



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102706535 B

(45)授权公告日 2016.08.31

(21)申请号 201210046940.5

(22)申请日 2012.02.27

(30)优先权数据

2011-040523 2011.02.25 JP

2011-255359 2011.11.22 JP

(73)专利权人 住友电气工业株式会社

地址 日本大阪府

(72)发明人 林哲也

(74)专利代理机构 北京天昊联合知识产权代理有限公司 11112

代理人 何立波 张天舒

(51)Int.Cl.

G01M 11/02(2006.01)

G02B 6/036(2006.01)

(56)对比文件

CN 101788696 A,2010.07.28,

US 2002176677 A1,2002.11.28,

US 4300816 A,1981.11.17,

US 2007065077 A1,2007.03.22,

US 6366347 B1,2002.04.02,

JP 2008116745 A,2008.05.22,

李娟等.“新型多芯光纤的模场特性分析”.

《激光技术》.2009,第33卷(第5期),第529-531页、第534页.

审查员 林菲菲

权利要求书1页 说明书9页 附图6页

(54)发明名称

多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法

(57)摘要

本发明提供一种多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法,其通过使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,或者,使向多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化,同时对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而得到纤芯间串扰的统计学分布。根据本发明,无需重新卷绕多芯光纤而使纤芯间的等价传输常数差的零点周边的纤芯间的相位差变更并测定串扰。

1. 一种多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法, 其对射入了特定波长的光的情况下的多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,

其特征在于,

通过一边使向所述多芯光纤射入的入射光的波长在包含所述特定波长在内的一定范围内变化, 一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定, 从而得到与各波长对应的串扰值的集合,

通过将所述串扰值的集合作为母集合而得到纤芯间串扰的统计学分布, 从而求出从由所述特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差所构成的组中选择的值。

2. 根据权利要求1所述的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法, 其特征在于,

使所述母集合中含有的所述串扰值的数量至少大于或等于130个。

3. 根据权利要求1所述的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法, 其特征在于,

在将表示所述一定范围的波长扫描幅度设为 λ_{range} 时, 所述波长扫描幅度 λ_{range} 至少大于或等于5.2nm。

4. 一种多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法, 其对射入了特定波长的光的情况下的多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,

其特征在于,

通过一边使向所述多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化, 一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定, 从而取得与入射光的各偏振状态对应的串扰值的集合,

将所述串扰值的集合作为母集合而得到纤芯间串扰的统计学分布, 由此, 求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差构成的组中选择的值。

5. 根据权利要求4所述的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法, 其特征在于,

对于所述串扰值的集合, 是在使所述入射光的偏振状态以在邦加球上均匀地分布的方式进行变化的同时而取得的。

多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法。

背景技术

[0002] 近年来,正在积极研究具有多个纤芯的多芯光纤。多芯光纤例如具有在与长度方向垂直的剖面上多个纤芯以二维状分散配置的结构,已知在该多个纤芯之间产生串扰。例如,在T.Hayashi et al., "Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend," in Proc. ECOC' 10, We. 8.F.6(2010)(文献1)中,示出多芯光纤的纤芯间串扰是具有统计性波动的值。

发明内容

[0003] 发明人对上述现有技术进行研究,其结果发现下述课题,即,对于多芯光纤的纤芯间串扰的变化,已知其在纤芯间的等价有效折射率(考虑光纤的弯曲而换算为直线光波导路后的有效折射率)相等的等价有效折射率差的零点处产生,在零点处的串扰的变化与零点周边的纤芯间的相位差相关。由此,为了得到纤芯间串扰的统计学分布,需要使零点周边的纤芯间的相位差变化而测定串扰。以调查纤芯间串扰的统计学分布为目的,在现有技术中,由于需要重复进行光纤的重新卷绕以变更纤芯间的相位差,并在此基础上测定纤芯间串扰,所以用于得到纤芯间串扰的统计学分布的作业量很庞大。

[0004] 本发明就是鉴于上述情况而提出的,其目的在于,提供一种可以利用更简单的方法对纤芯间串扰的特性进行分析的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法。

[0005] 本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法,对射入了特定波长的光的情况下的多芯光纤的纤芯间串扰进行测定。为了实现上述目的,本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法具有取得纤芯间串扰值的取得工序和数值确定工序,在该数值确定工序中,求出与纤芯间串扰的统计学分布相关的特定数值。在取得工序中,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而取得与各波长对应的串扰值的集合,或者,一边使向多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而取得与入射光的各偏振状态对应的串扰值的集合。在数值确定工序中,通过将由取得工序所取得的串扰值的集合作为母集合而得到纤芯间串扰的统计学分布,从而求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差所构成的组中选择的值。

[0006] 为了实现上述目的,本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法,作为第1方式,其是对射入了特定波长的光的情况下的多芯光纤的纤芯间串扰进行测定的方法,其特征在于,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而取得与各波长对应的串扰值的集合,通过将串扰值的集合作为母集合而得到纤芯间串扰的统计学分布,从而求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差所构成的组中选择的

值。

[0007] 根据上述第1方式,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而可以得到纤芯间串扰的统计学分布,无需重新卷绕多芯光纤而使零点周边的纤芯间的相位差变更并测定串扰。由此,可以利用更简单的方法对纤芯间串扰的特性进行分析。

[0008] 作为高效实现上述作用的结构(作为可以应用于第1方式的第2方式),可以形成下述方式,即,具体地说,在将特定波长设为 λ_0 ,将表示一定范围的波长扫描幅度设为 λ_{range} ,将串扰的统计学分布的平均值的波长相关性设为S,将通过测定得到的波长 λ 和串扰值之间的关系由下述算式:

$$[0009] \quad f_{\text{lin}}(\lambda) = XT_{\text{lin}} \cdot 10^{\frac{S(\lambda-\lambda_0)}{10}}$$

[0010] 进行近似,或者,

[0011] 将通过测定得到的波长 λ 和串扰的分贝值之间的关系由下述算式:

$$[0012] \quad f_{\text{dB}}(\lambda) = XT_{\text{dB}} + S(\lambda - \lambda_0)$$

[0013] 进行近似时,使用 $S\lambda_{\text{range}}$ 的绝对值小于或等于4.6dB的范围的串扰值,求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差构成的组中选择的值。

[0014] 另外,作为高效实现上述作用的其它结构(作为可以应用于第1或第2方式中的至少一个的第3方式),可以举出下述方式,即,具体地说,在将特定波长设为 λ_0 ,将一定范围设为从 $\lambda_0 - \lambda_{\text{dev}}$ 至 $\lambda_0 + \lambda_{\text{dev}}$,将串扰的统计学分布的平均值的波长相关性设为S,将通过上述测定得到的纤芯间串扰的统计学分布,利用下述算式:

[0015]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{2S\lambda_{\text{dev}}} \left[\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}}\right) - \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}}\right) \right] & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases}$$

[0016] 并将 σ^2 作为变量而进行拟合,从而求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值即 $4\sigma^2$ 、中值、众数、分位数及方差构成的组中选择的值。

[0017] 另外,作为可以应用于第1至第3方式中的至少一个的第4方式,可以是使所述母集合中含有的所述串扰值的数量至少大于或等于130个。

[0018] 另外,作为可以应用于第1至第4方式中的至少一个的第5方式,也可以形成下述方式,即,在将表示所述一定范围的波长扫描幅度设为 λ_{range} 时,所述波长扫描幅度 λ_{range} 至少大于或等于5.2nm。

[0019] 另外,本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法,作为第6方式,是对射入了特定波长的光的情况下的多芯光纤的纤芯间串扰进行测定的方法,其特征在于,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而取得与入射光的各偏振状态对应的串扰值的集合,将串扰值的集合作为母集合而得到纤芯间串扰的统计学分布,由此,求出从由特定波长下的纤芯间串扰的统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差构成的组中选择的值。

[0020] 根据上述第6方式,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化,一边对

该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而可以得到纤芯间串扰的统计学分布,无需重新卷绕多芯光纤而使零点周边的纤芯间的相位差变更并测定串扰。由此,可以利用更简单的方法对纤芯间串扰的特性进行分析。

[0021] 在这里,作为高效实现上述作用的结构(作为可以应用于第6方式的第7方式),可以举出下述方式,即,具体地说,一边使入射光的偏振状态以在邦加球上均匀地分布的方式进行变化,一边取得串扰值的集合。

附图说明

[0022] 图1是表示实施本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法所用的装置结构的一个例子的图。

[0023] 图2是表示实施本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法所用的装置结构的其它例子的图。

[0024] 图3是对零点处的纤芯间相位差进行说明的图。

[0025] 图4是表示在使波长变化时的串扰分布的平均的图。

[0026] 图5是表示在使波长变化时的串扰分布的平均值的变化、和测定出的串扰分布的平均值的误差之间对应关系的图。

[0027] 图6是说明在使波长扫描范围中的串扰分布的平均值的变化量变化的情况下的概率分布形状的差异的图。

[0028] 图7是表示使用多芯光纤进行测定时的结果的图。

[0029] 图8是表示将图7所示的测定结果作为概率分布而描绘的结果的图。

[0030] 图9是表示在改变采样值数量N的情况下的XT平均值的变化的图。

[0031] 图10是表示在改变 λ_{range} 的情况下的XT平均值的变化的图。

具体实施方式

[0032] 下面,参照附图,详细说明用于实施本发明的方式。在本实施方式中,首先针对现有的串扰示出问题点,并且随后说明本发明的实施方式。此外,在附图的说明中,针对相同要素标注相同标号,省略重复的说明。

[0033] 首先,说明多芯光纤的串扰。所谓多芯光纤,是具有在与长度方向垂直的剖面上多个纤芯以二维状分散配置的结构的光纤。在这里,在考虑到光纤的弯曲或扭转的情况下,对于从纤芯m至纤芯n的串扰,如果考虑为单一偏振的情况,则可以利用模耦合方程而以下述算式(1)表示。

$$[0034] \quad \frac{\partial A_n(z)}{\partial z} = -j\kappa_{nm} A_m(z) \exp(-j\{\phi_m(z) - \phi_n(z)\}) \quad (1)$$

[0035] 其中, A_n 是纤芯n的电场复振幅, κ_{nm} 是从纤芯m至纤芯n的耦合系数, Φ 是下面的算式(2)所示的值, β 是各纤芯的传输常数, D_{nm} 是纤芯n和纤芯m的中心间距, R 是光纤的弯曲半径, θ_n 是以纤芯m为原点,纤芯n与光纤的弯曲直径方向形成的角度。

$$[0036] \quad \begin{cases} \phi_m(z) = \beta_m z \\ \phi_n(z) = \int_0^z \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} dz' \end{cases} \quad (2)$$

[0037] 在这里,上述算式(2)所包含的算式(3)是,以纤芯 m 为基准而将弯曲的光波导路换算为直线光波导路后,纤芯 n 的等价的传输常数(等价传输常数)。在这里,由于纤芯 m 成为基准,所以纤芯 m 的等价传输常数为 β_m 。

$$[0038] \quad \beta_n \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} \quad (3)$$

[0039] 由于在多芯光纤所含有的2个纤芯之间,等价传输常数相等的点(等价传输常数差的零点)处,产生支配性的串扰变化,所以光纤长度方向上的串扰变化可以如下述算式(4)所示进行模型化。

$$[0040] \quad A_n(n_{\text{zero}}+1) = A_n(n_{\text{zero}}) + K \exp(j\Phi_{\text{random}}) A_m(n_{\text{zero}}) \quad (4)$$

[0041] 此外, $A_n(n_{\text{zero}})$ 是第 n_{zero} 个等价传输常数差的零点后的纤芯 n 的电场复振幅, K 是支配性的串扰变化的系数, Φ_{random} 是与各零点处的纤芯间的相位差相当的参数。此外,由于 Φ_{random} 在实际光纤中弯曲直径或扭转方向仅略微变化时就大幅变化,所以视作随机值。

[0042] 在这里,下述算式(5)分别符合具有 $\sigma^2 = K^2/2$ 的方差的概率分布。

$$[0043] \quad \Re\{K \exp(j\phi_{\text{random}}) A_m(n_{\text{zero}})\}, \Im\{K \exp(j\phi_{\text{random}}) A_m(n_{\text{zero}})\} \quad (5)$$

[0044] 由此,根据中心极限定理,如果 n_{zero} 充分大,则下述算式(6)所示的值,分别将算式(7)所示的正态分布作为概率分布而进行分布。

$$[0045] \quad \Re\{A_n(n_{\text{zero}})\}$$

$$[0046] \quad \Im\{A_n(n_{\text{zero}})\} \quad (6)$$

$$[0047] \quad \sigma^2 = \frac{K^2}{2} \sum_{k=0}^{n_{\text{zero}}} |A_m(k)|^2 \quad (7)$$

[0048] 在这里,在纤芯间串扰如算式(8)所示非常小,多芯光纤在长度方向上以一定的扭转度扭转的情况下,导出算式(9)的关系。

$$[0049] \quad A_m(n_{\text{zero}}) \approx 1 \quad (8)$$

$$[0050] \quad \sigma^2 = \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad (9)$$

[0051] 此时,可知算式(6)的分布的方差并不与多芯光纤的扭转度相关,而是与耦合系数、传输常数、光纤的弯曲半径、纤芯的中心间距、光纤长度相关。但实际上,由于在多芯光纤中存在2种偏振模式,所以可以将算式(7)、(9)分别变换为下述算式(10)、(11)。

$$[0052] \quad \sigma^2 = \frac{K^2}{4} \sum_{k=0}^{n_{\text{zero}}} |A_m(k)|^2 \quad (10)$$

$$[0053] \quad \sigma^2 = \frac{1}{2} \frac{\kappa_{nm}^2}{\beta_n} \frac{R}{D_{nm}} L_F \quad (11)$$

[0054] 此时, $|A_n(n_{\text{zero}})|^2/\sigma^2$ 基于自由度为4的卡方分布进行分布。

[0055] 另外, $|A_n(n_{\text{zero}})|^2$ 按照以 $1/\sigma^2$ 进行标度(scaling)后的自由度为4的卡方分布即算式(12)

$$[0056] \quad f(x) = \frac{x}{4\sigma^4} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

[0057] 进行分布,分布的平均值 XT_{μ} 为 $4\sigma^2$ 。

[0058] 在这里可知,为了实际对串扰进行测定,得到具有上述方差的统计学分布,在实际

光纤中,需要使各零点处的纤芯间的相位差 Φ_{random} 在每次进行测定时随机地产生波动。由于 Φ_{random} 如上述所示,由于多芯光纤的弯曲直径或扭转方式的略微变化而大幅变化,所以当前通过在每次测定时重新卷绕多芯光纤,使多芯光纤的各位置的弯曲直径或扭转方向产生波动,从而使 Φ_{random} 产生波动,得到串扰的直方图,由此取得串扰的统计学分布。

[0059] 但是,在该多芯光纤的重新卷绕中需要时间和人工,导致下述问题,即,不容易增加直方图的采样数,作业量增加。

[0060] 因此,在本实施方式中,作为无需反复重新卷绕多芯光纤而对串扰进行测定,就可以取得串扰的统计学分布的直方图的方法,研究出一种测定串扰的波长特性的方法。

[0061] 图1是表示实施本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法所用的具体装置结构的一个例子的图。另外,图2是表示实施本发明所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法所用的具体装置结构的其它例子的图。此外,在图2中,仅公开了光发送部200A,但对于使用该光发送部200A的测定装置的其它结构,则与图1的装置结构相同。

[0062] 图1所示的测定装置具有:调节机构,其用于对测定对象即多芯光纤100的光入射状态及光出射状态进行机械调节;光发送部200,其射出测定光;受光部300,其对串扰光进行受光;以及判定部400。

[0063] 调节机构具有:光发送侧工作台500A,其上用于固定测定对象即多芯光纤100的入射端100a;受光侧工作台500B,其上用于固定多芯光纤100的出射端100b;以及工作台驱动部600,其用于分别进行上述工作台500A、500B的姿势控制。光发送部200具有:光源210;以及光源驱动部220,其用于使从光源210射出的测定光的波长在规定范围内扫描。从光源210输出的测定光被引导至光发送用光纤701,该光发送用光纤701的出射端701a固定在光发送侧工作台500A上。受光部300具有受光元件310(PD),其用于经由入射端702a固定在受光侧工作台500B上的受光用光纤702,对从多芯光纤100的出射端100b射出的串扰光进行受光。判定部400具有:控制部410,其进行工作台驱动部600及光源驱动部220的驱动控制、以及取得来自PD 310的测定值,并实施本实施方式所涉及的测定方法;以及存储器420,其用于存储各种测定数据等。

[0064] 光发送侧工作台500A具有:台座501A,其可以在保持光发送用光纤701的出射端701a的状态下,沿箭头S1所示的水平方向移动;以及台座502A,其可以在保持多芯光纤100的入射端100a的状态下,沿与箭头S1正交的箭头S2(\perp S1)所示的垂直方向移动。工作台驱动部600通过使台座501A以规定量沿水平方向移动,并且使台座502A以规定量沿垂直方向移动,从而例如使光发送用光纤701的出射端701a和配置在多芯光纤100的入射端100a上的纤芯m光学连接。

[0065] 另一方面,受光侧工作台500B具有:台座501B,其可以在保持受光用光纤702的入射端702a的状态下,沿箭头S1(\perp S2)所示的水平方向移动;以及台座502B,其可以在保持多芯光纤100的出射端100b的状态下,沿与箭头S1正交的箭头S2(\perp S1)所示的垂直方向移动。工作台驱动部600根据来自控制部410的指示信号,通过使台座501B以规定量沿水平方向移动,并且使台座502B以规定量沿垂直方向移动,从而例如使受光用光纤702的入射端702a和配置在多芯光纤100的出射端100b上的纤芯n光学连接。此外,作为调节机构,并不限定于图1所示的包含工作台驱动部600等的结构,例如也可以应用能够分别向各纤芯输入/输出光的耦合设备(空间光学系统、光纤耦合器等),在此情况下,也可以并不利用光发送侧工作台

500A及受光侧工作台500B,而是手动将耦合设备与光纤701、702连接。利用上述调节机构,可以在配置于测定对象即多芯光纤100的入射端100a上的多个纤芯中,选择经由光发送用光纤701的出射端701a射入测定光的纤芯,以及在配置于多芯光纤100的出射端100b上的多个纤芯中,选择经由受光用光纤702的入射端702a对串扰光进行受光的纤芯。控制部410通过一边使测定光的波长或偏振状态变化,一边任意选择入射侧纤芯m和出射侧纤芯n,从而可以取得纤芯间串扰值的集合。

[0066] 上述光发送部200作为一边使波长变化一边射出测定光的光源单元起作用,但也可以替换该光发送部200,而在图1所示的测定装置中使用一边使测定光的偏振状态变化一边射出测定光的光发送部200A。此外,图2的光发送部200A除了光源210之外,还具有:偏振元件230,其用于将从该光源210射出的光的偏振状态变更为期望的状态;以及驱动部240,其根据来自控制部410的指示而进行偏振元件230的姿势控制。从光源210射出的光中通过偏振元件230后的光,作为测定光被引导至光发送用光纤701。

[0067] 利用 $\beta=2\pi/\lambda \cdot n_{\text{eff}}$ 的关系,可以将算式(2)改写为下述算式(13)。

$$[0068] \quad \begin{cases} \phi_m(z) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},m} z \\ \phi_n(z) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},n} \int_0^z \left\{ 1 + \frac{D_{nm}}{R} \cos \theta_n(z') \right\} dz' \end{cases} \quad (13)$$

[0069] 在这里,如果假设 $\theta_n(z) = \gamma z$ 、 $n_{\text{eff},m} = n_{\text{eff},n}$,则多芯光纤的纤芯间的相位差可以如下述算式(14)所示进行表示。

$$[0070] \quad \delta\phi_{nm}(z, \lambda) = \phi_m(z) - \phi_n(z)$$

$$[0071] \quad = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},m} z - \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},n} \left(z + \frac{D_{nm}}{\gamma R} \sin \gamma z \right) \quad (14)$$

$$[0072] \quad = -\frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},n} \frac{D_{nm}}{\gamma R} \sin \gamma z$$

[0073] 此时,由于在使用上述假设的情况下,等价传输常数差的零点成为 $\gamma z = \pi(n_{\text{zero}} - 1/2)$,所以上述算式(14)可以改写为下述算式(15)。即,可以表示为

$$[0074] \quad \delta\phi_{nm}(\lambda) = \pm \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff},n} \frac{D_{nm}}{\gamma R} \quad (15)$$

[0075] 在这里,图3示出将 $n_{\text{eff},n}$ 设为1.444、将 γ 设为 $2\pi \cdot 0.1$ (rad/m)、将 D_{nm} 设为45 μm 、将R设为140mm的情况下的波长和 $\delta\phi_{nm}(\lambda)$ 的关系的例子。如图3所示,在10nm的波长范围中,零点处的纤芯间相位差变化大约3周。如上所述,可以通过使测定所使用的波长改变,来产生充分的相位差的变化。

[0076] 此外,在上述说明中,由于为了使说明简化,而使用R恒定、 $\theta_n(z) = \gamma z$ 这样的条件,所以等价传输常数差的零点处的相位差收敛为算式(15)的2个模式。但是,在实际的多芯光纤中,R并非沿长度方向而呈现理想化的恒定,扭转度也不恒定。因此,通过波长变化,在光纤长度方向的各个等价传输常数差的零点处,纤芯间的相位差变化。由此,对于串扰的值,也得到波动符合统计学分布的值。

[0077] 在这里,一边使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含所述特定波长在内的一定范围内变化(波长扫描),一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,使用该结果得到串扰

的统计学分布,在这种情况下,可能成为问题的是耦合系数的波长相关性。

[0078] 作为一个例子,针对多芯光纤的耦合系数的波长相关性,在图4中示出波长和串扰分布的平均值 XT_{μ} 的关系。

[0079] 可知以对数坐标表示的 XT_{μ} 相对于波长而为大致线性的。该光纤是耦合系数的波长相关性较大的光纤,但尽管如此,根据图4,可知将 $10 \cdot \log_{10}XT_{\mu}$ 相对于波长的斜率抑制为小于或等于大约0.14dB/nm。

[0080] 在这里,如果将基准波长 λ_0 处的 XT_{μ} 设为 XT_{μ, λ_0} ,假定以对数坐标表示的串扰分布的平均值相对于波长是线性的,则可以表示为下述算式(16)。此外,在这里,S是 XT_{μ} 相对于波长的系数。

$$[0081] \quad XT_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{\frac{S(\lambda - \lambda_0)}{10}} \quad (16)$$

[0082] 此时,在照射基准波长 $\lambda_0 \pm \lambda_{dev}$ 的波长范围的入射光的情况下,波长扫描幅度 λ_{range} 为 $2\lambda_{dev}$, XT_{μ} 在下述算式(17)的范围内变化。

$$[0083] \quad XT_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}} \leq XT_{\mu} \leq XT_{\mu, \lambda_0} \cdot 10^{\frac{S\lambda_{dev}}{10}} \quad (17)$$

[0084] 即, XT_{μ} 在 $\pm S\lambda_{dev}$ dB的范围内变化。

[0085] 此时,通过波长扫描而测定的串扰分布的平均值 $XT_{\mu, meas}$,可以如算式(18)所示表示。

$$[0086] \quad XT_{\mu, meas} = 4\sigma_0^2 \frac{5 \left(10^{\frac{S\lambda_{dev}}{10}} - 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}} \right)}{S\lambda_{dev} \ln 10} = XT_{\mu, \lambda_0} \frac{5 \left(10^{\frac{S\lambda_{dev}}{10}} - 10^{-\frac{S\lambda_{dev}}{10}} \right)}{S\lambda_{dev} \ln 10} \quad (18)$$

[0087] 由此,通过波长扫描而测定的串扰分布的平均值 $XT_{\mu, meas}$ 和波长扫描的中心波长处的串扰分布的平均值 XT_{μ, λ_0} 的差异与 $S\lambda_{dev}$ 相关。即,并不与进行波长扫描的波长范围的宽度相关,而是与波长扫描范围中的串扰分布的平均值、或者耦合系数的变化量相关。

[0088] 在这里,波长扫描范围中的串扰分布的平均值的变化量 $S\lambda_{range} = S\lambda_{dev}$,与 $XT_{\mu, meas}$ 和 XT_{μ, λ_0} 的差分的分贝值之间的关系如图5所示。如果考虑到串扰的分布形状,则该波长范围中的串扰的值波动达到大于或等于20dB,因此,在求出其平均值的情况下,可以使误差小于或等于0.2dB,这一情况示出了测定精度较高,如果波长扫描范围中的 XT_{μ} 的变化小于或等于大约4.6dB,则可以以充分的精度对特定波长 λ_0 处的串扰的统计学分布的平均值 XT_{μ, λ_0} 进行测定。另外,相同地,可以求出从由统计学分布中的平均值、中值、众数、分位数及方差构成的组中选择的值。

[0089] 另外,在将测定出的波长和串扰的关系利用下述算式(19a)进行近似、或者将测定出的波长和串扰的分贝值的关系利用算式(19b)进行近似的情况下,如果 $2S\lambda_{dev}$ 小于或等于大约4.6dB,则可以以充分的精度对特定波长 λ_0 处的串扰的统计学分布的平均值 XT_{μ, λ_0} 进行测定。

$$[0090] \quad f_{lin}(\lambda) = XT_{lin} \cdot 10^{\frac{S(\lambda - \lambda_0)}{10}} \quad (19a)$$

$$[0091] \quad f_{dB}(\lambda) = XT_{dB} + S(\lambda - \lambda_0) \quad (19b)$$

[0092] 另外,串扰的概率分布形状自身也相同地,如果 $S\lambda_{range}$ 小于或等于大约4.6dB,则与 λ_{range} 为0dB的情况、即波长 λ_0 下的概率分布形状非常一致。在图6中,示出了由于 $S\lambda_{range}$ 不同

而导致的概率分布形状的差异。可知与 $2S\lambda_{\text{range}}$ 的变化对应地,概率分布形状变化。

[0093] 此外,即使在 $S\lambda_{\text{range}}$ 大于约4.6dB的情况下,也可以将测定出的串扰值作为母集合,求出概率密度分布,通过利用下述算式(20)表示的概率密度函数进行拟合,从而求出 XT_{μ, λ_0} 、即基准波长 λ_0 下的 $XT_{\mu} = 4\sigma^2$ 。

$$[0094] \quad f(x) = \begin{cases} \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{2S\lambda_{\text{dev}}} \left[\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}}\right) - \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}} \right) \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2 10^{-\frac{S\lambda_{\text{dev}}}{10}}}\right) \right] & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \end{cases} \quad (20)$$

[0095] (20)

[0096] 在这里,在图7中示出实际上一边使入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定的结果。测定出的波长范围为1620~1630nm,在该10nm的波长范围中进行2001个点的测定。在图8中示出将串扰的值作为概率分布而绘图后的结果。如图8所示,可知该概率分布确实如上述所示,遵循算式(12)。

[0097] 在这里,根据实际测量出的XT矢量,研究使XT平均值的测定波动充分小的条件。

[0098] 首先,在图9中示出将 λ_{range} 固定为10nm,改变采样值数量N的情况下的XT平均值的变化的绝对值。图9所示的各系列是与中心纤芯#1和外周纤芯#2~7的XT相关的数据,将各系列中分别以采样值数量N=2001进行测定时的XT平均值作为基准。图9中的实线是基于中心纤芯#1和外周纤芯#2~7的各实际测量值而得到的XT平均值,图9中的虚线是表示各实际测量值和XT平均值之间的波动的上限的线。在这里,根据图9可知,为了使XT平均值的变化的绝对值小于或等于1dB,需要大致为 $N \geq 130$ 。相同地,可知为了使XT平均值的变化的绝对值小于或等于0.5dB,需要大致为 $N \geq 200$,为了小于或等于0.2dB,需要大致为 $N \geq 300$,为了小于或等于0.1dB,需要大致为 $N \geq 380$ 。

[0099] 下面,在图10中示出在 λ_{range} 改变的情况下的XT平均值的变化的绝对值。在图10中,使用将波长步长设为5pm而测定出的数据。与 λ_{range} 的变化对应,N也变化, $\lambda_{\text{range}} = 2\text{nm}$ 下的N为401个,基于图9的结果,由于N的变化导致的XT平均值的变化的绝对值小于或等于0.1dB。此时,可知如果将 $\lambda_{\text{range}} = 10\text{nm}$ 时的XT平均值作为基准,则为了使XT平均值的变化的绝对值小于或等于0.5dB,需要大致为 $\lambda_{\text{range}} \geq 5.2\text{nm}$,为了小于或等于0.2dB,需要大致为 $\lambda_{\text{range}} \geq 8.8\text{nm}$ 。

[0100] 在这里,在考虑2个偏振模式的情况下,可以将算式(4)作为下述算式(21)表示。可以表示为

$$[0101] \quad \begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{\text{zero}}+1) \\ A_{n,y}(n_{\text{zero}}+1) \end{bmatrix} = T_n(n_{\text{zero}}) \begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{\text{zero}}) \\ A_{n,y}(n_{\text{zero}}) \end{bmatrix} + K \exp(j\phi_{\text{random}}) T_m(n_{\text{zero}}) \begin{bmatrix} A_{m,x}(n_{\text{zero}}) \\ A_{m,y}(n_{\text{zero}}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0102] 在这里, $A_{n,x}(n_{\text{zero}})$ 是第 n_{zero} 个等价传输常数差的零点后的纤芯n的电场复振幅的X轴偏振成分, $A_{n,y}(n_{\text{zero}})$ 是Y轴偏振成分。即,以下述算式(22)的形式成为琼斯矢量。以

$$[0103] \quad \begin{bmatrix} A_{n,x}(n_{\text{zero}}) \\ A_{n,y}(n_{\text{zero}}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

[0104] 的形式成为琼斯矢量。 $T_n(n_{\text{zero}})$ 是从刚经过第 n_{zero} 个等价传输常数差的零点后至即将为第 $n_{\text{zero}}+1$ 个等价传输常数差的零点之前的纤芯n的琼斯矩阵。

[0105] 在这里,算式(23)以相等方差的概率分布进行分布。

$$[0106] \quad \Re\{A_{n,x}(n_{\text{zero}})\}, \Im\{A_{n,x}(n_{\text{zero}})\}, \Re\{A_{n,y}(n_{\text{zero}})\}, \Im\{A_{n,y}(n_{\text{zero}})\} \quad (23)$$

[0107] 另外,即使将琼斯矢量乘以琼斯矩阵,也仅是偏振状态、即偏振的方向、X轴及Y轴的各偏振成分的相位改变,算式(23)的概率分布的方差不变。在各纤芯中琼斯矩阵当然不同,另外,通常在实际的多芯光纤中各零点间的琼斯矩阵也不同。在这里,如果与琼斯矩阵相乘的琼斯矢量的偏振状态变化,则作为琼斯矩阵和琼斯矢量的积而求出的琼斯矢量的偏振状态当然变化,输入和输出的琼斯矢量的偏振状态的相对变化量也变化。即,如果输入的偏振状态变化,则输入和输出之间的偏振的方向、X轴及Y轴的各偏振成分的相位变化的方式也变化。

[0108] 根据这一情况,可以通过改变输入光的偏振状态,而改变各零点处的X轴及Y轴的各偏振成分的纤芯n和纤芯m之间的相位差。

[0109] 因此,作为无需重新卷绕就可以取得多芯光纤的纤芯间串扰的统计学分布的直方图的方法,可以使用对串扰的偏振状态相关性进行测定的方法。

[0110] 在这里,如果一边使输入光的偏振状态以在邦加球上充分均匀地分布的方式进行变化,一边对串扰的值的变化的测定,则测定出的值的统计学分布成为此前说明的串扰分布。

[0111] 如上所述,根据本实施方式所涉及的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法,通过一边使向多芯光纤射入的入射光的波长在包含特定波长在内的一定范围内变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,从而可以得到纤芯间串扰的统计学分布。另外,对于一边使向多芯光纤射入的入射光的偏振状态变化,一边对该多芯光纤的纤芯间串扰进行测定,也可以得到纤芯间串扰的统计学分布。任一种方法都无需重新卷绕多芯光纤而使零点周边的纤芯间的相位差变更并测定串扰。由此,可以以更简单的方法对纤芯间串扰的特性进行分析。

[0112] 如上所示,根据本发明,可以提供一种能够利用更简单的方法对纤芯间串扰的特性进行分析的多芯光纤的纤芯间串扰的测定方法。

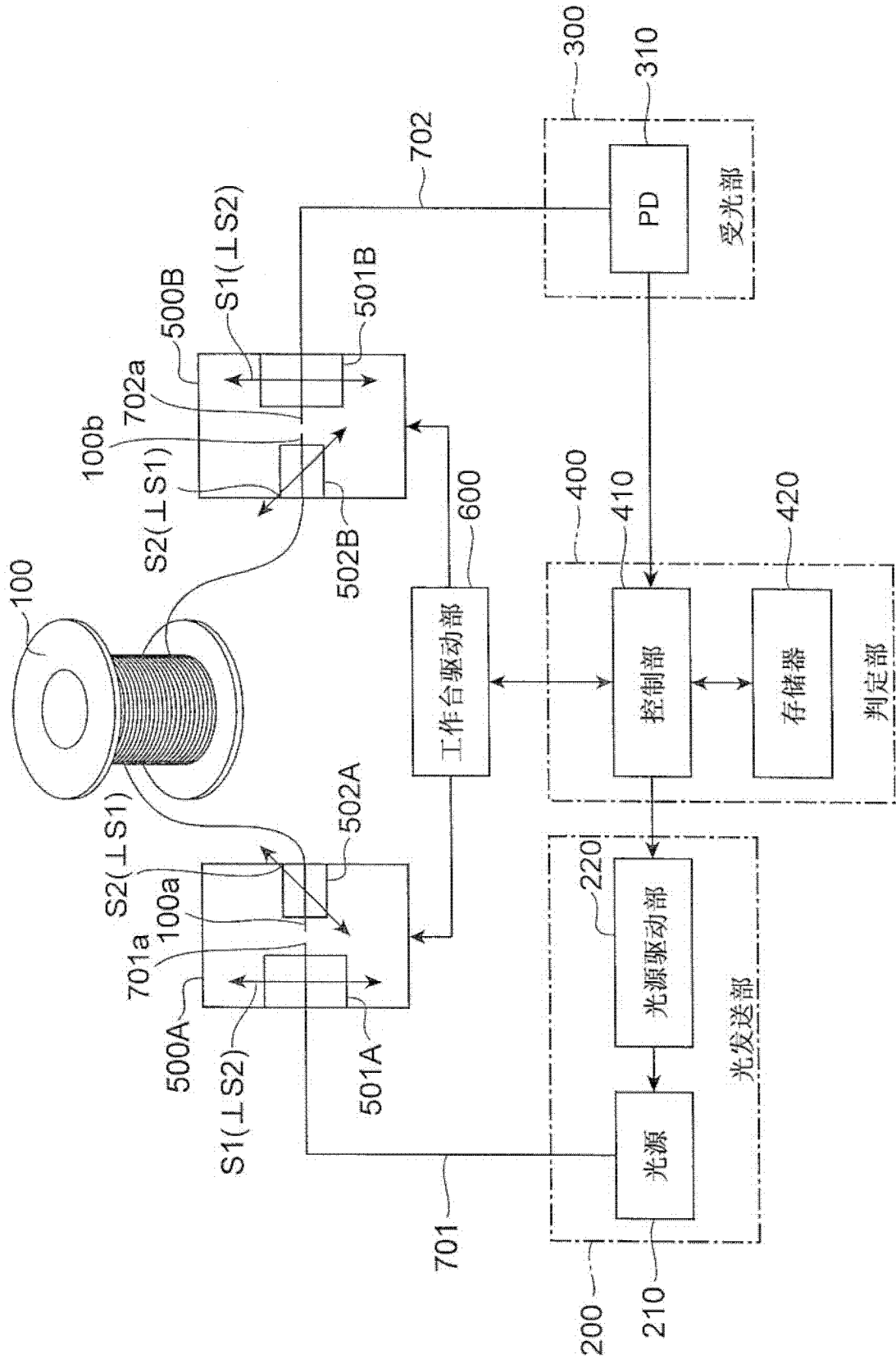


图1

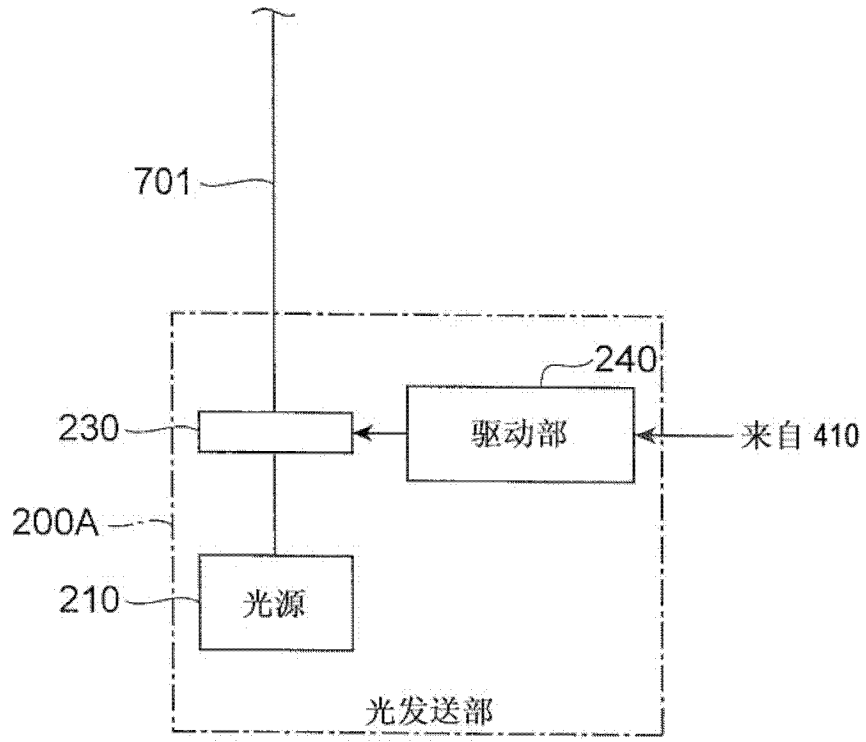


图2

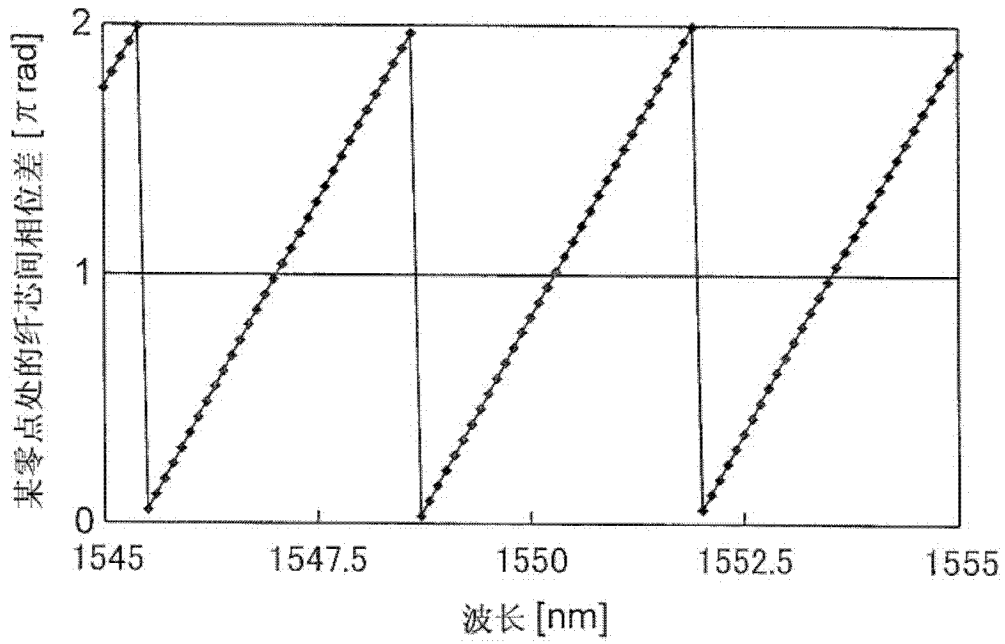


图3

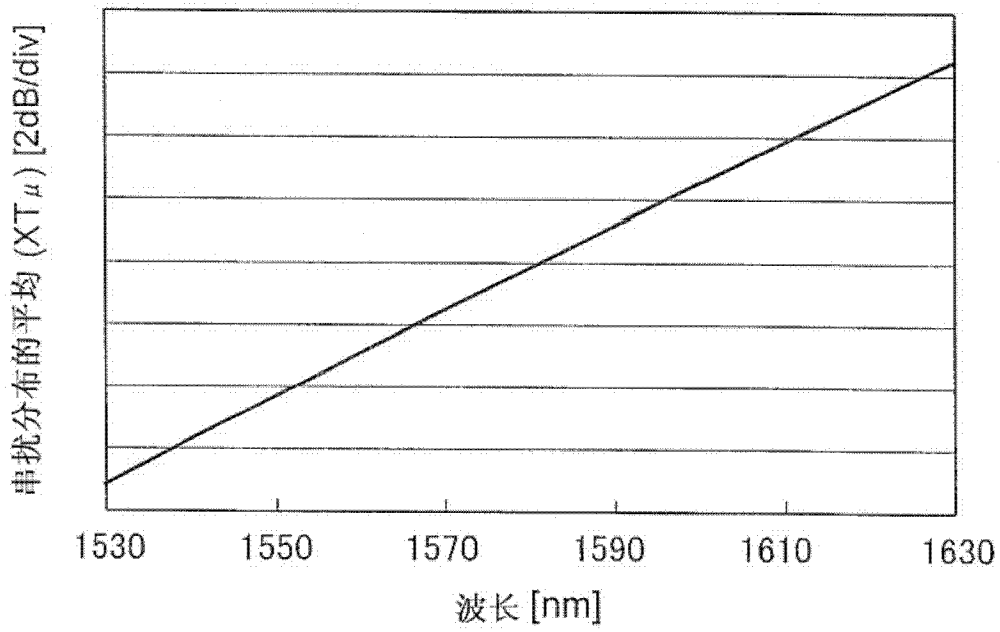


图4

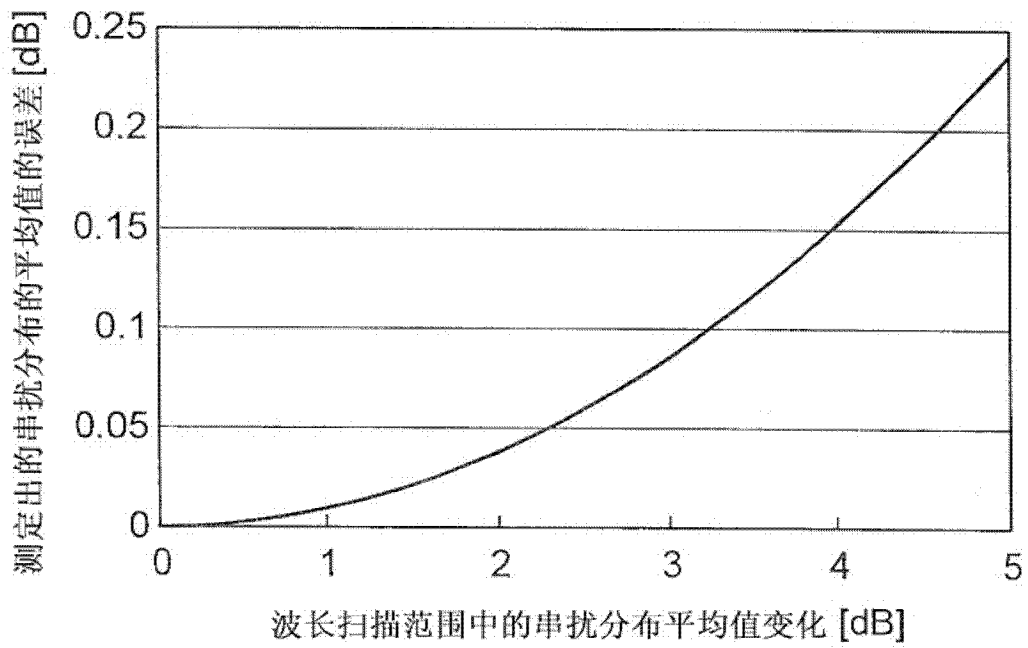


图5

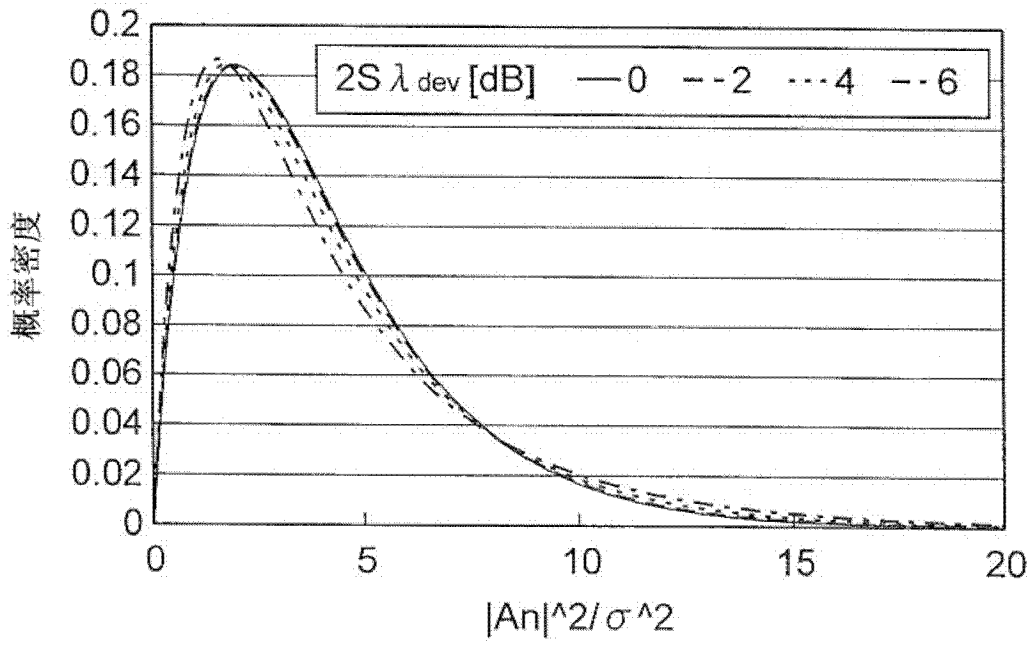


图6

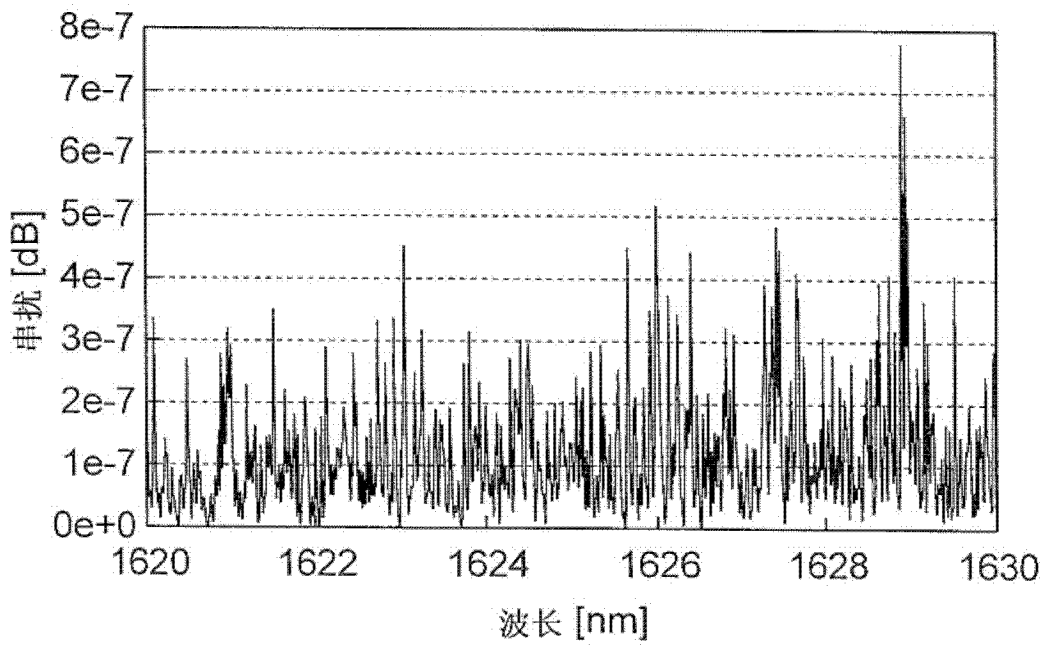


图7

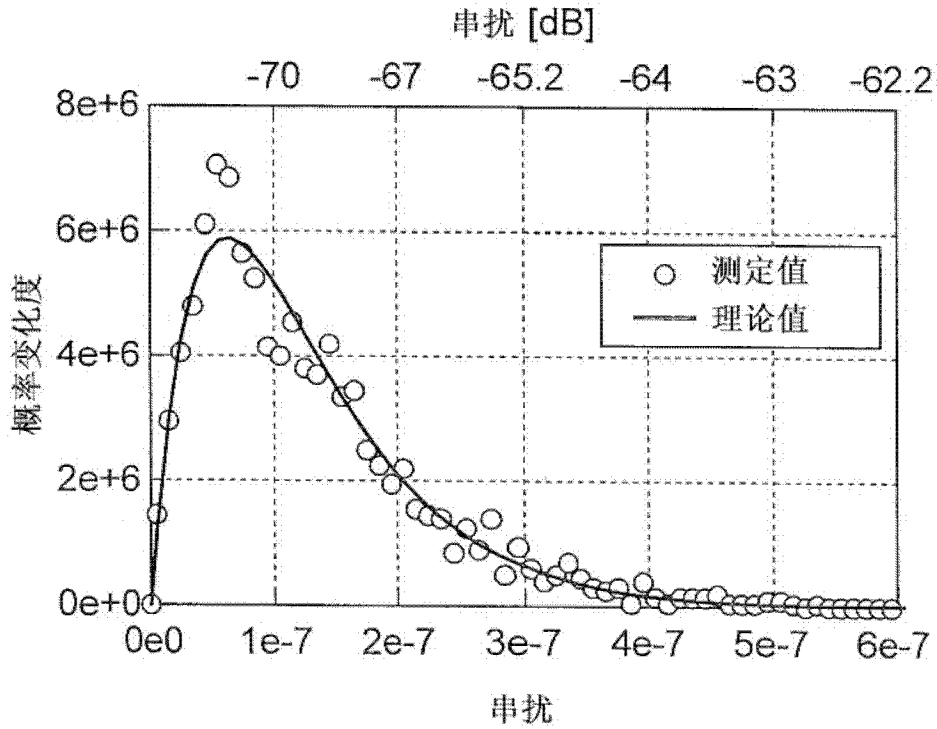


图8

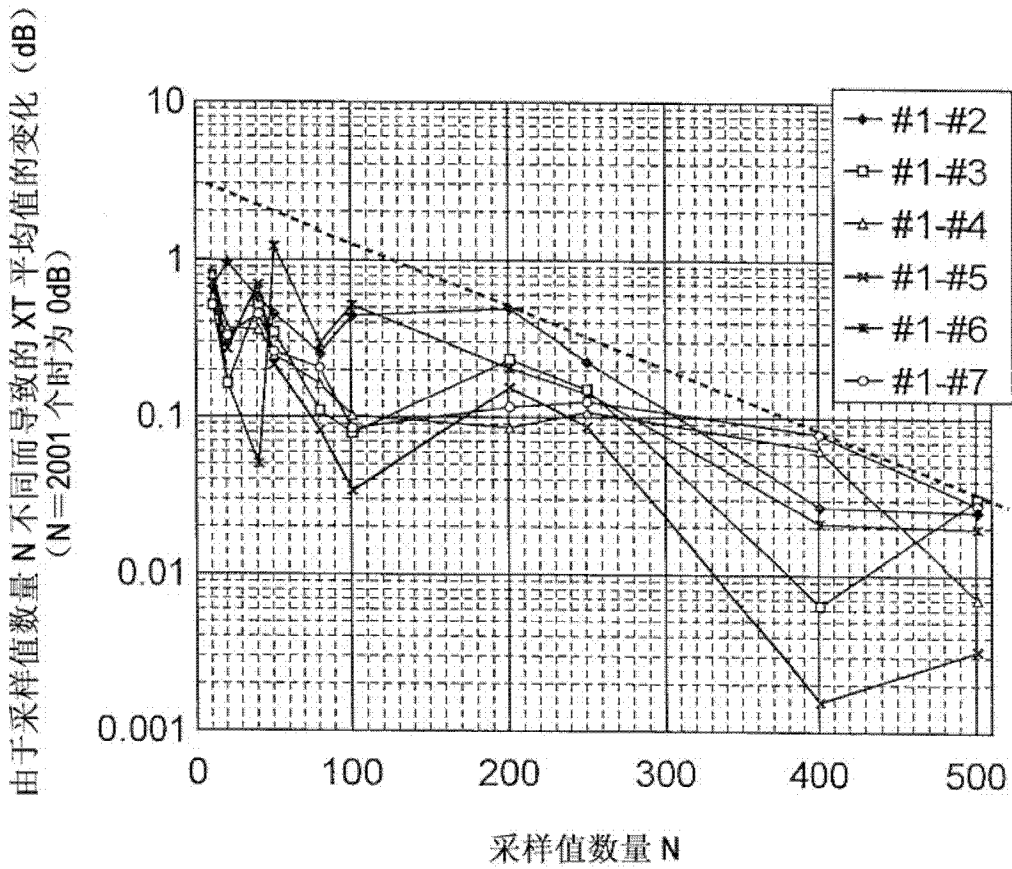


图9

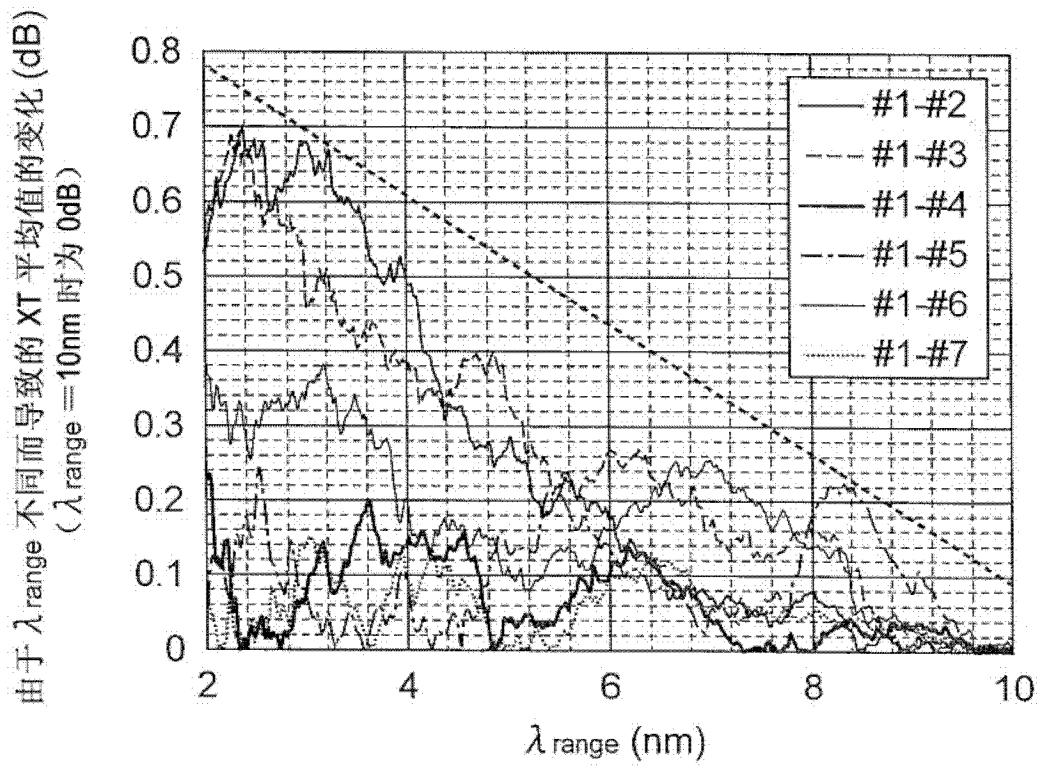


图10