



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104321673 B

(45)授权公告日 2018.04.03

(21)申请号 201380021846.7

(72)发明人 林哲也

(22)申请日 2013.04.23

(74)专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司 11112

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104321673 A

代理人 顾红霞 何胜勇

(43)申请公布日 2015.01.28

(51)Int.Cl.

(30)优先权数据

G02B 6/04(2006.01)

2012-101254 2012.04.26 JP

G02B 6/02(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.10.24

G02B 6/44(2006.01)

H04B 10/2581(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/JP2013/061940 2013.04.23

(56)对比文件

(87)PCT国际申请的公布数据
W02013/161825 JA 2013.10.31

CN 1402029 A, 2003.03.12,

CN 1431533 A, 2003.07.23,

CN 101782669 A, 2010.07.21,

CN 102221730 A1, 2011.10.19,

US 2011129190 A1, 2011.06.02,

(73)专利权人 住友电气工业株式会社
地址 日本大阪府

审查员 郭凯

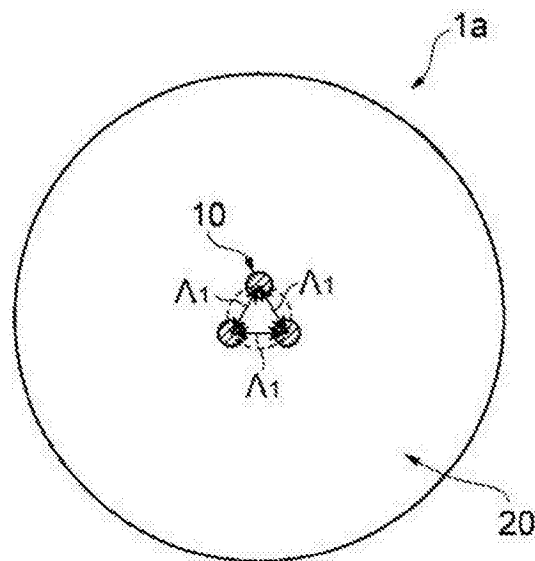
权利要求书3页 说明书20页 附图5页

(54)发明名称

多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统

(57)摘要

本发明公开一种能够有效使用MIMO技术进行计算的多芯光纤。多芯光纤具有多个芯部和包层,芯部围绕光纤轴线旋转。由平均加捻率(γ (rad/m))、芯部中心之间的最短距离(Λ (m))、群折射率(n_g)、使用中弯曲半径(R (m))、真空中的光速(c (m/s))及圆周长对直径的比 π 定义的条件式例如为 $7.91 \times 10^{-12} (\text{s/m}^{1/2})$ 以下。



1. 一种多芯光纤, 包括: 多个芯部, 每个所述芯部均沿预定轴线延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上; 以及包层区域, 其一体地围绕每个所述芯部,

其中最邻近的芯部之间的串扰不小于-15dB, 并且

所述多个芯部围绕所述预定轴线旋转, 并且

当每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为以rad/m为单位的平均加捻率 γ , 各所述芯部的中心之间的最短距离为以m为单位的 Λ , 每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g , 使用中的所述多芯光纤的弯曲半径定义为以m为单位的使用中弯曲半径R, 真空中的光速为以m/s为单位的c并且圆周长对直径的比为 π 时,

所述多芯光纤满足第一条件到第三条件中的至少一个条件,

所述第一条件定义为[通过用芯部间差分群延迟的均方根 σ_τ 除以所述多芯光纤的长度L的平方根所获得的值 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的以ps/km $^{1/2}$ 为单位的上设定值: 与 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的上设定值对应的下面的式(1)的以s/m $^{1/2}$ 为单位的上设定值]的关系为 $[5.0:1.58 \times 10^{-13}]$ 、 $[2.5:7.91 \times 10^{-14}]$ 和 $[1.0:3.16 \times 10^{-14}]$ 中的一个关系,

所述第二条件定义为在R=1m时的[通过用芯部间差分群延迟的均方根 σ_τ 除以所述多芯光纤的长度L的平方根所获得的值 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的以ps/km $^{1/2}$ 为单位的上设定值: 与 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的上设定值对应的下面的式(2)的以s/m $^{1/2}$ 为单位的上设定值]的关系为 $[5.0:1.58 \times 10^{-13}]$ 、 $[2.5:7.91 \times 10^{-14}]$ 、 $[1.0:3.16 \times 10^{-14}]$ 和 $[0.5:1.58 \times 10^{-14}]$ 中的一个关系, 并且所述使用中弯曲半径R为1m以上,

所述第三条件定义为在R=0.2m时的[通过用芯部间差分群延迟的均方根 σ_τ 除以所述多芯光纤的长度L的平方根所获得的值 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的以ps/km $^{1/2}$ 为单位的上设定值: 与 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的上设定值对应的下面的式(2)的以s/m $^{1/2}$ 为单位的上设定值]的关系为 $[5.0:3.16 \times 10^{-14}]$ 、 $[2.5:1.58 \times 10^{-14}]$ 、 $[1.0:6.32 \times 10^{-15}]$ 和 $[0.5:3.16 \times 10^{-15}]$ 中的一个关系, 并且所述使用中弯曲半径R为0.2m以上,

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

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

2. 根据权利要求1所述的多芯光纤, 其中所述多芯光纤满足所述第一条件, 并且所述使用中弯曲半径R不小于1m。

3. 根据权利要求1所述的多芯光纤, 其中所述多芯光纤满足所述第一条件, 并且所述使用中弯曲半径R不小于0.2m。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的多芯光纤, 包括:

至少一个芯部组, 其由多个芯部构成, 所述多个芯部在所述多个芯部的横截面中以相等间距布置在同一圆的圆周上,

其中属于所述芯部组的芯部均具有相同的构造,

属于所述芯部组的芯部中的相邻芯部之间的串扰不小于-15dB, 并且

当所述多个芯部构成多个芯部组时, 所述芯部组彼此充分分开以使所述芯部组之间的串扰不大于-15dB。

5. 根据权利要求4所述的多芯光纤, 其中当所述多个芯部构成所述多个芯部组时, 属于所有所述芯部组的芯部布置在多个同心圆的任一圆的圆周上。

6. 一种内置有多芯光纤的多芯光纤缆线, 所述多芯光纤包括: 多个芯部, 每个所述芯部均沿预定轴线延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上; 以及包层区域, 其一体地围绕每个所述芯部,

其中所述多个芯部围绕所述预定轴线旋转, 并且

当每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为以rad/m为单位的平均加捻率 γ , 各所述芯部的中心之间的最短距离为以m为单位的 Λ , 每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g , 使用中的所述多芯光纤的弯曲半径定义为以m为单位的使用中弯曲半径R, 真空中的光速为以m/s为单位的c并且圆周长对直径的比为 π 时,

所述多芯光纤是内置的并同时保持如下的状态: [通过用芯部间差分群延迟的均方根 σ_τ 除以所述多芯光纤的长度L的平方根所获得的值 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的以ps/km $^{1/2}$ 为单位的上设定值: 与 $\sigma_\tau/L^{1/2}$ 的上设定值对应的下面的式(3)的以s/m $^{1/2}$ 为单位的上设定值]的关系为[5.0:1.58 $\times 10^{-13}$]、[2.5:7.91 $\times 10^{-14}$]、[1.0:3.16 $\times 10^{-14}$]和[0.5:1.58 $\times 10^{-14}$]中的一个关系,

$$\text{式(3)} \frac{2n_g\Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}}。$$

7. 根据权利要求6所述的多芯光纤缆线, 其中所述多芯光纤是内置的从而弯曲半径沿所述纵向的平均值不小于0.2m。

8. 根据权利要求7所述的多芯光纤缆线, 其中所述多芯光纤内置成使得沿纵向的平均弯曲半径为2.0m以下。

9. 根据权利要求6至8中任一项所述的多芯光纤缆线, 其中所述最短距离 Λ 不大于 25×10^{-6} m。

10. 根据权利要求6至8中任一项所述的多芯光纤缆线, 其中所述多个芯部之中最邻近的芯部之间的串扰不小于-15dB。

11. 一种使用多芯光纤作为传输线路的多芯光纤传输系统, 所述多芯光纤包括: 多个芯部, 每个所述芯部均沿预定轴线延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上; 以及包层区域, 其一体地围绕每个所述芯部,

其中当每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为以rad/m为单位的平均加捻率 γ , 各所述芯部的中心之间的最短距离为以m为单位的 Λ , 每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g , 所述多芯光纤的弯曲半径的沿纵向的平均值定义为以m为单位的纵向平均值R, 真空中的光速为以m/s为单位的c, 圆周长对直径的比为 π 并且信号调制的符号率为以Baud为单位的 f_{symbol} 时,

利用MIMO技术执行空间多路分用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式(4)所定义的关系

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

12. 根据权利要求11所述的多芯光纤传输系统, 其中所述最短距离 Λ 不大于 25×10^{-6} m。

13. 一种多芯光纤传输系统, 其使用权利要求1至5中任一项所述的多芯光纤作为传输

线路,

其中当发射机和接收机之间的光纤连接长度为以m为单位的L并且信号调制的符号率为以Baud为单位的 f_{symbol} 时,

利用MIMO技术执行空间多路分用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式(5)所定义的关系

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

14. 一种多芯光纤传输系统,其使用权利要求6至10中任一项所述的多芯光纤缆线作为传输线路,

其中当发射机和接收机之间的光纤连接长度为以m为单位的L并且信号调制的符号率为以Baud为单位的 f_{symbol} 时,

利用MIMO技术执行空间多路分用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式(6)所定义的关系

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

15. 根据权利要求11至13中任一项所述的多芯光纤传输系统,其中所述多个芯部之中最邻近的芯部之间的串扰不小于-15dB。

多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统

技术领域

[0001] 本发明涉及多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统。

背景技术

[0002] 使用芯部加捻 (core twisting) 技术来减少光纤内的偏振模色散 (PMD), 光纤构造用于以限制状态在沿预定轴线延伸的芯部内传输光。例如, 专利文献1示出了如下的构造: 在单芯光纤的光纤拉制过程中, 捻制 (或旋转) 处于熔融状态的玻璃以将由芯部的非圆性或非圆对称性产生的残余应力的影响随机化, 以使得在任何特定方向上均不存在偏差, 从而减少光纤自身产生的PMD。专利文献2示出了如下的构造: 玻璃固化后, 捻制单芯光纤以将由诸如光纤弯曲、侧向压力等光纤外部因素产生的PMD减少。

[0003] 同样也有涉及多芯光纤的芯部加捻技术的研究。例如, 非专利文献1表明了通过减少芯部之间的串扰来抑制信号间干涉的非耦合型多芯光纤中, 串扰的幅值 (统计平均值) 至少与光纤的捻度无关。此外, 非专利文献2示出了如下仿真结果: 该结果指示了当精确控制每单位长度加捻率 (twist rate) 并以大约100转/m的恒定短节距对光纤加捻时, 非耦合型多芯光纤的芯部间串扰的显著降低的可能性。

[0004] 引用列表

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1: 日本专利No.2981088

[0007] 专利文献2: 国际公开W02009/107667

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献1: T.Hayashi等人, “Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend (由于光纤弯曲造成的多芯光纤的串扰变化),” ECOC2010, We.8.F.6

[0010] 非专利文献2: J.M.Fini等人, “Crosstalk in multicore fibers with randomness: gradual drift vs. short-length variations (具有随机性的多芯光纤中的串扰: 逐渐漂移对短距离变化),” Optics Express, vol.20, no.20, pp.949-959

[0011] 非专利文献3: R.Ryf等人, “Space-division Multiplexed Transmission over 4200-km 3-Core Microstructured Fiber (在4200km的3芯微结构光纤上的空分复用传输),” OFC/NFoEC2012paper PDP5C.2, March 8, 2012

发明内容

[0012] 本发明要解决的问题

[0013] 本发明的发明人调查了常规的多芯光纤并发现了以下问题。具体地说, 近年来, 利用MIMO (多输入多输出) 技术补偿空间模之间的串扰的空分复用传输技术已得到应用。然而, 空分复用传输技术存在如下问题: 因为空间模之间存在大的差分群延迟 (空间模间DGD), 利用MIMO技术进行串扰补偿的计算 (MIMO计算) 负荷大。非专利文献3描述了利用耦合多芯光纤 (芯部间具有高串扰的多芯光纤) 传输信号并通过MIMO技术将因串扰混合的各个

芯部的信号多路分用及解码的技术。

[0014] 与之相比,已知的是在空分复用传输中应用的耦合多芯光纤中,通过加强对各芯部的光的限制或增加芯部节距减少了超模间的DGD,然而对个体芯部的空间模之间的DGD(芯部间DGD)的研究并不总是充分的,因此也没有对芯部加捻(旋转或加捻)对芯部间DGD的影响进行过很好的研究;因此难以选择优选的多芯光纤用于MIMO技术。

[0015] 本发明为了解决上述问题而完成,并且本发明旨在提供能够有效利用MIMO技术进行计算的多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统。

[0016] 解决问题的方案

[0017] 作为第一方面,根据本发明的实施例的多芯光纤包括:多个芯部,每个所述芯部均沿预定轴线(沿所述多芯光纤的纵向延伸的轴线)延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上;以及包层区域,其一体地围绕每个所述芯部,所述多个芯部围绕所述预定轴线呈螺旋形状旋转。当所述多芯光纤的每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为平均加捻率 γ (rad/m),各所述芯部的中心之间的最短距离为 Λ (m),每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g ,使用中的所述多芯光纤的弯曲半径定义为使用中弯曲半径 R (m),真空中的光速为 c (m/s)并且圆周长对直径的比为 π 时,根据第一方面的该多芯光纤满足下面定义的第一条件到第三条件中的至少任一个条件并满足下面定义的第二条件和第五条件中的至少任一个条件。

[0018] 所述第一条件定义为下面的式(1)不大于 7.91×10^{-12} (s/m^{1/2})。所述第二条件定义为在所述多芯光纤缠绕在半径为 R_{bobbin} (m)的线轴上的状态下,下面的式(2)不大于 $7.91 \times 10^{-12} \times 1/R_{\text{bobbin}}$ (s/m^{1/2})。所述第三条件定义为所述最短距离 Λ 不大于大约 25×10^{-6} m且所述平均加捻率 γ (rad/m)不小于大约4.72 rad/m。所述第四条件定义为所述最短距离 Λ 不大于大约 25×10^{-6} m。所述第五条件定义为最邻近的芯部之间的串扰不小于-15 dB。

[0019] 式(1)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}}$$

[0020] 式(2)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR_{\text{bobbin}}\sqrt{\gamma\pi}}$$

[0021] 适用于第一方面的第二方面优选为所述多芯光纤,其中,在所述多芯光纤缠绕在半径为 R_{bobbin} (m)的所述线轴上的状态下,所述式(2)不大于 $7.91 \times 10^{-12} \times 0.2/R_{\text{bobbin}}$ (s/m^{1/2})。适用于第一和第二方面中至少任一方面的第三方面优选为所述多芯光纤,其中,所述第一条件定义为所述式(1)不大于 1.58×10^{-13} (s/m^{1/2}),并且所述第二条件定义为在所述多芯光纤缠绕在半径为 R_{bobbin} (m)的所述线轴上的状态下,所述式(2)不大于 $1.58 \times 10^{-13} \times 1/R_{\text{bobbin}}$ (s/m^{1/2}),所述多芯光纤满足所述第一条件和所述第二条件中的至少任一个条件。适用于第一至第三方面中至少任一方面的第四方面优选为所述多芯光纤,其中,在所述多芯光纤缠绕在半径为 R_{bobbin} (m)的所述线轴上的状态下,所述式(2)不大于 $1.58 \times 10^{-13} \times 0.2/R_{\text{bobbin}}$ (s/m^{1/2})。适用于第一和第四方面中至少任一方面的第五方面优选为所述多芯光纤,其中,所述使用中弯曲半径 R 不小于1 m。适用于第一和第五方面中至少任一方面的第六方面优选为所述多芯光纤,其中,所述使用中弯曲半径 R 不小于0.2 m。

[0022] 此外,适用于第一和第六方面中至少任一方面的第七方面为所述多芯光纤,所述

多芯光纤可以包括：至少一个芯部组，其由多个芯部构成，所述多个芯部在所述多个芯部的横截面中以相等间距布置在同一圆的圆周上。在该情况下，优选地，属于所述芯部组的芯部均具有相同的构造，属于所述芯部组的芯部中的相邻芯部之间的串扰不小于-15dB。此外，所述多芯光纤可以包括由所述多个芯部构成的多个芯部组，在布置有多个芯部组的该构造中，所述芯部组彼此充分分开以使所述芯部组之间的串扰不大于-15dB。适用于第一和第七方面中至少任一方面的第八方面优选为所述多芯光纤，其中，当所述多个芯部构成多个芯部组时，属于所有所述芯部组的芯部布置在多个同心圆的任一圆的圆周上。

[0023] 作为第九方面，根据本发明实施例的内置有多芯光纤的多芯光纤缆线，所述多芯光纤包括：多个芯部，每个所述芯部均沿预定轴线延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上；以及包层区域，其一体地围绕每个所述芯部，所述多个芯部围绕所述预定轴线旋转。在根据第九方面的该多芯光纤中，当所述多芯光纤的每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为平均加捻率 γ (rad/m)，各所述芯部的中心之间的最短距离为 Λ (m)，每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g ，使用中的所述多芯光纤的弯曲半径定义为使用中弯曲半径 R (m)，真空中的光速为 c (m/s) 并且圆周长对直径的比为 π 时，所述多芯光纤是内置的并同时保持下面的式 (3) 不大于 7.91×10^{-12} (s/m^{1/2}) 的状态。

[0024] 式 (3)
$$\frac{2n_g\Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}}$$

[0025] 适用于第九方面的第十方面为所述多芯光纤，其中，所述多芯光纤是内置的并同时保持所述式 (3) 不大于 1.58×10^{-13} (s/m^{1/2}) 的状态。适用于第九和第十方面中至少任一方面的第十一方面优选为所述多芯光纤，其中，所述多芯光纤是内置的从而弯曲半径沿所述纵向的平均值不小于 0.2m。适用于第九至第十一方面中至少任一方面的第十一方面优选为所述多芯光纤，其中，所述最短距离 Λ 不大于 25×10^{-6} m。适用于第九至第十二方面中至少任一方面的第十三方面优选为所述多芯光纤，其中，所述多个芯部之中最邻近的芯部之间的串扰不小于-15dB。

[0026] 作为第十四方面，根据本发明实施例的使用多芯光纤作为传输线路的多芯光纤传输系统，所述多芯光纤包括：多个芯部，每个所述芯部均沿预定轴线延伸并排列在垂直于所述预定轴线的横截面上；以及包层区域，其一体地围绕每个所述芯部。在根据第十四方面的多芯光纤传输系统中，当所述多芯光纤的每单位长度上所述芯部的旋转角度的绝对值沿所述多芯光纤的纵向的平均值定义为平均加捻率 γ (rad/m)，各所述芯部的中心之间的最短距离为 Λ (m)，每个所述芯部中基模的群折射率为 n_g ，所述多芯光纤的弯曲半径的沿纵向的平均值定义为纵向平均值 R (m)，真空中的光速为 c (m/s)，圆周长对直径的比为 π 并且信号调制的符号率为 f_{symbol} (Baud) 时，利用MIMO技术执行空间多路分用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式 (4) 所定义的关系。

[0027] 式 (4)
$$\frac{N_{\text{tap}}}{12f_{\text{symbol}}} \leq 2 \frac{n_g\Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8f_{\text{symbol}}}$$

[0028] 适用于第十四方面的第十五方面优选为所述多芯光纤传输系统，其中，所述最短距离 Λ 不大于 25×10^{-6} m。

[0029] 作为第十六方面，根据本发明实施例的多芯光纤可以使用根据第一至第八方面中

至少任一方面的多芯光纤作为传输线路。在该情况下,根据第十六方面的多芯光纤传输系统优选为所述系统,其中,当发射机和接收机之间的光纤连接长度为L(m)并且信号调制的符号率为 f_{symbol} (Baud)时,利用MIMO技术执行空间多路复用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式(5)所定义的关系。

$$[0030] \quad \text{式(5)} \quad 8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L}$$

[0031] 此外,作为第十七方面,根据本发明实施例的多芯光纤传输系统可以使用第九至第十三方面中至少任一方面的多芯光纤缆线作为传输线路。在该情况下,根据第十七方面的多芯光纤优选为所述多芯光纤,其中,当发射机和接收机之间的光纤连接长度为L(m)并且信号调制的符号率为 f_{symbol} (Baud)时,利用MIMO技术执行空间多路复用计算的过程中的抽头数量 N_{tap} 设定为满足下面的式(6)所定义的关系。

$$[0032] \quad \text{式(6)} \quad 8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{\text{tap}}}{f_{\text{symbol}}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L}$$

[0033] 此外,适用于第十四至第十七方面中至少任一方面的第十八方面优选为所述多芯光纤传输系统,其中,所述多个芯部之中最邻近的芯部之间的串扰不小于-15dB。

[0034] 本发明的效果

[0035] 本发明提供了能够有效利用MIMO技术进行计算的多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统。

附图说明

[0036] 图1是显示根据本发明的实施例的多芯光纤中的芯部布置方式的第一实例的横截面图并且是显示多芯光纤缠绕在线轴上的状态的透视图。

[0037] 图2是显示根据本发明的实施例的多芯光纤中的芯部布置方式的第二实例的剖视图。

[0038] 图3是显示根据本发明的实施例的多芯光纤中的芯部布置方式的第三实例的剖视图。

[0039] 图4是显示根据本发明的实施例的多芯光纤构造的剖视图。

[0040] 图5是显示根据本发明的实施例的多芯光纤的另一种构造的剖视图。

[0041] 图6是显示根据本发明的实施例的多芯光纤缆线的实例的视图。

[0042] 图7是显示螺旋线的半径 r_h 和螺距 L_p 之间的关系的视图。

具体实施方式

[0043] 下面将参考附图详细描述本发明的实施例。在附图的说明中相同的附图标记指代相同的部件,不再进行重复说明。

[0044] 下面将首先描述MIMO(多输入多输出)技术中的芯部间DGD的幅值的影响,然后描述根据本发明实施例的多芯光纤和其他事项。

[0045] 在MIMO技术中,补偿空间模之间的串扰并实现空分复用(芯部多分复用/模多分复用)传输的技术是众所周知的,但因计算复杂度高,尚未实现实时处理。具体地说,当空间模

间的差分群延迟(芯部间DGD)变大时,执行MIMO计算的计算复杂度也需要与芯部间DGD的幅值成比例地增加。例如,当不存在DGD时,利用MIMO技术将M通道的混合信号 $(x_1, \dots, x_M)$ 多路分用为原始信号 $(y_1, \dots, y_M)$ 的计算被简化为下述式(7)。

$$[0046] \quad \text{式(7)} \quad \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & \dots & b_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1} & \dots & b_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{pmatrix}$$

[0047] 在式(7)所示的矩阵计算中,计算复杂度与M的平方成比例。光纤中的M通道数量是空间模数量和偏振模数量的乘积。例如,在每个芯部都在单模下操作的多芯光纤(MCF)的情况下,M通道的数量是芯部数量的两倍。在另一方面,在存在DGD的情况下,需要进行使用有限冲击响应(FIR)滤波器的计算,并且由下述式(8)表示用MIMO技术将混合信号x多路分用为原始信号的计算,其中用 $y[n]$ 和 $x[n]$ 作为各自的信号串。

$$[0048] \quad \text{式(8)} \quad \begin{pmatrix} y_1[n] \\ \vdots \\ y_M[n] \end{pmatrix} = \sum_{l=0}^N \begin{pmatrix} b_{11}[l] & \dots & b_{1M}[l] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1}[l] & \dots & b_{MM}[l] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1[n-l] \\ \vdots \\ x_M[n-l] \end{pmatrix}$$

[0049] 在这种情况下,由于多路分用为 $y[n]$ 所需的信号因DGD的缘故分布在 $x[n-N]$ 到 $x[n]$ 的范围,所以计算复杂度变为式(7)中的计算复杂度的 $(N+1)$ 倍。

[0050] 在此, $(N+1)$ 通常称为抽头(tap)的数量 N_{tap} ,并且抽头数量越少,计算复杂度就越低。如果DGD小,接收信号在时间轴上的扩展将会变小,以减少抽头数量。当符号率(每单位时间调制符号的数量)小时,即使接收信号在时间轴上的扩展是恒定的,每单位时间信号采用的数量也是小的,并且因此抽头数量可以减少。然而,符号率优选设置为尽可能大,以增加传输信号的速度。

[0051] 因此,在执行使用MIMO技术的计算期间,期望空间模之间的DGD尽可能小,并且关于多模的光纤,报告有一些用于减少DGD的技术。在另一方面,已知耦合多芯光纤中的超模之间的DGD可以通过加强对各芯部中的光的限制或增加芯部节距来减少。然而,个体芯部的空间模之间的DGD(芯部间DGD)此前没有得到充分研究,并且也不清楚光纤的旋转或加捻会怎样影响到芯部间DGD。

[0052] 下面将会说明关于上述问题的研究结果。值得注意的是,当下面的说明涉及应用芯部间串扰的数值的讨论时,数值是指“串扰的统计分布的平均值”。例如,在芯部m和芯部n之间串扰的统计分布的平均值 X_T 的情况下,使用定义为 $X_T = P_{nm}/P_{mm}$ 的数值。在这种关系中, P_{nm} 是指当光入射到芯部m时来自芯部n的输出光功率的统计平均值。

[0053] 首先,为简单起见在2-芯部光纤到情况下,考虑耦合MCF的芯部间DGD的分布。

[0054] 首先,根据非专利文献1,基于光纤的芯部位置,光纤的弯曲导致各芯部的弯曲半径产生非常细微的差异,并因此还导致各芯部的的光路产生差异。为了将其作为直波导处理,需要使用等效折射率。等效折射率通过将实际折射率乘以 $(1+x/R)$ 获得。这里的参数R是作为基准的芯部的弯曲半径,x是在弯曲方向上与基准芯部的偏差量。因此,MCF中的每一个芯部基于MCF的弯曲或加捻都可以具有不同的等效折射率。

[0055] 由于根据非专利文献2得知,MCF的芯部m和芯部n之间的串扰、或能量交换主要发生在芯部m和芯部n的等效折射率相等的相位匹配点,MCF中的串扰可以建模为仅离散地在

相位匹配点发生的芯部间能量交换。

[0056] 此时,为简单起见假定相位匹配点在MCF中以相等间距存在,并且在每个相位匹配点处芯部m中的一半能量传递到芯部n,而芯部n中的一半能量传递到芯部m,考虑DGD随着光纤长度的变化。

[0057] 当芯部m和芯部n的群折射率分别由 $n_{g,m}$ 和 $n_{g,n}$ 表示并且芯部m和芯部n之间的中点定义为基准时,考虑到弯曲和加捻,芯部m的等效群折射率可以用下述式(9)表示,并且芯部n的等效群折射率可以用下述式(10)表示。在这些公式中, Λ 代表芯部m中心与芯部n中心之间的距离(芯部节距), θ 代表从“芯部m和芯部n之间的中点”看到的“芯部m”在MCF的横截面上的位置相对于弯曲半径方向的角度(rad)。

[0058] 式(9)
$$n_{g,eq,m} = n_{g,m} \left(1 + \frac{\Lambda}{2R(z)} \cos \theta(z) \right)$$

[0059] 式(10)
$$n_{g,eq,n} = n_{g,n} \left(1 - \frac{\Lambda}{2R(z)} \cos \theta(z) \right)$$

[0060] 为简单起见,在此考虑MCF以恒定加捻率 γ (rad/单位长度)加捻的情况。于是 θ 可由下述式(11)表示。

[0061] 式(11)
$$\theta(z) = \gamma z$$

[0062] 考虑到前述式(9)到式(11),某两个邻近的相位匹配点之间的一个区间(长度为 π/γ)被认为落入下述式(12)的范围内。

[0063] 式(12)
$$\frac{\pi}{2\gamma} \leq z \leq \frac{3\pi}{2\gamma}$$

[0064] 与此同时,为简单起见假定 R 恒定,通过使光穿过芯部m而在式(12)的一个区间内观察到的平均等效群折射率是将下面的式(13)的值与实际群折射率 $n_{g,m}$ 相加而得到的值。

[0065] 式(13)
$$\begin{aligned} \delta n_{g,eq,m} &= \frac{1}{\pi/\gamma} \int_{\frac{\pi}{2\gamma}}^{\frac{3\pi}{2\gamma}} \left[n_{g,m} \left(1 + \frac{\Lambda}{2R} \cos \gamma z \right) - n_{g,m} \right] dz \\ &= -\frac{n_{g,m} \Lambda}{\pi R} \end{aligned}$$

[0066] 类似地,通过使光穿过芯部n而观察到的平均等效群折射率是将下面的式(14)的值与实际群折射率 $n_{g,n}$ 相加而得到的值。

[0067] 式(14)

[0068]
$$\begin{aligned} \delta n_{g,eq,n} &= \frac{1}{\pi/\gamma} \int_{\frac{\pi}{2\gamma}}^{\frac{3\pi}{2\gamma}} \left[n_{g,n} \left(1 - \frac{\Lambda}{2R} \cos \gamma z \right) - n_{g,n} \right] dz \\ &= \frac{n_{g,n} \Lambda}{\pi R} \end{aligned}$$

[0069] 在与式(12)的区间邻近的区间中,通过使光束穿过各芯部而观察到的平均等效群折射率具有如下的值:将得自式(13)和(14)的具有相反符号的值与各自的实际群折射率相

加得到的值。

[0070] 因两个相邻相位匹配点之间的一个区间的长度可以由下述式 (15) 表示, 穿过芯部m的光及穿过芯部n的光的群延迟在两个相邻相位匹配点之间的单位区间上显示出由下面的式 (16a) 和式 (16b) 的变化 (两者符号一致)。在公式中, c代表光在真空中的速度。

[0071] 式 (15)
$$L_c = \frac{\pi}{\gamma}$$

[0072] 式 (16a)
$$\tau_m = \frac{L_c}{c / (n_{g,m} + \delta n_{g,eq,m})} = n_{g,m} \left(1 \mp \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right)$$

[0073] 式 (16b)
$$\tau_n = \frac{L_c}{c / (n_{g,n} + \delta n_{g,eq,n})} = n_{g,n} \left(1 \mp \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right)$$

[0074] 因此, 芯部m及芯部n之间的差分群延迟具有由下面的式 (17) 表示的值。

[0075] 式 (17)
$$\delta\tau = |\tau_m - \tau_n| = \left| (n_{g,m} - n_{g,n}) \mp (n_{g,m} + n_{g,n}) \frac{\Lambda}{c\gamma R} \right|$$

[0076] 为了减小由上述式 (17) 表示的芯部之间的差分群延迟, 首先优选的是 $n_{g,m} = n_{g,n}$ 。为了满足 $n_{g,m} = n_{g,n}$ 的条件, 芯部m及芯部n优选地具有同样的构造。

[0077] 出于更详细地考虑, 某个芯部的某模式的群折射率由下面的式 (18) 来表示, 其中 β 为该模式的传播常数, ω 为光的角频率, 并且该模式的传播常数 β 受周边芯部的影响。

[0078] 式 (18)
$$n_g = c \frac{d\beta}{d\omega}$$

[0079] 对于以如此高的串扰进行耦合以至于需要利用MIMO计算进行串扰补偿以使各芯部的模式具有相等的传播常数和相等的群折射率的多个耦合芯部, 期望的是以高串扰进行耦合的多个芯部具有相同的构造并且其他芯部相对于各芯部的布局 (constellation) 是相同的。更具体地说, 图1、图2及图3显示了在包层20中布置有多个芯部10的多芯光纤1a到1c的横截面构造及其他方面。即, 相邻芯部间具有高串扰 (例如-15dB以上) 的优选芯部布局如同图1中 (a) 所示多芯光纤1a一样使芯部10以相等间距 (芯部间距 Λ_1) 布置在同一圆周上。图1中 (b) 显示缠绕在线轴30 (沿其中心轴线AX具有半径 R_{bobbin} (m) 的筒体) 上的多芯光纤1a的状态, 线轴30上卷绕有多芯光纤1a。图1中 (c) 显示使用多芯光纤1a作为传输线路的多芯光纤传输系统。发射机111光学连接到此多芯光纤1a的一端而接收机112连接到多芯光纤1a的另一端。下述的多种多芯光纤均可缠绕在线轴30上。如同图2所示的多芯光纤1b, 另一个优选芯部布局如下: 有多个芯部组, 在每个芯部组中多个芯部10以相等间距布置在同一圆周上 (图2的实例包括芯部10的三个芯部组, 芯部10分别以芯部间距 Λ_1 、 Λ_2 和 Λ_3 布置); 每个芯部组中的芯部10在芯部组中具有相同的布局; 每个芯部组的相邻芯部间的串扰不小于-15dB。在这种布局中, 芯部组优选地彼此充分分开, 以使芯部组间的串扰不大于-15dB。当光纤有多个芯部组时, 为了平衡其他芯部组的芯部对某个芯部组内的芯部的传播常数的影响, 更优选的布局为“属于所有芯部组的芯部布置在多个同心圆上”, 如同图3所示的多芯光纤1c。具体地说, 在图3的实例中, 芯部节距为 Λ_1 的芯部10布置在内圆的圆周上, 芯部节距为 Λ_2 的芯部10布置在外圆的圆周上。芯部间距 Λ_1 到 Λ_3 由相邻芯部的中心之间的最短距离定义。这些多芯光纤1b、1c也可应用于图1中 (c) 所示多芯光纤传输系统的传输线路。

[0080] 假定 $n_g = n_{g,m} = n_{g,n}$, 两个相邻相位匹配点之间的一个区间内的差分群延迟的方差是由下面的式 (19) 表示的值, 在光纤长度为 L 时MCF内相位匹配点的数量 N 可以根据下面的式 (20) 计算出来。

$$[0081] \quad \text{式 (19)} \quad \sigma_{\tau c}^2 = \left(2 \frac{n_g \Lambda}{c \gamma R} \right)^2$$

$$[0082] \quad \text{式 (20)} \quad N = \frac{L}{L_c}$$

[0083] 考虑到上述相位匹配点间的群延迟及在相位匹配点的串扰 (芯部 m 与芯部 n 之间的能量转移), 在数量 N 充分大的情况下, 根据中央极限定理, MCF内每一个芯部的脉冲响应呈正态分布, 并且认为正态分布的方差 σ_τ^2 为 $\sigma_{\tau c}^2 N$ 。通过重新整理式 (15)、(19) 和 (20) 得到的正态分布的标准偏差表达为下面的式 (21)。

$$[0084] \quad \text{式 (21)} \quad \begin{aligned} \sigma_\tau &= \sqrt{\sigma_{\tau c}^2 N} \\ &= 2 \frac{n_g \Lambda}{c R} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \end{aligned}$$

[0085] 上述讨论基于 γ 恒定的情况, 但 γ 也可以被假定为光纤每单位长度圈数的绝对值在光纤纵向上的平均值。由于这里可以认为 σ_τ 是芯部间DGD的均方根, 所以应该理解到, 为了减少芯部间DGD, 优选的是芯部间距 Λ 尽可能小, 光纤的弯曲半径 R 尽可能大, 并且光纤的加捻率 γ 尽可能大。

[0086] 在使用根据本发明的实施例的MCF进行传输时, 由于芯部间串扰可以用MIMO技术补偿并且不需要增加芯部间距 Λ 以减少串扰, 例如, Λ 优选为不大于 $25\mu\text{m}$ 的短芯部节距, Λ 更优选为不大于 $20\mu\text{m}$ 的短芯部节距, Λ 更优选为不大于 $15\mu\text{m}$ 的短芯部节距, Λ 更优选为不大于 $10\mu\text{m}$ 的短芯部节距。

[0087] 例如, 为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率, 需要设置抽头的数量来覆盖时间轴上不少于 $4\sigma_\tau$ 的时间。此外, 为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率, 需要设置抽头的数量来覆盖时间轴上不少于 $6\sigma_\tau$ 的时间。

[0088] 当信号的采样率 (每单位时间的采样数量) 用 f_{sample} 表示时, 为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率, 需要设置抽头的数量不少于 $4\sigma_\tau f_{\text{sample}}$; 为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率, 需要设置抽头的数量在时间轴上不少于 $6\sigma_\tau f_{\text{sample}}$ 。

[0089] 由于需要设置 f_{sample} 的频率不小于符号率 f_{symbol} 的两倍, 为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率, 需要设置抽头的数量不少于 $8\sigma_\tau f_{\text{symbol}}$; 为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率, 需要将抽头的数量设置为在时间轴上不少于 $12\sigma_\tau f_{\text{symbol}}$ 。

[0090] 这意味着对于给定的期望符号率 f_{symbol} 和抽头数量 N_{tap} , 为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率, 需要满足下面的式 (22)。这也意味着为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率, 需要满足下面的式 (23)。

$$[0091] \quad \text{式 (22)} \quad \sigma_\tau \leq \frac{N_{\text{tap}}}{8 f_{\text{symbol}}}$$

[0092] 式(23)
$$\sigma_{\epsilon} \leq \frac{N_{tap}}{12f_{symbol}}$$

[0093] 通过重新整理上述式(21)到式(23),为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率,MCF优选地满足下面的式(24),并且为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率,MCF更优选地满足下面的式(25)。

[0094] 式(24)
$$2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{tap}}{8f_{symbol}}$$

[0095] 式(25)
$$2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{tap}}{12f_{symbol}}$$

[0096] 下述的表1显示了在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒)的情况下,对于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以下和50以下的抽头数量,期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (L / \gamma \pi)^{1/2}$ 且运用式(24)和式(25)得到的计算结果。

[0097] 表1

[0098]	N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
	500 以下	2.5×10^{-9} 以下	1.67×10^{-9} 以下
	450 以下	2.25×10^{-9} 以下	1.5×10^{-9} 以下
	400 以下	2.0×10^{-9} 以下	1.33×10^{-9} 以下
	350 以下	1.75×10^{-9} 以下	1.17×10^{-9} 以下
	300 以下	1.5×10^{-9} 以下	1.0×10^{-9} 以下
	250 以下	1.25×10^{-9} 以下	8.33×10^{-10} 以下
	200 以下	1.0×10^{-9} 以下	6.67×10^{-10} 以下
	150 以下	7.5×10^{-10} 以下	5.0×10^{-10} 以下
	100 以下	5.0×10^{-10} 以下	3.33×10^{-10} 以下
	50 以下	2.5×10^{-10} 以下	1.67×10^{-10} 以下

[0099] 当用L表示期望传输距离时,为了在MIMO计算中反映原始信号95.44%以上的功率,MCF优选地满足下面的式(26),并且为了在MIMO计算中反映原始信号99.74%以上的功率,MCF更优选地满足下面的式(27)。

[0100] 式(26)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma \pi}} \leq \frac{N_{tap}}{8f_{symbol}\sqrt{L}}$$

[0101] 式 (27)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{tap}}{12f_{symbol}\sqrt{L}}$$

[0102] 表2显示了在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=100\text{km}=1 \times 10^5\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式 (26) 和式 (27) 得到的计算结果。表3显示了在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=1000\text{km}=1 \times 10^6\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式 (26) 和式 (27) 得到的计算结果。表3显示了运用式 (19) 和式 (20) 得到的计算结果。即, MCF优选内置在光纤缆线中以具有适当的 Λ 值和 γ 值并保持适当的R, 使 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 满足表2或表3中的值。

[0103] 表2

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映 原始信号 95.44%以上的 功率	在 MIMO 计算中反映 原始信号 99.74%以上的 功率
500 以下	7.91×10^{-12} 以下	5.27×10^{-12} 以下
450 以下	7.12×10^{-12} 以下	4.74×10^{-12} 以下
400 以下	6.32×10^{-12} 以下	4.22×10^{-12} 以下
350 以下	5.53×10^{-12} 以下	3.69×10^{-12} 以下
300 以下	4.74×10^{-12} 以下	3.16×10^{-12} 以下
250 以下	3.95×10^{-12} 以下	2.64×10^{-12} 以下
200 以下	3.16×10^{-12} 以下	2.11×10^{-12} 以下
150 以下	2.37×10^{-12} 以下	1.58×10^{-12} 以下
100 以下	1.58×10^{-12} 以下	1.05×10^{-12} 以下
50 以下	7.91×10^{-13} 以下	5.27×10^{-13} 以下

[0105] 表3

[0106]

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
500 以下	2.5×10^{-12} 以下	1.67×10^{-12} 以下
450 以下	2.25×10^{-12} 以下	1.5×10^{-12} 以下
400 以下	2.0×10^{-12} 以下	1.33×10^{-12} 以下
350 以下	1.75×10^{-12} 以下	1.17×10^{-12} 以下
300 以下	1.5×10^{-12} 以下	1.0×10^{-12} 以下
250 以下	1.25×10^{-12} 以下	8.33×10^{-13} 以下
200 以下	1.0×10^{-12} 以下	6.67×10^{-13} 以下
150 以下	7.5×10^{-13} 以下	5.0×10^{-13} 以下
100 以下	5.0×10^{-13} 以下	3.33×10^{-13} 以下
50 以下	2.5×10^{-13} 以下	1.67×10^{-13} 以下

[0107] 表4显示了假定在内置到光纤缆线中并铺设后使用MCF时MCF的弯曲半径R为0.1m, 在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=100\text{km}=1 \times 10^5\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式(26)和式(27)得到的计算结果。表5显示了在与上述相同的假定条件下, 在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=1000\text{km}=1 \times 10^6\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式(26)和式(27)得到的计算结果。

[0108] 表4

[0109]

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
500 以下	7.91×10^{-13} 以下	5.27×10^{-13} 以下
450 以下	7.12×10^{-13} 以下	4.74×10^{-13} 以下
400 以下	6.32×10^{-13} 以下	4.22×10^{-13} 以下
350 以下	5.53×10^{-13} 以下	3.69×10^{-13} 以下
300 以下	4.74×10^{-13} 以下	3.16×10^{-13} 以下
250 以下	3.95×10^{-13} 以下	2.64×10^{-13} 以下
200 以下	3.16×10^{-13} 以下	2.11×10^{-13} 以下
150 以下	2.37×10^{-13} 以下	1.58×10^{-13} 以下
100 以下	1.58×10^{-13} 以下	1.05×10^{-13} 以下
50 以下	7.91×10^{-14} 以下	5.27×10^{-14} 以下

[0110] 表5

[0111]

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
500 以下	2.5×10^{-13} 以下	1.67×10^{-13} 以下
450 以下	2.25×10^{-13} 以下	1.5×10^{-13} 以下
400 以下	2.0×10^{-13} 以下	1.33×10^{-13} 以下
350 以下	1.75×10^{-13} 以下	1.17×10^{-13} 以下
300 以下	1.5×10^{-13} 以下	1.0×10^{-13} 以下
250 以下	1.25×10^{-13} 以下	8.33×10^{-14} 以下
200 以下	1.0×10^{-13} 以下	6.67×10^{-14} 以下
150 以下	7.5×10^{-14} 以下	5.0×10^{-14} 以下
100 以下	5.0×10^{-14} 以下	3.33×10^{-14} 以下
50 以下	2.5×10^{-14} 以下	1.67×10^{-14} 以下

[0112] 表6显示了假定在内置到光纤缆线中并铺设后使用MCF时MCF的弯曲半径R为1m,在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒)并且信号至少传输通

过 $L=100\text{km}=1\times 10^5\text{m}$ 的距离的情况下,对于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以下和50以下的抽头数量,期望光纤满足 $2n_g\Lambda/(cR)\cdot(\gamma\pi)^{-1/2}$ 且运用式(26)和式(29)得到的计算结果。表7显示了在与上述相同的假定条件下,在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud($=2.5\times 10^{10}\text{Baud}$: 2.5×10^{10} 符号每秒)并且信号至少传输通过 $L=1000\text{km}=1\times 10^6\text{m}$ 的距离的情况下,对于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以下和50以下的抽头数量,期望光纤满足 $2n_g\Lambda/(cR)\cdot(\gamma\pi)^{-1/2}$ 且运用式(26)和式(27)得到的计算结果。

[0113] 表6

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44% 以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74% 以上的功率
500 以下	7.91×10^{-12} 以下	5.27×10^{-12} 以下
450 以下	7.12×10^{-12} 以下	4.74×10^{-12} 以下
400 以下	6.32×10^{-12} 以下	4.22×10^{-12} 以下
350 以下	5.53×10^{-12} 以下	3.69×10^{-12} 以下
300 以下	4.74×10^{-12} 以下	3.16×10^{-12} 以下
250 以下	3.95×10^{-12} 以下	2.64×10^{-12} 以下
200 以下	3.16×10^{-12} 以下	2.11×10^{-12} 以下
150 以下	2.37×10^{-12} 以下	1.58×10^{-12} 以下
100 以下	1.58×10^{-12} 以下	1.05×10^{-12} 以下
50 以下	7.91×10^{-13} 以下	5.27×10^{-13} 以下

[0115] 表7

[0116]

N_{tap}	在 MIMO 计算中反映 原始信号 95.44% 以上 的功率	在 MIMO 计算中反映 原始信号 99.74% 以上 的功率
500 以下	2.5×10^{-12} 以下	1.67×10^{-12} 以下
450 以下	2.25×10^{-12} 以下	1.5×10^{-12} 以下
400 以下	2.0×10^{-12} 以下	1.33×10^{-12} 以下
350 以下	1.75×10^{-12} 以下	1.17×10^{-12} 以下
300 以下	1.5×10^{-12} 以下	1.0×10^{-12} 以下
250 以下	1.25×10^{-12} 以下	8.33×10^{-13} 以下
200 以下	1.0×10^{-12} 以下	6.67×10^{-13} 以下
150 以下	7.5×10^{-13} 以下	5.0×10^{-13} 以下
100 以下	5.0×10^{-13} 以下	3.33×10^{-13} 以下
50 以下	2.5×10^{-13} 以下	1.67×10^{-13} 以下

[0117] 表8显示了假定在内置到光纤缆线中并铺设后使用MCF时MCF的弯曲半径R为10m, 在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=100\text{km}=1 \times 10^5\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式 (26) 和式 (27) 得到的计算结果。表9显示了在与上述相同的假定条件下, 在 f_{symbol} 为例如不小于25GBaud ($=2.5 \times 10^{10}$ Baud: 2.5×10^{10} 符号每秒) 并且信号至少传输通过 $L=1000\text{km}=1 \times 10^6\text{m}$ 的距离的情况下, 对于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以下和50以下的抽头数量, 期望光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 且运用式 (26) 和式 (27) 得到的计算结果。

[0118] 表8

[0119]	N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
	500 以下	7.91×10^{-11} 以下	5.27×10^{-11} 以下
	450 以下	7.12×10^{-11} 以下	4.74×10^{-11} 以下
	400 以下	6.32×10^{-11} 以下	4.22×10^{-11} 以下
	350 以下	5.53×10^{-11} 以下	3.69×10^{-11} 以下
	300 以下	4.74×10^{-11} 以下	3.16×10^{-11} 以下
	250 以下	3.95×10^{-11} 以下	2.64×10^{-11} 以下
	200 以下	3.16×10^{-11} 以下	2.11×10^{-11} 以下
	150 以下	2.37×10^{-11} 以下	1.58×10^{-11} 以下
	100 以下	1.58×10^{-11} 以下	1.05×10^{-11} 以下
	50 以下	7.91×10^{-12} 以下	5.27×10^{-12} 以下

[0120] 表9

[0121]	N_{tap}	在 MIMO 计算中反映原始信号 95.44%以上的功率	在 MIMO 计算中反映原始信号 99.74%以上的功率
	500 以下	2.5×10^{-11} 以下	1.67×10^{-11} 以下
	450 以下	2.25×10^{-11} 以下	1.5×10^{-11} 以下
	400 以下	2.0×10^{-11} 以下	1.33×10^{-11} 以下
	350 以下	1.75×10^{-11} 以下	1.17×10^{-11} 以下
	300 以下	1.5×10^{-11} 以下	1.0×10^{-11} 以下
	250 以下	1.25×10^{-11} 以下	8.33×10^{-12} 以下
	200 以下	1.0×10^{-11} 以下	6.67×10^{-12} 以下
	150 以下	7.5×10^{-12} 以下	5.0×10^{-12} 以下
	100 以下	5.0×10^{-12} 以下	3.33×10^{-12} 以下
	50 以下	2.5×10^{-12} 以下	1.67×10^{-12} 以下

[0122] 此外,更优选地将 $\sigma_r/L^{1/2}$ 控制为不大于与标准单模光纤(SSMF)中的PMD相等的值或至少不大于该值的10倍,这是因为可以控制抽头数量的增长不大于10倍。SSMF的PMD通常

最大为 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ (即, 大约 $1.58 \times 10^{-14}\text{s}/\text{m}^{1/2}$) 以下。

[0123] 为了保持 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 不大于 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 的十倍, 即, 不大于 $5.0\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ (大约 $1.58 \times 10^{-13}\text{s}/\text{m}^{1/2}$), 基于上述式 (21), 本发明的多芯光纤优选地满足下面的式 (28)。为了保持 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 不大于 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 的五倍, 即, 不大于 $2.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ (大约 $7.91 \times 10^{-14}\text{s}/\text{m}^{1/2}$), 本发明的多芯光纤优选地满足下面的式 (29)。此外, 为了保持 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 不大于 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 的两倍, 即, 不大于 $1.0\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ (大约 $3.16 \times 10^{-14}\text{s}/\text{m}^{1/2}$), 本发明的多芯光纤优选地满足下面的式 (30)。为了保持 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 小于或等于 $0.5\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ (大约 $1.58 \times 10^{-13}\text{s}/\text{m}^{1/2}$), 本发明的多芯光纤优选地满足下面的式 (31)。各参数的单位是 L (m)、 Λ (m)、 c (m/s)、 R (m) 和 γ (rad/m)。

$$[0124] \quad \text{式 (28)} \quad \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 1.58 \times 10^{-13}$$

$$[0125] \quad \text{式 (29)} \quad \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 7.91 \times 10^{-14}$$

$$[0126] \quad \text{式 (30)} \quad \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 3.16 \times 10^{-14}$$

$$[0127] \quad \text{式 (31)} \quad \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq 1.58 \times 10^{-14}$$

[0128] 表10显示了期望本发明的多芯光纤满足 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 的值以便满足式 (28) 和 (31), 其中假定在内置到光纤缆线中并铺设后使用MCF时MCF的弯曲半径 R 为10m以上、5m以上、3m以上、2m以上、1m以上和0.2m以上。表11示出了在假定 $n_g=1.46$ 并且 Λ 不大于 $25\mu\text{m}$ ($=25 \times 10^{-6}\text{m}$) 的情况下用于实现表10中的值的 γ (rad/m) 的期望值。

[0129] 例如, 在考虑普通的骨架式带状光缆 (ribbon slotted-core cables) 的情况下, 内置到光缆中的光纤所具有的弯曲半径主要在大约0.2到2m的范围内。因此, 从表10推测出如果多芯光纤中的 $2n_g \Lambda / (cR) \cdot (\gamma \pi)^{-1/2}$ 不大于 3.16×10^{-14} , 则当多芯光纤内置到普通的骨架式带状光缆中时 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 可以保持不大于 $5.0\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。类似地, 从表11推测出如果 Λ 不大于 $25\mu\text{m}$ ($=25 \times 10^{-6}\text{m}$) 并且 γ 不小于大约 $4.72\text{rad}/\text{m}$, 则当多芯光纤内置到普通的骨架式带状光缆中时 $\sigma_{\tau}/L^{1/2}$ 可以保持不大于 $5.0\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。

[0130] 表10

[0131]

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

[0132] 表11

[0133]

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

[0134] 当R代表使用中的光纤的弯曲半径且R_{bobbin}代表处于缠绕在线轴上的状态的光纤的弯曲半径时,为了在使用中使 $\sigma_r/L^{1/2}$ 满足目标A,基于式(21),光纤优选地满足式(32)。与此同时,从式(33)得出,满足处于缠绕在线轴上的状态的目标为AR/R_{bobbin}。

[0135] 式(32)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \leq A$$

[0136] 式(33)
$$\frac{2n_g \Lambda}{cR_{bobbin}\sqrt{\gamma\pi}} = \frac{2n_g \Lambda}{cR\sqrt{\gamma\pi}} \frac{R}{R_{bobbin}} \leq A \frac{R}{R_{bobbin}}$$

[0137] 接下来,考虑利用满足式(28)的本发明的多芯光纤进行传输时N_{tap}与f_{symbol}之间的期望关系。N_{tap}与f_{symbol}优选地满足式(22)以便在MIMO计算中反映原始信号95.44%的功率;N_{tap}与f_{symbol}更优选地满足式(23)以便在MIMO计算中反映原始信号99.74%的功率;然而,反映高于必须的功率比例将会导致N_{tap}的增加,进而导致计算复杂度的增加。因此,优选的是在MIMO计算中反映原始信号的不小于95.44%且不大于99.74%的功率;优选地将N_{tap}与f_{symbol}之间的关系设置为满足下面的式(34);从上面的式(21)优选满足下面的式(35)。

[0138] 式(34)
$$\frac{N_{tap}}{12f_{symbol}} \leq \sigma_r \leq \frac{N_{tap}}{8f_{symbol}}$$

[0139] 式(35)
$$\frac{N_{tap}}{12f_{symbol}} \leq 2 \frac{n_g \Lambda}{cR} \sqrt{\frac{L}{\gamma\pi}} \leq \frac{N_{tap}}{8f_{symbol}}$$

[0140] 通过关于N_{tap}/f_{symbol}重新整理式(34),获得下面的式(36)。

[0141] 式(36)
$$8\sigma_r \leq \frac{N_{tap}}{f_{symbol}} \leq 12\sigma_r$$

[0142] 因此,当利用 $\sigma_r/L^{1/2}$ 不大于5.0ps/km^{1/2}(即,大约1.58×10⁻¹³s/m^{1/2})的多芯光纤进行传输时,基于式(36),N_{tap}与f_{symbol}之间的关系优选地至少满足下面的式(37)。在该关系中,f_{symbol}的单位为Baud,L的单位为m。

[0143] 式(37)
$$8 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L} \leq \frac{N_{tap}}{f_{symbol}} \leq 12 \times 1.58 \times 10^{-13} \sqrt{L}$$

[0144] 根据本发明的实施例的多芯光纤优选具有如下的布局:以物理上接近并彼此处于光学耦合状态来布置多个芯部。图4显示了这种多芯光纤的剖视图的实例。在图4所示的多芯光纤1中,多个芯部10以接近的方式布置并且在多个芯部10周围设置包层20。多个芯部10可以彼此间物理接触,但优选地彼此间不接触地分开,以帮助信号输入各芯部10中或从各芯部10中输出。因此,各芯部10的外周优选地彼此分开约至少1μm以上,更优选地彼此间分开至少5μm以上,更优选地彼此分开至少10μm以上。光学耦合状态是指芯部间串扰充分大的状态。相邻芯部间的串扰优选地不小于-15dB,更优选地不小于-10dB,更优选地不小于-5dB,更优选地大约为0dB。由于芯部间DGD如上所述随芯部节距的增加而增加,在此作为Λ列出的值至少优选地为“各芯部的中心之间的最短距离”,更可优选地为“在物理上接近并处于光学耦合状态的各芯部的中心之间的最长距离”。

[0145] 根据本发明的实施例的优选多芯光纤是如下的光纤,其中,多个内置的芯部构成多个芯部组,每个芯部组由所有这些芯部中的在物理上接近并处于光学耦合状态的一部分

芯部而非全部芯部构成,其中芯部组以适当抑制了相互间串扰的状态进行布置。每个芯部组的相邻芯部之间的串扰优选地不小于-15dB,更优选地不小于-10dB,更优选地不小于-5dB,更优选地大约为0dB。芯部组之间的串扰优选地至少不大于-16.7dB,更优选地不大于-20dB,更优选地不大于-30dB。图5显示这样的多芯光纤的剖视图的实例。

[0146] 图5所示的多芯光纤2具有如下的布局:形成七个均由七个芯部10构成的芯部组并且包层20将其全部覆盖。应该注意的是这些数量不限于示例值。图4的实例也可以称为具有一个芯部组的布局(参照图1中(a))。优选使用这样的MCF作为传输线路,从而在将MIMO技术分别应用于各独立芯部组11的空分复用信号的多路分用及解码而不是一起应用于所有芯部的情况下降低MIMO计算的计算复杂度。

[0147] 使用根据本发明的实施例的多芯光纤作为传输线路的多芯光纤传输系统可以不通过对前述芯部组11一起引导的多个超模的信号进行多路复用(即,不通过如下方式:在将发射机耦合到多芯光纤时将发射机的空分复用的信号耦合到MCF的芯部组中引导的各超模,在将多芯光纤耦合到接收机时对得自MCF的各超模的在接收机进行MIMO处理之前的信号进行空间多路分用),而是通过对前述芯部组11中的各芯部10中引导的空间模的信号进行多路复用(即,通过如下方式:在将发射机耦合到MCF时将用于发射机的空分复用的信号耦合到分别在多芯光纤的对应芯部中引导的空间模,在将MCF耦合到接收机时对得自多芯光纤的各模式的在接收机进行MIMO处理之前的信号进行空间多路分用),来减少用于多路复用的空间模之间的DGD。

[0148] 根据本发明的实施例的多芯光纤所内置的每一个芯部都优选以单模操作。这是因为这种构造可以抑制在同一芯部内发生芯部间DGD(即DMD)。尽管在此描述了“由物理上接近并处于光学耦合状态的芯部构成的芯部组的每个芯部以单模操作”,这样的构造也可以重述为“芯部组引导阶次与芯部组的芯部数量相同的空间模,而使阶次更大的空间模截止”。在另一方面,根据本发明的实施例的MCF所内置的每个芯部优选地引导多个空间模。这是为了在引导多个空间模的芯部中沿纵向高频引入空间模之间的随机耦合。当单个芯部或每个非耦合芯部引导多个空间模时,难以沿纵向高频引入空间模之间的随机耦合。这样的随机耦合最多每几千米在光纤接合点处出现。与之相比,布置根据本发明的实施例的多芯光纤,使得每个内置芯部引导多个模,由此在每个相位匹配点处发生不同芯部中同一阶次的芯部模式之间的随机模式耦合或不同阶次的芯部模式之间的随机模式耦合。因此,根据本实施例的多芯光纤可以同时获得高空间模密度和低DGD。当根据上述实施例的多芯光纤中内置的每个芯部以多模方式操作时,DMD优选为充分小。

[0149] 当根据本发明的实施例的多芯光纤内置在光纤缆线中时,可以通过合适的缆线控制多芯光纤的弯曲半径。图6中(a)和(b)显示了缆线的实例。在图6中(a)和(b)所示的光纤缆线(多芯光纤缆线)300具有中心部件310、以预定节距缠绕在中心部件310上的多个光纤100、缠绕在光纤上以保持光纤的缠绕状态的保持覆盖物250以及覆盖在保持覆盖物250外周上的护套200。光纤缆线300同样可应用于图1中(c)所示多芯光纤传输系统的传输线路。前述的多芯光纤1、2也可应用于图1中(c)所示多芯光纤传输系统的传输线路。每个光纤100均包括多芯光纤100A及完全覆盖多芯光纤100A的树脂覆膜130。每个光纤100沿纵向以预定节距缠绕在中心部件310上而以固定的曲率半径弯曲。为了保护光纤100不受外力影响,护套200覆盖整个保持覆盖物250。尽管为了简化附图,图6中(b)只显示了光纤100中的一条光

纤,实际上光纤缆线300中的所有光纤100都缠绕在中心部件310上。当如同图6所示的光纤缆线那样MCF以螺旋形状缠绕在张紧部件等的预定轴线周围而内置到缆线中时,可以通过调节螺旋线的半径 r_h 及螺距 L_p 来控制MCF的弯曲半径 R 。图7显示了螺旋线的半径 r_h 及螺距 L_p 之间的关系。当将沿预定轴线的纵向设为 z 轴并相对于与 z 轴垂直的 xy 平面上的 z 轴定义极坐标 (r, θ) 时,MCF显示 $r=r_h$ 及 $\theta=2\pi z/L_p$ 的布置方式。

[0150] 如上所述,根据本发明的实施例的多芯光纤、多芯光纤缆线和多芯光纤传输系统能有效使用MIMO技术进行计算。应该注意的是本发明可以在不限于上述实施例的情况下以多种方式做出变型。

[0151] 附图标号列表

[0152] 1a-1c、1、2...多芯光纤(MCF);10...芯部;11...芯部组;20...包层;300...光纤缆线。

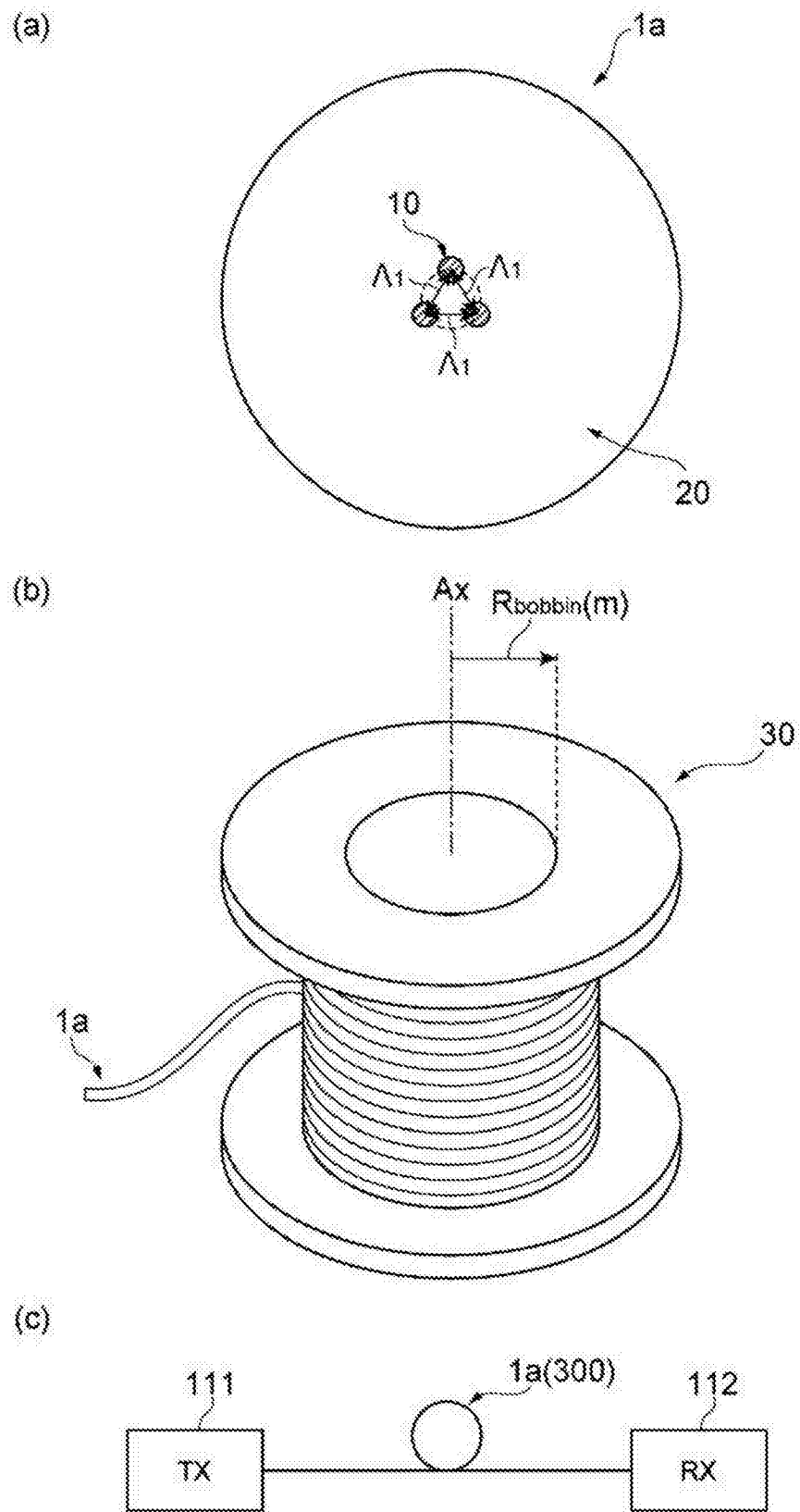


图1

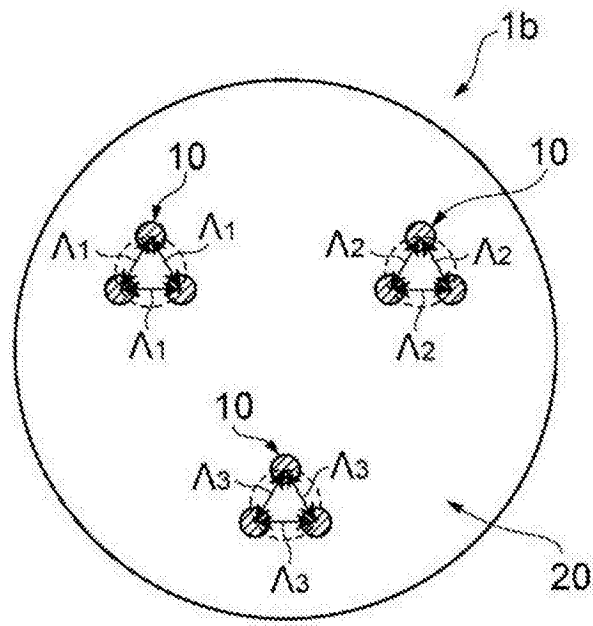


图2

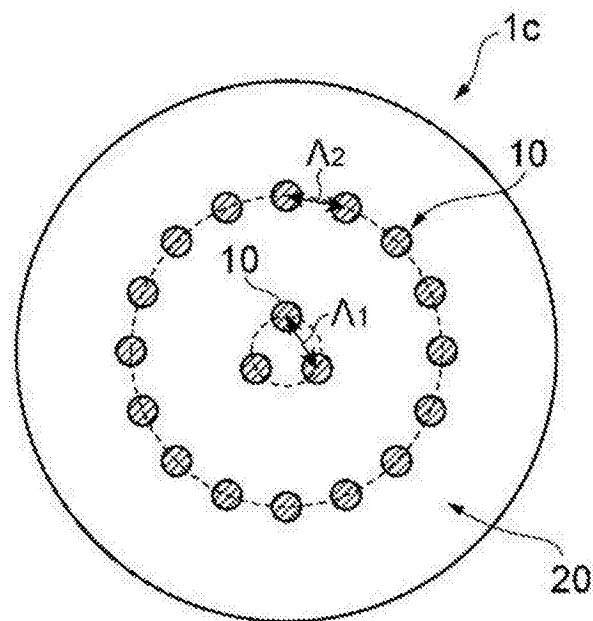


图3

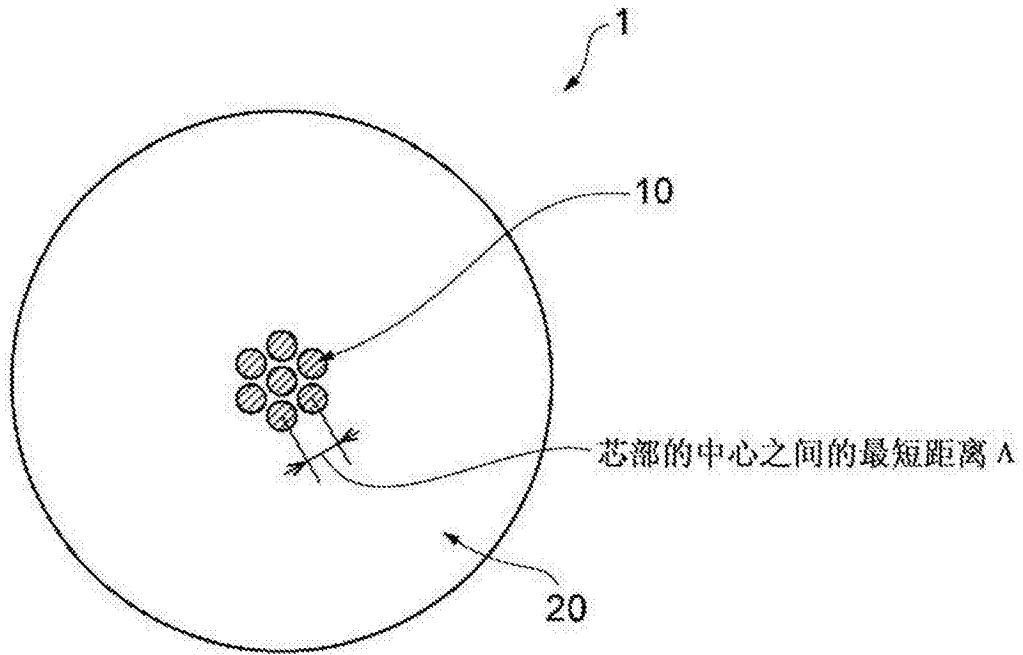


图4

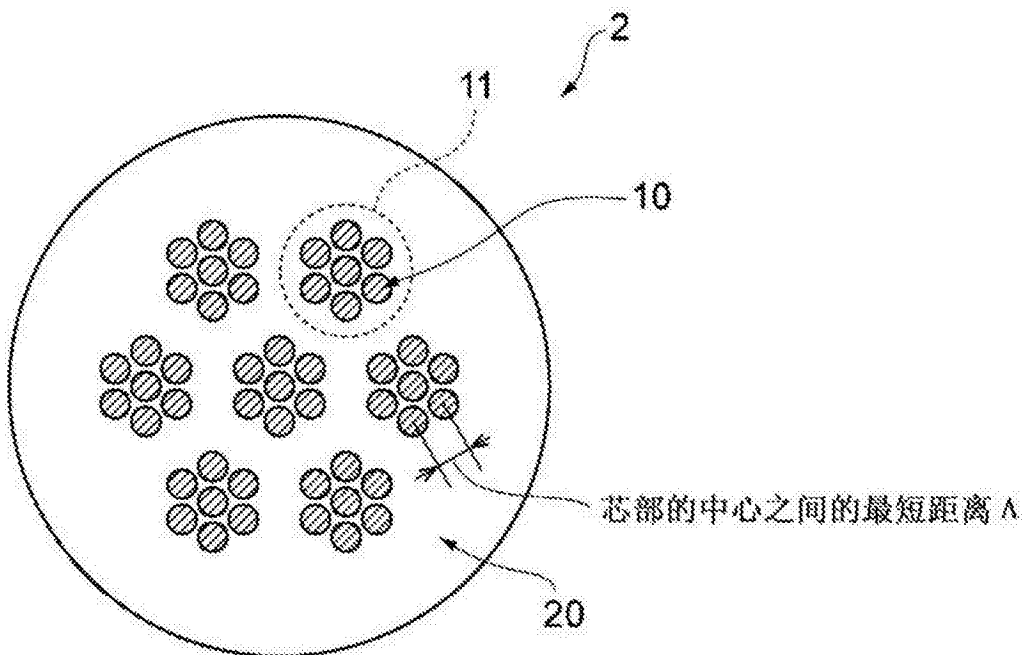


图5

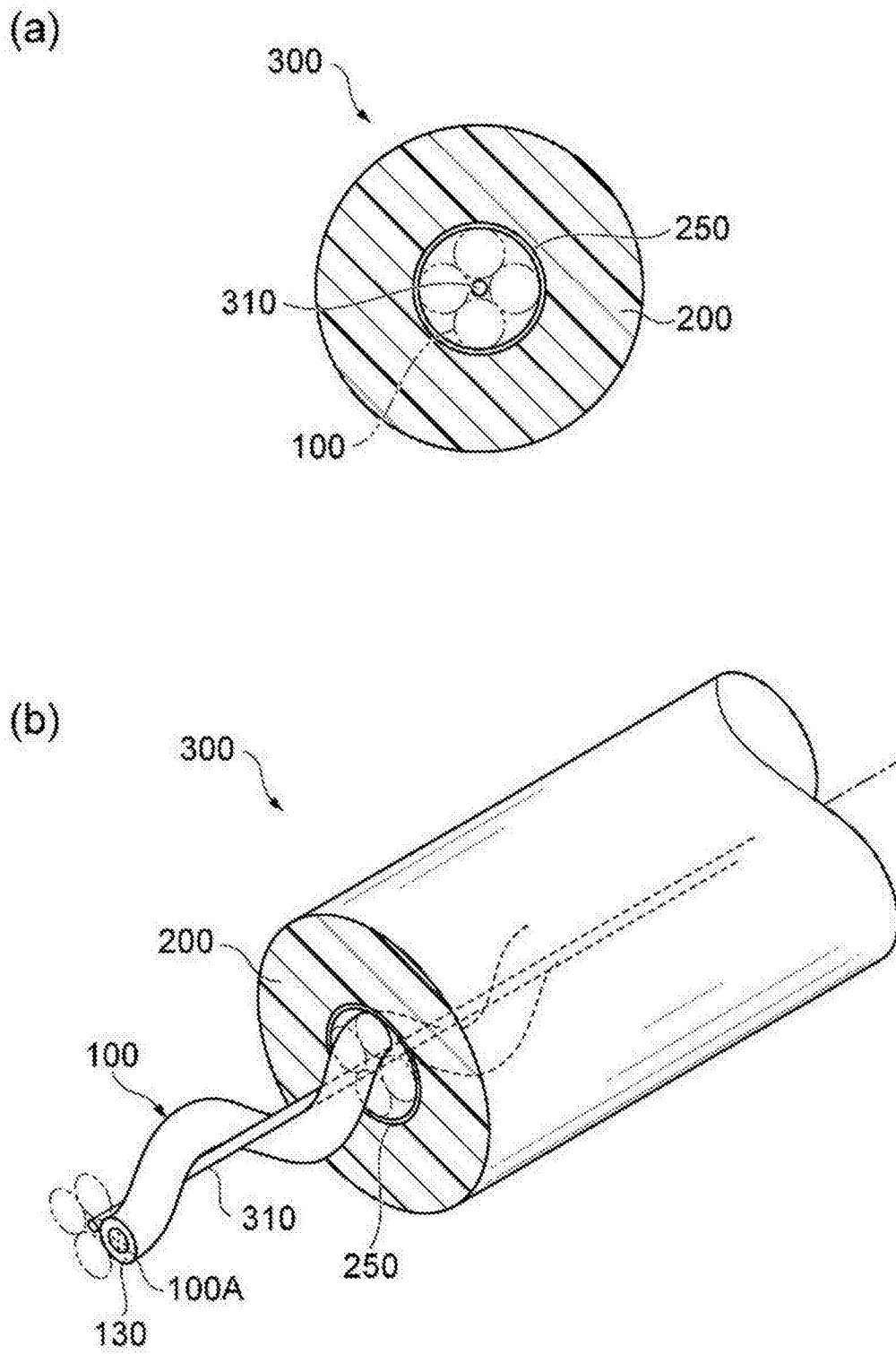


图6

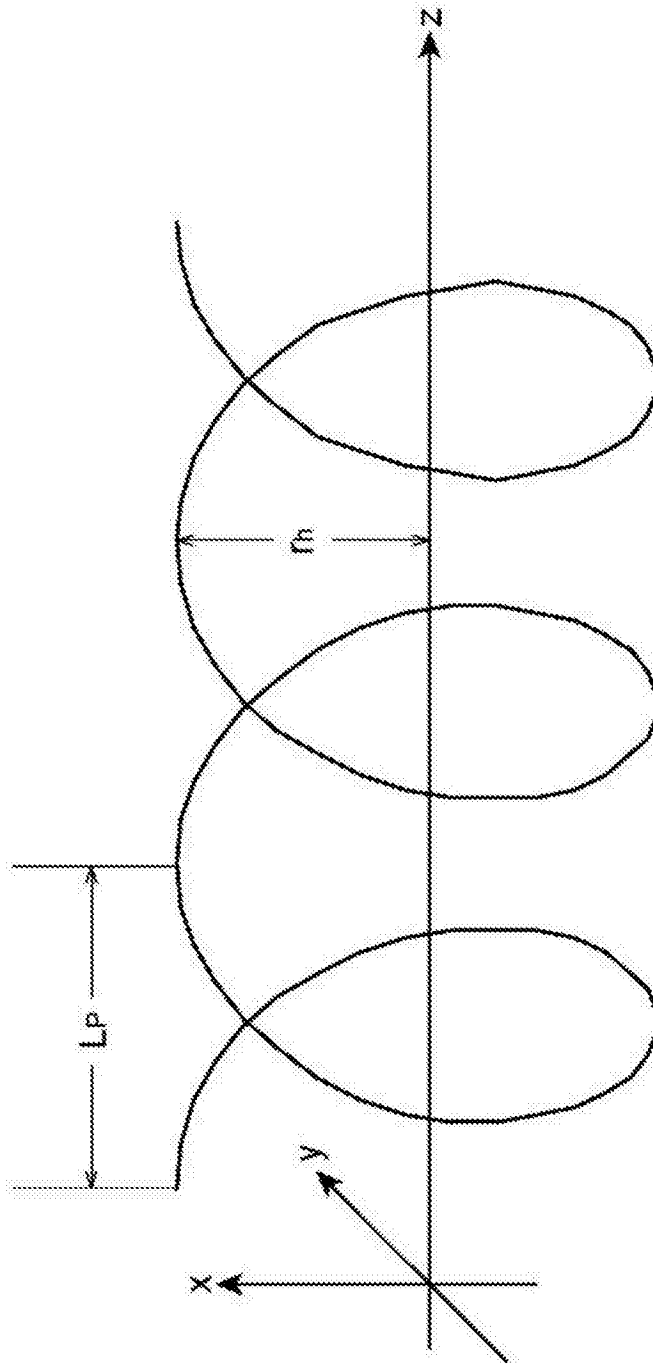


图7