコア光ファイバ。

[数1]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \quad (1)$$

[数2]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR_{\text{bobbin}}\sqrt{\gamma\pi}} \quad (2)$$

[請求項2] 前記半径  $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、前記式 (2) が  $7.91 \times 10^{-12} \times 0.2 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s} / \text{m}^{1/2}$ ) 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項3] 前記第 1 の条件が、前記式 (1) が  $1.58 \times 10^{-13}$  ( $\text{s} / \text{m}^{1/2}$ ) 以下であることを規定され、

前記第 2 の条件が、前記半径  $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、前記式 (2) が  $1.58 \times 10^{-13} \times 1 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s} / \text{m}^{1/2}$ ) 以下であることを規定され、

前記第 1 ～ 第 2 の条件のうち少なくとも何れかの条件を満たすことを特徴とする請求項 1 に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項4] 前記半径  $R_{\text{bobbin}}$  (m) のボビンに巻かれた状態において、前記式 (2) が  $1.58 \times 10^{-13} \times 0.2 / R_{\text{bobbin}}$  ( $\text{s} / \text{m}^{1/2}$ ) 以下であることを特徴とする請求項 3 に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項5] 前記使用時曲げ半径  $R$  が 1 m 以上であることを特徴とする請求項 1 または 3 に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項6] 前記使用時曲げ半径  $R$  が 0.2 m 以上であることを特徴とする請求項 1 ～ 4 の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項7] 前記複数のコアのうち前記断面において同一円の円周上に等間隔で配置された複数のコアにより構成された少なくとも 1 つのコア群を備

え、

前記コア群に属するコアそれぞれは同一構造であり、

前記コア群に属するコアのうち隣接コア同士のクロストークは $-15$  dB以上であり、

前記複数のコアにより複数のコア群が構成されている場合、コア群間のクロストークが $-15$  dB以下になる様に、それぞれのコア群は十分離れていることを特徴とする請求項1～6の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項8]

前記複数のコアにより複数のコア群が構成されている場合、全てのコア群に属するコアが、複数の同心円の何れかの円周上に配置されていることを特徴とする請求項7に記載のマルチコア光ファイバ。

[請求項9]

所定軸に沿ってそれぞれ伸びるとともに前記所定軸に対して垂直な断面上に配置された複数のコアと、前記複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコア光ファイバを内蔵するマルチコア光ファイバケーブルであって、

前記複数のコアは、前記所定軸を中心に回転しており、

前記マルチコア光ファイバの、単位長さ当たりに前記複数のコアが回転する角度の絶対値を前記マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m)とし、

前記複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m)とし、

前記複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$ とし、

前記マルチコア光ファイバの使用時における曲げ半径で規定される使用時曲げ半径を $R$  (m)とし、

真空中の光速を $c$  (m/s)とし、

円周率を $\pi$ とするとき、

下記の式(3)が $7.91 \times 10^{-12}$  (s/m<sup>1/2</sup>)以下となるよ

うな状態を保持して、前記マルチコア光ファイバが内蔵されていることを特徴とするマルチコア光ファイバケーブル。

[数3]

$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \quad (3)$$

[請求項10] 前記式(3)が $1.58 \times 10^{-13}$  (s/m<sup>1/2</sup>)以下となるような状態を保持して、前記マルチコア光ファイバが内蔵されていることを特徴とする請求項9に記載のマルチコア光ファイバケーブル。

[請求項11] 請求項9または10に記載のマルチコア光ファイバを内蔵するマルチコア光ファイバケーブルであって、前記マルチコア光ファイバは、その長手方向に沿った曲げ半径の平均値が0.2m以上となるように内蔵されていることを特徴するマルチコア光ファイバケーブル。

[請求項12] 前記最短距離 $\Lambda$ が $25 \times 10^{-6}$ m以下であることを特徴とする請求項9～11の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバケーブル。

[請求項13] 前記複数のコアのうち最も近い隣接コア同士のクロストークが-15dB以上であることを特徴とする請求項9～11の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバケーブル。

[請求項14] 所定軸に沿ってそれぞれ伸びるとともに前記所定軸に対して垂直な断面上で配置された複数のコアと、前記複数のコアそれぞれを一体的に取り囲んだクラッド領域とを備えたマルチコア光ファイバを伝送路として用いるマルチコア光ファイバ伝送システムであって、

前記マルチコア光ファイバの、単位長さ当たりに前記複数のコアが回転する角度の絶対値を当該マルチコア光ファイバの長手方向に沿って平均した値で規定される平均捻じれ率を $\gamma$  (rad/m)とし、

前記複数のコアそれぞれの中心の間における最短距離を $\Lambda$  (m)とし、

前記複数のコアそれぞれにおける基底モードに対する群屈折率を $n_g$ とし、

前記マルチコア光ファイバの、その長手方向に沿った曲げ半径の平均値で規定される長手方向平均値を  $R$  (m) とし、

真空中の光速を  $c$  (m/s) とし、

円周率を  $\pi$  とし、

信号変調のシンボルレートを  $f_{\text{symbol}}$  (Baud) とするとき、

MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数  $N_{\text{tap}}$  が、以下の式(4)で規定される関係を満たすように設定されることを特徴とするマルチコア光ファイバ伝送システム。

[数4]

$$\frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \leq 2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}} \quad (4)$$

[請求項15] 前記最短距離  $\Lambda$  が  $25 \times 10^{-6}$  m 以下であることを特徴とする請求項14に記載のマルチコア光ファイバ伝送システム。

[請求項16] 請求項1～8の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバを伝送路として用いるマルチコア光ファイバ伝送システムであって、  
送信機と受信機間のファイバリンク長を  $L$  (m) とし、  
信号変調のシンボルレートを  $f_{\text{symbol}}$  (Baud) とするとき、  
MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数  $N_{\text{tap}}$  が、以下の式(5)で規定される関係を満たすように設定されることを特徴とするマルチコア光ファイバ伝送システム。

[数5]

$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \quad (5)$$

[請求項17] 請求項9～13の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバケーブルを伝送路として用いるマルチコア光ファイバ伝送システムであって、  
送信機と受信機間のファイバリンク長を  $L$  (m) とし、  
信号変調のシンボルレートを  $f_{\text{symbol}}$  (Baud) とするとき、  
MIMO技術による復号計算を行う際のタップ数  $N_{\text{tap}}$  が、以下の

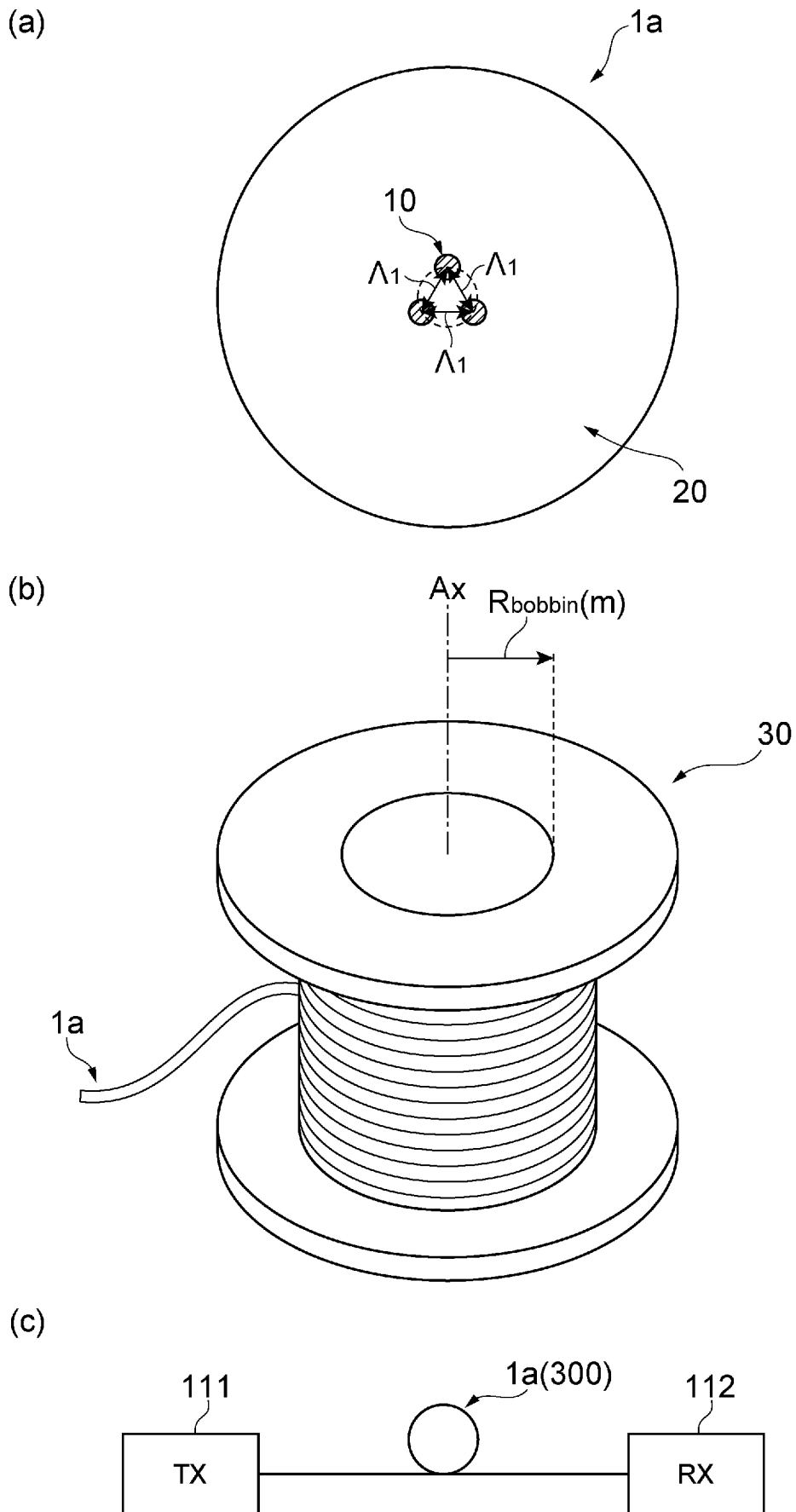
式（6）で規定される関係を満たすように設定されることを特徴とするマルチコア光ファイバ伝送システム。

[数6]

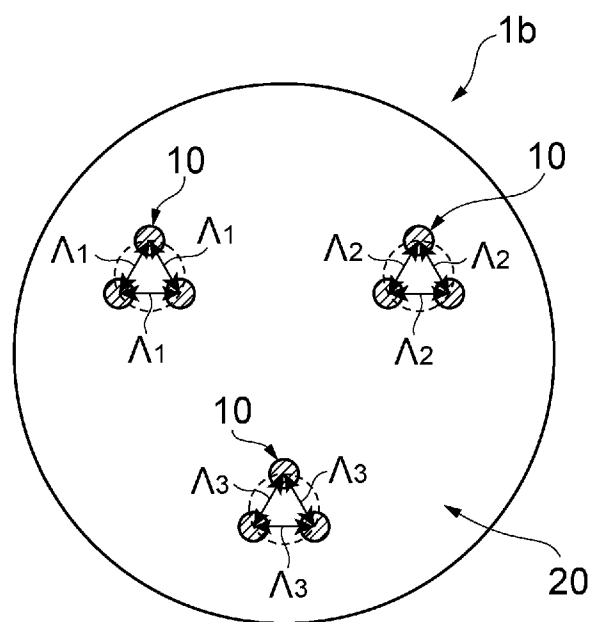
$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \quad (6)$$

[請求項18] 前記複数のコアのうち最も近い隣接コア間のクロストークが-15 dB以上であることを特徴とする請求項14～17の何れか一項に記載のマルチコア光ファイバ伝送システム。

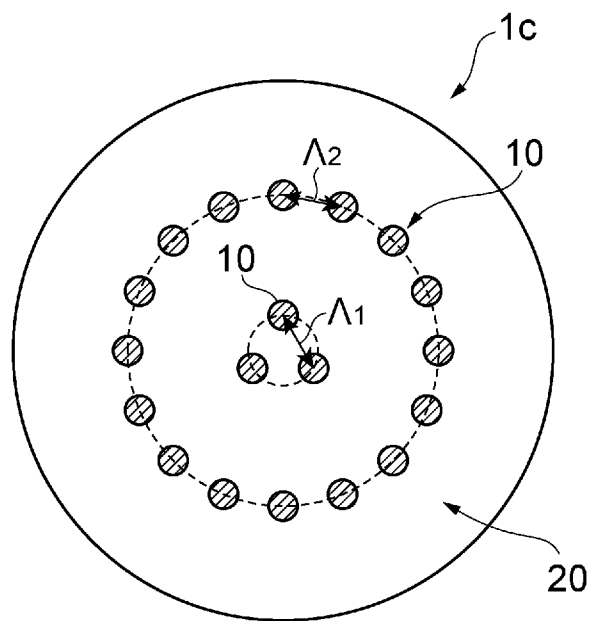
[図1]



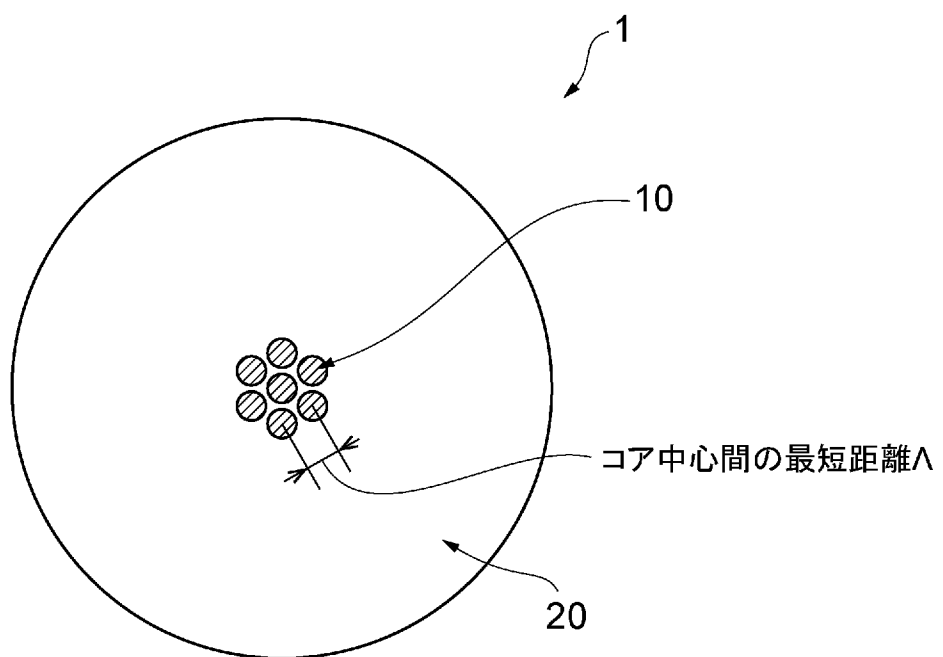
[図2]



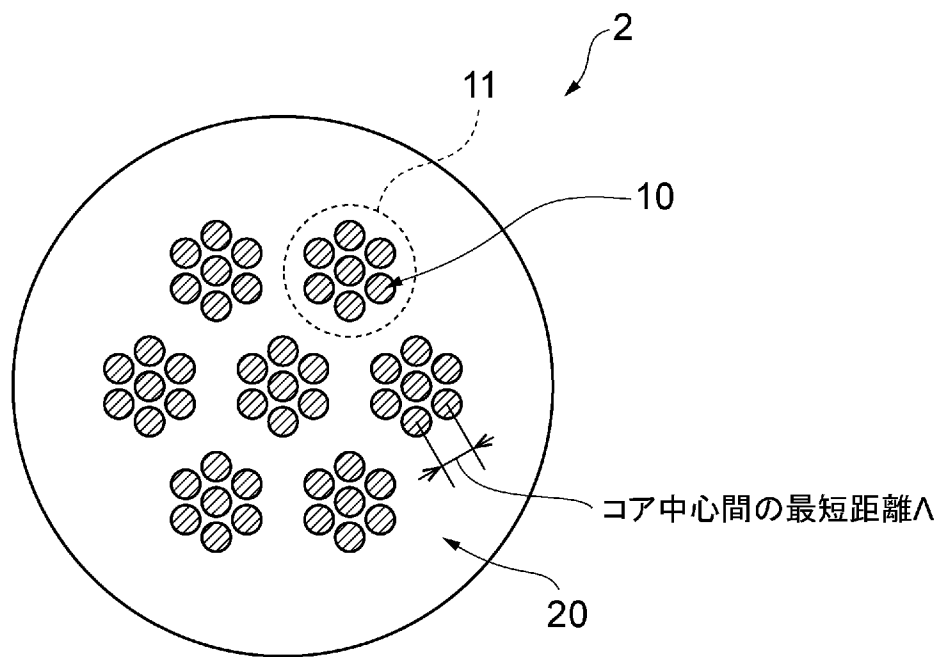
[図3]



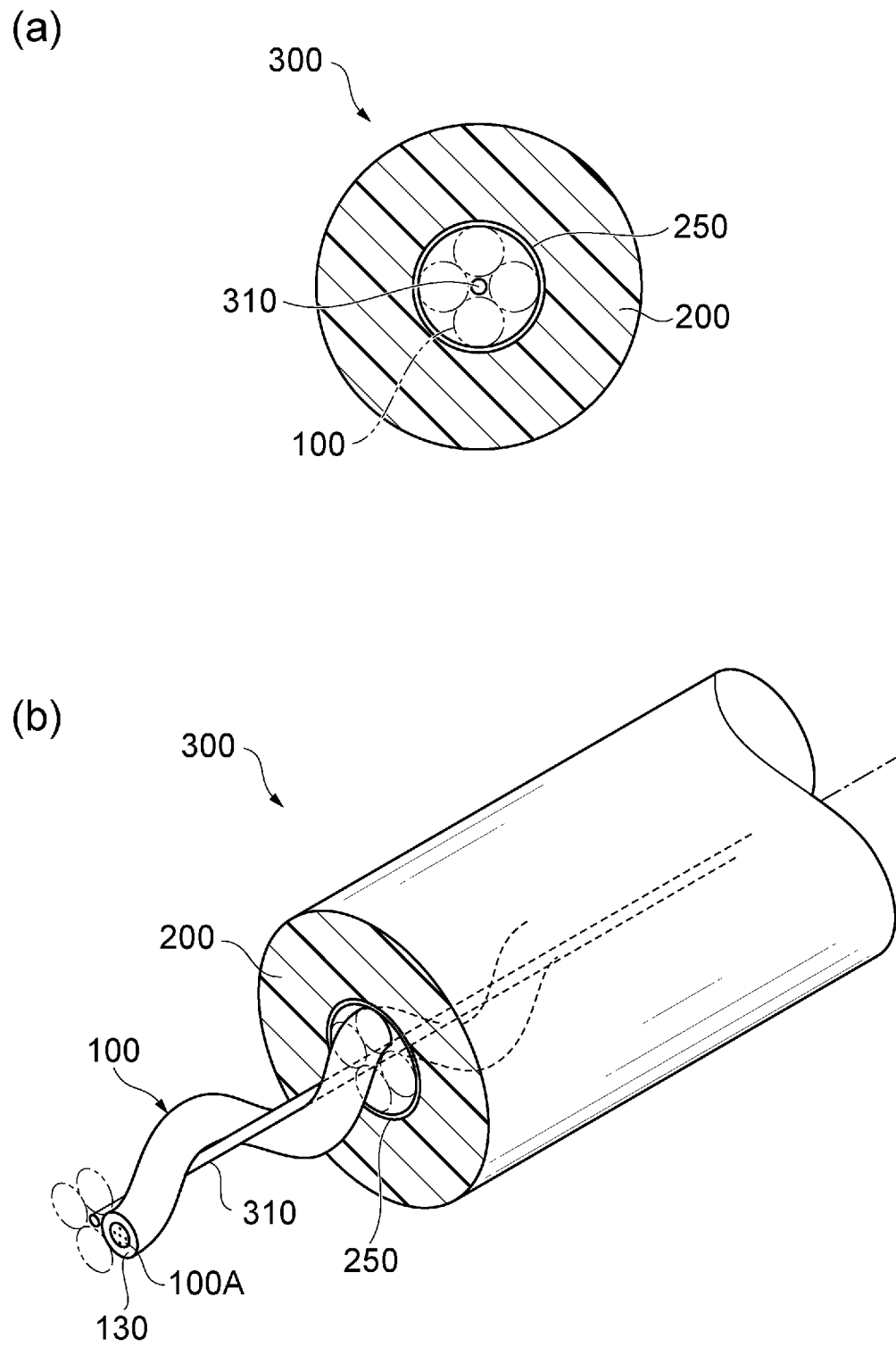
[図4]



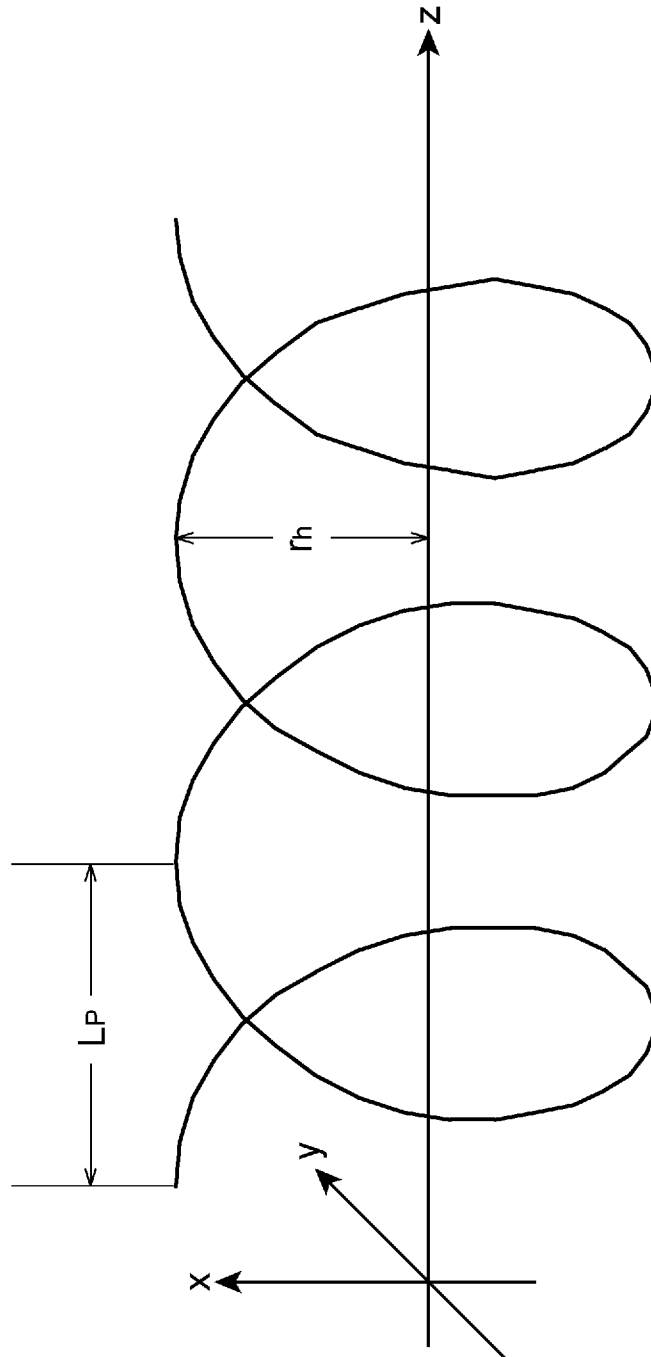
[図5]



[図6]



[図7]



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/061940

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B6/04(2006.01)i, G02B6/02(2006.01)i, G02B6/44(2006.01)i, H04B10/2581(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)

G02B6/02-6/08, G02B6/44, H04B10/2581

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	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

IEEE Xplore, JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2011-237782 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 24 November 2011 (24.11.2011), paragraphs [0026], [0027], [0043], [0044], [0063], [0064], [0069], [0070]; fig. 1 to 3, 10 & US 2011/0249940 A1 & EP 2378328 A1 & CN 102221730 A	1-7 8-13 14-18
Y	JP 2011-150133 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 04 August 2011 (04.08.2011), entire text; fig. 1 to 4 & US 2011/0206330 A1 & EP 2357501 A1 & CN 102135639 A	8

 Further documents are listed in the continuation of Box C. 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

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
17 May, 2013 (17.05.13)Date of mailing of the international search report  
28 May, 2013 (28.05.13)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/061940

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2010/038861 A1 (Yokohama National University), 08 April 2010 (08.04.2010), paragraphs [0061] to [0066]; fig. 6 & WO 2010/038863 A1 paragraphs [0055], [0056]; fig. 7 & US 2011/0188855 A1 & US 2011/0243517 A1 & EP 2336813 A1 & EP 2345915 A1 & CN 102203648 A & CN 102171596 A	8
Y	Yasuo KOKUBUN et al., "Proposal of Heterogeneous Uncoupled and Homogeneous Coupled Multicore Fibers for Space/Mode-Division Multiplexing", IEICE Technical Report, 23 July 2009 (23.07.2009), vol.109, no.159, pages 165 to 170 (OPE2009-60)	8
Y	JP 2011-197661 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 06 October 2011 (06.10.2011), claim 15; paragraphs [0024], [0069], [0092], [0106], [0138]; fig. 1 to 3, 10 to 12 & US 2011/0235983 A1 & EP 2365366 A2 & CN 102169217 A	9-13
Y	WO 2012/029721 A1 (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 08 March 2012 (08.03.2012), paragraphs [0113], [0127]; fig. 1 to 3, 17, 19 & US 2012/0230640 A1	9-13
A	JP 3-80281 B2 (Fujikura Electric Wire Corp.), 24 December 1991 (24.12.1991), entire text; fig. 1 to 3 & JP 61-141406 A	1-18
A	WO 2011/004836 A1 (Fujikura Ltd.), 13 January 2011 (13.01.2011), entire text; fig. 1 to 6 & US 2012/0163801 A1 & EP 2453600 A1	14-18

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））  
 Int.Cl. G02B6/04(2006.01)i, G02B6/02(2006.01)i, G02B6/44(2006.01)i, H04B10/2581(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. G02B6/02-6/08, G02B6/44, H04B10/2581

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 1971-2013年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2013年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2013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）  
 IEEE Xplore, JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

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
X Y A	JP 2011-237782 A（住友電気工業株式会社）2011.11.24, 段落【0026】， 【0027】，【0043】，【0044】，【0063】，【0064】，【0069】，【0070】， 第1-3,10 図 & US 2011/0249940 A1 & EP 2378328 A1 & CN 102221730 A	1-7 8-13 14-18
Y	JP 2011-150133 A（住友電気工業株式会社）2011.08.04, 全文, 第1-4 図 & US 2011/0206330 A1 & EP 2357501 A1 & CN 102135639 A	8

C欄の続きにも文献が列挙されている。  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	の日の後に公表された文献
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの	「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
「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	「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
「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）	「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
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献	「&」同一パテントファミリー文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	

国際調査を完了した日 17.05.2013	国際調査報告の発送日 28.05.2013
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） ▲高▼ 芳徳 電話番号 03-3581-1101 内線 3294

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
Y	WO 2010/038861 A1 (国立大学法人 横浜国立大学) 2010. 04. 08, 段落[0061]-[0066], 第6図 & WO 2010/038863 A1 段落[0055], [0056], 第7図 & US 2011/0188855 A1 & US 2011/0243517 A1 & EP 2336813 A1 & EP 2345915 A1 & CN 102203648 A & CN 102171596 A	8
Y	國分 泰雄 他, 空間多重・モード多重伝送へ向けた異種非結合および同種 結合マルチコアファイバの提案, 電子情報通信学会技術研究報告, 2009. 07. 23, Vol. 109, No. 159, p. 165-170 (OPE2009-60)	8
Y	JP 2011-197661 A (住友電気工業株式会社) 2011. 10. 06, 請求項 15, 段落【0024】, 【0069】, 【0092】, 【0106】, 【0138】, 第1-3, 10-12図 & US 2011/0235983 A1 & EP 2365366 A2 & CN 102169217 A	9-13
Y	WO 2012/029721 A1 (住友電気工業株式会社) 2012. 03. 08, 段落[0113], [0127], 第1-3, 17, 19図 & US 2012/0230640 A1	9-13
A	JP 3-80281 B2 (藤倉電線株式会社) 1991. 12. 24, 全文, 第1-3図 & JP 61-141406 A	1-18
A	WO 2011/004836 A1 (株式会社フジクラ) 2011. 01. 13, 全文, 第1-6図 & US 2012/0163801 A1 & EP 2453600 A1	14-18