(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 1736048 B
(45)授权公告日 2012.08.22

(21)申请号 200480001975.0

(22)申请日 2004.01.23

(30)优先权数据
23973/2003 2003.01.31 JP

(85)PCT申请进入国家阶段日
2005.07.08

(86)PCT申请的申请数据
PCT/JP2004/000589 2004.01.23

(87)PCT申请的公布数据
WO2004/068747 JA 2004.08.12

(73)专利权人 独立行政法人科学技术振兴机构
地址 日本埼玉县

(72)发明人 广冈俊彦 中沢正隆

(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司 72002
代理人 黄剑锋

(51)Int.Cl.
H04B 10/18(2006.01)

(56)对比文件
EP 1171968 B1,2002.11.20, 说明书第16栏5-12行,40-41行,说明书第18栏15-22行,34-41行,说明书第19栏2-18行,附图1,2.
JP 2001-111490 A,2001.04.20, 全文.

审查员 范晓寒

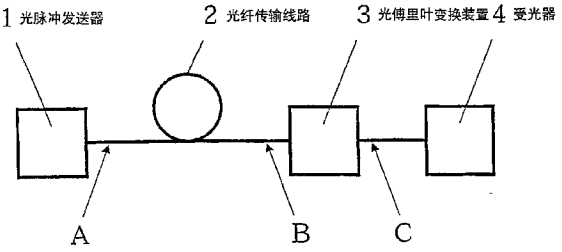
权利要求书 1 页 说明书 9 页 附图 6 页

(54)发明名称

光传输方法

(57)摘要

本发明利用即使在时间轴上发生完全线性失真,波谱形状也可被完全保存的性质来补偿波形失真。从光脉冲发送器(1)通过光纤传输线路(2)而被传输的光脉冲被发送。光傅里叶变换装置(3)通过入射光脉冲、将时间轴上的光脉冲向频率轴上进行光傅里叶变换、变换频率和时间,在时间轴上再现光脉冲的频谱,由此补偿光纤传输线路(2)上的线性效应产生的波形失真。受光器(4)接收来自光傅里叶变换装置(3)的光脉冲,通过将其变换为电信号获得光纤传输线路(2)的传输前的脉冲波形。



CN 1736048 B

1. 一种光传输方法，在发送端将光脉冲作为传输信号进行数字调制，在光纤传输线路中传输，在受光器中将其变换为电信号，其特征在于，

作为被传输的光脉冲，使用时间波形的函数形式与该脉冲的频谱的包络线的函数形式相同、并且半高全宽和频谱宽度的积满足傅里叶极限条件的变换极限脉冲；

在受光器前设置光傅里叶变换装置，该光傅里叶变换装置在时间轴上对时间波形及该频谱进行替换，

利用在线性传输中即使时间波形失真、频谱的包络线在传输前后也无失真这一情况，通过该光傅里叶变换装置对传输后的失真信号脉冲的时间波形进行傅里叶变换，变换为时间波形用频谱的包络线来表现的无失真的传输波形。

2. 如权利要求 1 所述的光传输方法，其特征在于，

通过所述光傅里叶变换装置，造成光纤中的脉冲失真的三次或更高次色散被完全补偿。

3. 如权利要求 1 所述的光传输方法，其特征在于，

通过所述光傅里叶变换装置，即使任意次的色散、或偏振模色散随时间有变动，也总是实现无失真光传输。

光传输方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光传输方法，特别地，涉及通过对在有着三次以上的高次色散和随时间变动的任意色散及偏振模色散、定时抖动的光纤中传输的信号波形失真进行傅里叶变换，进行同时且完全补偿的新型光传输方法。

背景技术

[0002] 众所周知，光纤中的波长色散和偏振色散等线性效应会产生脉冲扩大和波动并带来中心时间位置的偏移等时间波形的失真。特别是在 1 通道附近的 40Gbit/s 以上的超高速时分复用传输中，三次以上的高次色散和偏振模色散产生的波形失真会造成较大影响。

[0003] 以往，为了补偿这种光纤传输线路的线性失真效应，相继提出了源自色散补偿光纤和光栅的二次色散补偿、源自反色散斜度光纤（スロープファイバ）的二次、三次色散的同时补偿、利用相位共轭元件的色散补偿等方案，实现了等价的色散平坦光纤传输线路。

[0004] 现有技术中，作为三次和四次色散的补偿技术，迄今为止有来自 Pelusi 等人报告的通过传输前通过有着适当的二次色散量的光纤向信号施加线性啁啾后，通过施加对应于传输光纤的三次或四次色散的大小的正弦或余弦相位调制，对各次的色散分别进行补偿的技术（参照专利文献 1、非专利文献 1 和 2）。进一步，作为现有技术，有通过适当选择余弦相位调制的振幅和定时，可以同时补偿传输线路的三次、四次色散的报告，由此成功地做到了 1.28 Tbit/s-70km 光分时传送（参照非专利文献 3 和 4）。此外，现有技术中还提出了为了补偿源自偏振模色散的群延迟而进行光傅里叶变换的方案（专利文献 2、非专利文献 5）。

[0005] 专利文献 1

[0006] 日本专利申请特开 2001-111490

[0007] 专利文献 2

[0008] 日本专利申请特表 2002-541720

[0009] 非专利文献 1

[0010] M.D.Pelusi，Y.Matsui 和 A，Suzuki，″ Phase modulation ofstretched optical pulses for suppression of third-order dispersion effectsin fiber transmission，″（用于抑制光纤传输中的三次色散效应的延展光学脉冲的相位调制）Eletron.Lett.Vol.34，第 1675-1677 页（1998 年）

[0011] 非专利文献 2

[0012] M.D.Pelusi，Y.Matsui，和 A，Suzuki，″ Fourth-order dispersionsuppression of ultrashort optical pulses by second-order dispersion andcosine phase modulation，″（通过二次色散和余弦相位调制的超短光学脉冲的四次色散抑制）Opt.Lett.Vol.25，第 296-298 页（2000 年）

[0013] 非专利文献 3

[0014] T.Yamamoto 和 M.Nakazawa，″ Third-and fourth-order activedispersion compensation with a phase modulator in a terabit-per-secondoptical

time-division multiplexed transmission," (在每秒兆兆位的光时分复用传输中利用相位调制器进行的三次和四次有源色散补偿)Opt.Lett.Vol.26,第647-649页(2001年)

[0015] 非专利文献4

[0016] M.Nakazawa,T.Yamamoto和K.R.Tamura," 1.28 Tbit/s-70kmOTDM transmission using third-and fouth-order simultaneousdispersion compensation with a phase modulator, " (使用通过相位调制器的三次和四次同时色散补偿的1.28 Tbit/s-70km OTDM传输)ECOC 2000,PD.2.6

[0017] 非专利文献5

[0018] M.Romagnoli,P.Franco,R.Corsini,A.Schffini和M.Midrio, " Time-domain Fourier optics for polarization-mode dispersioncompensation, " (用于偏振模色散补偿的时域傅里叶光学器件)Opt.Lett.Vol.24,第1197-1199页(1999年)

发明内容

[0019] 然而,通过光纤进行的色散补偿虽然简便,但由于包含了达到三次色散的波长色散的统一补偿需要匹配二次色散和三次色散的比率,因此通常被认为是很难的技术。此外,使用相位共轭时,还存在只有偶数次的色散可以补偿的重大课题。并且使用相位调制的传输前色散补偿方式在调整相位调制时需要事先正确地了解传输线路全体的色散值。

[0020] 并且,这些方式中的色散补偿量是固定的,因此不能根据色散值在时间上的变动动态地改变色散补偿量。所以,自始就需要适应均衡的技术。并且通过这些方式都不能进行偏振模色散的补偿。

[0021] 所以本发明鉴于上述要点,为了一举解决这些难题,本发明的目的是,使用即使在时间轴上产生完全线性失真,也可完全保存波谱形状的特性来补偿波形失真,以代替以往的意图在时间轴上完全补偿波形失真的技术。也就是说,本发明通过傅里叶变换,将传输后的光信号的波谱形状变为在时间轴上的1比特来再现完全没有或几乎没有线性失真的原来的信号波形,以实质性地实现无色散的光纤传输。

[0022] 根据本发明的解决手段,提供了一种光传输方法,在发送端将光脉冲作为传输信号进行数字调制,在光纤传输线路中传输,在受光器中将其变换为电信号,其特征在于,作为被传输的光脉冲,使用时间波形的函数形式与该脉冲的频谱的包络线的函数形式相同、并且半高全宽和频谱宽度的积满足傅里叶极限条件的变换极限脉冲;在受光器前设置光傅里叶变换装置,该光傅里叶变换装置在时间轴上对时间波形及该频谱进行替换,利用在线性传输中即使时间波形失真、频谱的包络线在传输前后也无失真这一情况,通过该光傅里叶变换装置对传输后的失真信号脉冲的时间波形进行傅里叶变换,变换为时间波形用频谱的包络线来表现的无失真的传输波形。

[0023] (发明效果)

[0024] 因为通过利用本发明可以同时且完全地、或者几乎完全地补偿以往补偿困难的三次以上的高次色散,和任意色散、偏振模色散的时间变动造成的时间波形线性失真,所以可以实现扩大光纤通信的通信容量和延长传输距离。

[0025] 此外,通过利用本发明,可以实现不需要光纤色散和偏振模色散的精密补偿的经济实用的光纤通信。

附图说明

[0026] 图 1 表示的是本发明的傅里叶光传输系统的实施形态的图。

[0027] 图 2 是关于光脉冲的时间波形的说明图。

[0028] 图 3 是关于光脉冲的频谱形状的说明图。

[0029] 图 4 是光傅里叶变换装置 3 的结构图。

[0030] 图 5 表示的是光脉冲的波形失真及其补偿效果的图。

[0031] 图 6 表示的是光脉冲的波形失真和与其补偿相关的数值计算结果的另一例的图。

具体实施方式

[0032] 以下通过附图详细说明本发明的实施形态。

[0033] 1. 系统的结构、动作

[0034] 图 1 是表示本发明的傅里叶光传输系统的一个实施形态的图。该傅里叶光传输系统具备光脉冲发送器 1、光纤传输线路 2、光傅里叶变换装置 3 和受光器 4。作为光接收器的光传输装置具备光傅里叶变换装置 3 和受光器 4。

[0035] 光脉冲发送器 1 通过将从光源产生的光脉冲以电信号进行数字调制，把载有作为通信对象信息的电信号变换为光信号，将载有该信息的光脉冲串射向光纤传输线路 2 之中。这里，信号脉冲的脉宽及其谱宽之积最好能满足傅里叶极限条件（设谱宽为 Δν、时间脉宽为 Δτ，比如在高斯型脉冲条件下$\Delta\nu\Delta\tau \fallingdotseq 0.441$、sech 型脉冲条件下$\Delta\nu\Delta\tau \fallingdotseq 0.315$）。如此，具有对时间波形来说谱宽一切得当的光脉冲被称为傅里叶极限（フーリエ限界）脉冲（以后称为变换极限型脉冲），利用该光脉冲即可以实现最佳性能的、理想的傅里叶光传输。

[0036] 光纤传输线路 2 是具有任意色散和偏振模色散的、由各种光纤构成的传输线路。这些色散量可以伴随有时间上的变化。

[0037] 光傅里叶变换装置 3 射入通过光纤传输线路 2 而被传输的光脉冲，向频率数轴上的波谱进行时间轴上的脉冲信号序列的傅里叶变换。此外，在高速时分复用信号的情况下，光傅里叶变换装置 3 多重分离为低速信号后可以实施傅里叶变换。

[0038] 受光器 4 接收通过光傅里叶变换装置 3 而在光纤传输线路 2 上对色散和偏振模色散进行补偿后的光脉冲，将其转变为电信号。受光器 4 比如可以采用，PIN 和 APD 等的适宜的光检测器。

[0039] 其次，对该傅里叶光传输系统的动作概要进行说明。通过光纤传输线路 2 传输的光信号通常被输入光时分复用的信号。对于本实施形态的动作，将关注于向光傅里叶变换装置 3 输入构成时分复用信号的光脉冲串、构成光脉冲串的各脉冲并进行说明。

[0040] 图 2 为有关光脉冲时间波形的说明图。图 2(a) ～ (b) 分别表示的是图 1 中的光纤传输线路 A ～ C 各部分的光脉冲时间波形的概略图。

[0041] 此外，图 3 为有关光脉冲频谱形状的说明图。图 3(a) ～ (c) 分别表示的是图 (1) 中的光纤传输线路的 A ～ C 各部分的光脉冲频谱概略图。

[0042] 首先，通过光脉冲发送器 1 将电信号转换为光脉冲，将该光脉冲射入光纤传输线路 2，在光纤传输线路 2 中传输。在此时向光纤传输线路 2 入射时，为了使光脉冲的时间波

形 $u_{in}(t)$（图 2(a)）为傅里叶极限脉冲（变换极限脉冲），最好在光脉冲发送器 1 上事先对频谱 $U_{in}(\omega)$ 进行修正（图 3(a)）。

[0043] 在光纤传输线路 2 中传输的光脉冲通常会受到光纤传输线路 2 具有的色散和偏振模色散造成的复杂线性失真。这种失真在通常的光通信中决定传输性能。然而在本实施形态中，主要的特征之一是，为了不使光纤传输线路 2 具有的色散和偏振模色散在向光纤传输线路 2 入射时的波谱包络线形状产生任何变形，可以在频率数轴上再现完全的原波形。光纤中的色散效果变换为波谱的各频率成分的相移，但通过光检测器只是检测出包络线，所以该相移没有任何问题。也就是说，要点是设在光纤传输线路 2 上接受了线性失真的时间信号为 u(t)（图 2(b)），则通过光傅里叶变换装置的其频谱 u(ω)（图 3(b)）在时间轴上被再生。

[0044] 换言之，被传输的光脉冲的时间波形经过光傅里叶变换装置 3，通过变换时间和频率、将该光脉冲的频谱在时间轴上再生，可以在输出端上完全再现（图 2(c)）图 1 中 A 的向光纤传输线路 2 发送的入射光脉冲频谱（图 3(a)）。通过了光傅里叶变换装置 3 的光脉冲在受光器 4 的作用下再次被转换为电信号，作为信号被取出。我们将这种光传输方式命名为“傅里叶光传输”。

[0045] 图 4 是光傅里叶变换装置 3 的结构图。光傅里叶变换装置 3 具有光耦合器 5、时钟信号提取电路 6、移相器 7、电子放大器 8、延迟光纤 9、相位调制器 10、二次色散元件 11。

[0046] 作为相位调制器 10，例如，最好使用利用 $LiNbO_3$ 等的电光效应的相位调制器。或者相位调制器 10 也可使用 EA(Electro-Absorption：电吸收）和 SOA(Semiconductor Optical Amplifier：半导体光放大器）等的相位调制效应。虽然通常对偏振波有依赖性的相位调制器 10 较多，但采用无偏振波形的光器件或者基于偏振分集（偏波ダイバーシティー）的方法谋求无偏振波为优选。相位调制器 10 的驱动频率为该脉冲传输的传输速度。

[0047] 相位调制器 10 为了在光纤传输线路 2 的传输后的脉冲上同步地施加相位调制，通过光耦合器 5 将部分光传输信号分开，将其中一方导向延迟光纤 9，将另一方导向时钟信号提取电路 6。时钟信号提取电路 6 提取传输信号中含有的时钟信号（正弦波信号），用获得的时钟频率通过移相器 7 和电子放大器 8 驱动相位调制器 10。移相器 7 和延迟光纤 9 在此时起到使相位调制与光脉冲最佳同步地被施加的作用。如果由于温度等原因调制的定时产生偏差时，移相器 7 可以自动调节相移量、使用施加最佳调制的技术。电子放大器 8 根据移相器 7 的输出而输出用于驱动相位调制器 10 的驱动信号。

[0048] 此外，作为二次色散元件 11，例如可以使用具有在 1.3μm 的波长频带附近存在零色散区域的群速度色散特性的单模光纤或衍射光栅对、光纤布拉格光栅、VIPA 型可变色散补偿器、阵列波导衍射光栅、以及衍射光栅和空间调制器的组合等。

[0049] 光傅里叶变换装置单体如同专利文献 2 和非专利文献 5 中记载的关于光傅里叶变换的 Romagnoli 等人的论文那样，原本为补偿源自偏振模色散的群时延而被提出的。但在 Romagnoli 等人论文等以往技术中，只是将光傅里叶变换装置仅仅用在补偿偏振模色散上。所以，如同本实施形态的光傅里叶变换装置 3 那样，作为新的一般概念，通过变换时间和频率传输无失真的想法在以往技术中并未实现。本发明特别是提出了通过将时间轴上的失真在波谱上变换，而去除了所有线性失真的傅里叶光传输这种新原理和技术。

[0050] 1. 有关波形失真补偿的细节

[0051] 下面详细说明利用本傅里叶光传输方式，具有任意色散和偏振模色散的光纤传输线路的线性效应所产生的光脉冲波形失真在本实施形态的结构中是如何被补偿的。

[0052] 光纤中的脉冲传输与其载波频率相比，脉冲的包络线缓慢变化时，以近似包络线的形式被记述。在这里设该脉冲的缓慢变化电场包络线增幅定为 u(z,t)、介质中的传递常数为 β(ω)、载波的频率为 ω_0。在这里，t 为时间、z 为光纤长度方向的位置（坐标）、ω 为频率。这时光纤中传输的电场 e(z,t) 为

[0053] $e(z,t) = u(z,t)\exp[i(\beta(\omega)z-\omega_0 t)]$ (1)

[0054] 这里，给出

[0055] $$\beta = \beta_0 + \beta_1(\omega-\omega_0) + \frac{\beta_2}{2!}(\omega-\omega_0)^2 + \frac{\beta_3}{3!}(\omega-\omega_0)^3 + \cdots$$

[0056] $$= \beta_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{\beta_n}{n!}(\omega-\omega_0)^n \quad (2)$$

[0057] 其中，

[0058] $$\beta_0 = \beta(\omega_0), \beta_1 = \left.\frac{\partial\beta}{\partial\omega}\right|_{\omega_0}, \beta_2 = \left.\frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2}\right|_{\omega_0}, \beta_3 = \left.\frac{\partial^3\beta}{\partial\omega^3}\right|_{\omega_0}, \cdots, \beta_n = \left.\frac{\partial^n\beta}{\partial\omega^n}\right|_{\omega_0}$$

[0059] 在光纤这样的色散性介质中，光电场 e(z,t) 满足麦克斯韦方程式

[0060] $$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} - \frac{\beta^2}{\omega_0^2}\frac{\partial^2 e}{\partial t^2} = 0 \quad (3)，$$

[0061] 所以光电场 e(z,t) 的频谱 E(z,ω) 满足下面的方程式（频谱是单波谱的情况下）。

[0062] $$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \beta^2(\omega)E = 0 \quad (4)$$

[0063] 在这里 E(z,ω) 由

[0064] $$E(z,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e(z,t)\exp(i\omega t)dt \quad (5)$$

[0065] 给出。

[0066] 在公式 (4) 中，与载波频率相比，脉冲的波谱扩大并不大，因此 ω^2 与 ω_0^2 近似。

[0067] 此时包络线 u(z,t) 相关的方程式很重要，考虑 u(z,t) 的傅里叶变换 U(z,ω−ω0)。就是说，E(z,ω) 可以根据式 (1) 和 (5) 改写成

[0068] $E(z,\omega) = U(z,\omega-\omega_0)\exp(i\beta(\omega_0)z)$ (6)

[0069] 其中 U(z,ω−ω0) 由

[0070] $$U(z,\omega-\omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} u(z,t)\exp[i(\omega-\omega_0)t)dt \quad (7)$$

[0071] 给出。

[0072] 将式 (6) 代入式 (4)，由于 U(z,ω−ω0) 与 z 相关地缓慢的变化，所以可以忽略对于 z 的两次微分，若使用 $\beta^2-\beta_0^2 \fallingdotseq 2\beta_0(\beta-\beta_0)$，作为 U(z,ω−ω0) 可满足的传输方程式，可以得出下面的公式：

[0073] $$\frac{\partial U}{\partial z}=i[\beta(\omega)-\beta_0]U \qquad (8)$$

[0074] 在此如果考虑时间区域的基本方程式，则通过公式 (2) 可用下式来表示：

[0075] $$i\frac{\partial U}{\partial z}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\beta_n}{n!}(\omega-\omega_0)^n U=0 \qquad (9)$$

[0076] 进一步通过对公式 (9) 进行反傅里叶变换，作为 u(z，t) 满足的线性波动方程式，最终得到

[0077] $$i\frac{\partial U}{\partial z}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{i^n\beta_n}{n!}\frac{\partial^n u}{\partial t^n}=0 \qquad (10)$$

[0078] 其中，在这里为

[0079] $$u(z,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}U(z,\omega-\omega_0)\exp[-i(\omega-\omega_0)t]d(\omega-\omega_0) \qquad (11)$$

[0080] （在后面再次将 $\omega-\omega_0$ 定义为 ω）。也就是传输线路的线性效应所得到的脉冲的时间波形失真可以用公式 (10) 完全表现出来。

[0081] 另一方面，希望对通常在所有线性效应下，光信号在频率区域只是受到相位变化，波谱形状被完全保存下来（参照下面的式 (12)）予以关注。在此，设由光脉冲发送器 1 向光纤传输线路 2 中射入的长度 z = ξ 的光脉冲时间信号波形为 $U_{in}(t)$（= u(0，t)），其频谱为 $U_{in}(\omega)$（= U(0，ω)，在光纤传输线路 2 中受到线性失真的时间信号波形为 u(t)（= u(z，t)）、其频谱为 U(ω) = U(z，ω)。将公式 (8) 进行积分，传输长度 ξ 的光纤后的波谱可以由

[0082] $$U(\xi,\omega)=U_{in}(\omega)\exp[i\beta(\omega)\xi] \qquad (12)$$

[0083] 给出。也就是，可以看出，除了相位变化 exp[iβ(ω)ξ] 之外，波谱形状完全被保存下来。

[0084] 那么，在此由长度为 ξ 的光纤传输线路 2 的接收端 B 上的时间波形 u(ξ，t)，利用光傅里叶变换装置 3 得出频谱 (ξ，ω) 的方法在下面描述。但下面将 u(ξ，t) 设为 u(t)、将 U(ξ，ω) 设为 U(ω)。

[0085] 首先，传输后的脉冲信号 u(t) 受到在相位调制器 10 的作用下的抛物线型相位调制 $\exp(iKt^2/2)$ 之后的时间信号，其相位变化量乘以 u(t)，由

[0086] $$u'(t)=u(t)\exp(iKt^2/2) \qquad (13)$$

[0087] 给出。相位调制器 10 的输入输出波形中，输入为 u(t)、输出为式 (13) 的 u'(t)。相位调制器 10 的处理相当于在式 (13) 的右边在输入波形 u(t) 上乘以相位 $\exp(iKt^2/2)$ 的部分。事先施加于相位调制器 10 的参数为啁啾率 K。它可以通过相位调制器的施加电压的大小来控制。此外，关于相位调制的定时和驱动频率，利用时钟信号提取电路 6 和移相器 7、光时延光纤 9，由传输信号提取、调整这些信息。

[0088] 在此将 v(t) 设为通过二次色散元件 11 而在色散 k″ L 中传输后的信号，v(t) 作为 u'(t) 进一步以 D = k"L 表示的传输二次色散（元件）后的时间波形，表示如下。

[0089] $$v(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty}U(t')\exp[iKt'^2/2]\exp(i\omega t')dt'\right]\exp(iD\omega^2/2)\exp(-i\omega t)d\omega$$

[0090] $$= \frac{1}{2\pi}\iint u(t')\exp\left[iD\omega^2/2 + i\omega(t'-t) + iKt'^2/2\right]dt'\,d\omega \qquad (14)$$

[0091] 也就是说，二次色散元件 11 的输入输出波形中，输入为式 (13) 的 u’ (t)、输出为式 (14) 的 v(t)，v(t) 可以通过将 u’ (t) 进行傅里叶变换后在频率数轴上乘以二次色散函数 $\exp(iK\omega^2/2)$ 后，进一步对其整体进行反变换后得出。在此，二次色散函数可以根据式 (12) 中使 β (ω) 为 $\beta(\omega) = D\omega^2/2$ 得出。

[0092] 其次，在此选择该相位调制器的相位调制参数 K，以满足 K = 1/D。进一步若导入变数 T = t’ -t，则式 (14) 即变形为下面的公式。

[0093] $$v(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} u(t+T)\exp\left[i(t+T)^2/2D\right]dT \int_{-\infty}^{\infty}\exp\left[iD\omega^2/2 + i\omega T\right]d\omega$$

[0094] $$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} u(t+T)\exp\left[i(t+T)/2D\right]dT \int_{-\infty}^{\infty}\exp\left[iD(\omega + T/D)^2/2 - iT^2/2D\right]d\omega$$

[0095] $$= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} u(t+T)\exp[i(t^2+2Tt)/2D]\sqrt{2\pi/iD}\,dT$$

[0096] $$= \frac{1}{\sqrt{2\pi iD}}\exp(it^2/2D)\int_{-\infty}^{\infty} u(t+T)\exp(iTt/D)dT$$

[0097] $$= \frac{1}{\sqrt{2\pi iD}}\exp(-iKt^2/2)U(t/D) \qquad (15)$$

[0098] 也就是说，从式 (15) 的结果可以看出，光傅里叶变换装置 3 的输出时间波形 v(t) (图 2(c)) 实际上与光傅里叶变换装置 3 的输入波形的波谱 U(ω) 是成比例的。这时有

[0099] $$\omega = t/D \qquad (16)$$

[0100] 换言之，光傅里叶变换装置 3 的输出时间波形 v(t)，对应于时间轴为 t/D = ω 变换比例时的、光傅里叶变换装置 3 的输入波形的波谱形状 U(ω)。

[0101] 另一方面，如式 (12) 所示的，线性传输由于保存了波谱这样的性质，所以在接收端 B 上的波谱 U(ω) 的包络线形状 (图 3(b)) 等于在发送端 A 上的信号的波谱 U(0，ω) (= $U_{in}(\omega)$) 的包络线形状 (图 3(a))。也就是说，通过式 (12) 和式 (15)，v(t) 最终使用向光纤传输线路 2 发送的输入信号波谱 U_{in} 如式 (17) 所示地表示出来。

[0102] $$v(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi iD}}U_{in}(t/D)\exp\left(-iKt^2/2 + i\beta(t/D)\xi\right) \qquad (17)$$

[0103] 也就是说，利用 v(t) 可以将输入波谱 $U_{in}(\omega)$ 的形状在输出上再现。通过相位调制器 10 和二次色散元件 11 的组合可以生成光脉冲的傅里叶变换像本身是已知的，但本发明的要点是使用用于光傅里叶变换的装置可以实现波形无失真传输的特点。

[0104] 那么，在此可以看出如果信号波形是变换极限的话，可以直接从频谱求出时间波形。作为例子，考虑向光纤传输线路 2 发送的输入信号的时间波形是高斯型 $u_{in}(t) = A\exp(-t^2/2T_0^2)$ 的变换极限的波形的情况。高斯型脉冲变为 sech 型，是通过傅里叶变换波形的函数形不变的脉冲。也就是说，其波谱为

[0105] $$U_{in}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{in}(t)\exp(i\omega t)dt$$

[0106] $$= \sqrt{2\pi T_0^2}\,A\exp(-T_0^2\omega^2/2) \qquad (18)$$

[0107] 这时根据式 (17) 的结果，以 t/D 替换 ω，光傅里叶变换装置 3 的输出波形可以由

下式给出。

[0108] $$v(t)=\sqrt{T_0^2/iD}A\exp(-T_0^2t^2/2D^2)\exp(-iKt^2/2+i\beta(t/D)\xi) \quad (19)$$

[0109] 在此若选择二次色散的绝对值 $|D| = T_0^2$，则变为

[0110] $$v(t)=\sqrt{1/i\,\mathrm{sgn}(k'')}A\exp(-t^2/2T_0^2)\exp(-iKt^2/2+i\beta(t/T_0^2)\xi) \quad (20)$$

[0111] 具备受光器 4 的通常的光检测器中可以检测出光电场的强度 $I(t) = |v(t)|^2$，所以通过式 (20) 可以以下面公式的形式直接再现发送端 A 的时间波形 $u_{in}(t) = A\exp(-t^2/2T_0^2)$（图 2(a)）。

[0112] $|v(t)|^2 = A^2\exp(-t^2/T_0^2)$

[0113] 象这样，波形为高斯型的情况下，若选择 $|D| = T_0^2$，则在式 (17) 中波谱 $U_{in}(t/D)$ 原样对应于波形 $u_{in}(t)$，所以其结果是，要点是可以在输出 C 的时间轴上直接、忠实且完全再现受到光纤传输线路的线性效应之前的时间波形。

[0114] 通常，波形不是高斯型的情况下，在受光器 4 的输出可以如下式得出其光电场的强度 $I(t) = |v(t)|^2$。

[0115] $$|v(t)|^2=\frac{1}{2\pi D}|U_{in}(t/D)|^2$$

[0116] 如果在这种方式下的传输失真是线性的话，重要的是得到与其具体的种类和大小完全无关的补偿。所以，不依赖于色散值的大小和动态的时间变动、以及进一步的色散的次数为其最大的特征之一。此外，如同孤子（ソリトン）那样的非线性脉冲在传输中，波谱的形状在传递中如能被维持，也可以完全同样适用。也就是说，由于孤子在时间宽度 Δτ 和波谱宽度 Δν 之间具有变换极限的关系，因此可以利用本实施方式。关于色散管理孤子，通过在啁啾为零的最短脉冲的位置上也插入适当的光纤，强迫啁啾为零，也可以利用本方式。

[0117] 2. 波形失真补偿的例子

[0118] 图 5 表示的是光脉冲的波形失真及其补偿效果的图。此图显示的是为了确认本实施形态的傅里叶光传输方式下的色散补偿的效果，利用非专利文献 4 的实验参数进行数值计算的结果。此图中的圆圈、虚线、实线分别显示了图 1 中 A、B、C 各点（也就是光纤传输线路 2 传输前、传输后、光傅里叶变换装置 3 的输出）的光信号的时间波形。

[0119] 在这里作为一个例子，假定图 1 中 A 的时间波形为半高全宽 380fs 的高斯型。此外，假定构成光纤传输线路的长度 $\xi = 69.4$km 的光纤的累积色散分别为 $\beta_2\xi = -0.0037\mathrm{ps}^2$、$\beta_3\xi = -0.0038\mathrm{ps}^3$、$\beta_4\xi = 0.0058\mathrm{ps}^4$。此时 $T_0 = 228$fs。该传输线路的色散补偿所需的光傅里叶变换装置的色散量和相位调制参数的计算结果为 $|D|(=1/|K|) = T_0^2 = 0.052\mathrm{ps}^2$。作为光傅里叶变换装置的二次色散元件，使用 1.3μm 零色散单模光纤 ($k'' = -20\mathrm{ps}^2/\mathrm{km}$) 的话，必要的长度为 $L = 2.6$m。通过一台相位调制器和短光纤即可方便地再生波形也是该实施方式的特征之一。此外，这时的相位调制器的啁啾率为 $K = 1/D = -19.2\mathrm{ps}^{-2}$。

[0120] 在这个传输线路中由于 β_4 值较大，所以四次色散占优势，光傅里叶变换装置的色散补偿前，通过四次色散，脉冲以时间轴为对称扩大，波形有很大的失真。但可以看出在本实施方式下通过进行傅里叶变换，向传输线路发送的输入时间波形被忠实地再现出来。

[0121] 图 6 为表示了关于光脉冲的波形失真及其补偿的数值计算结果的另外一例的图。

此图表示的是为了确认本实施形态的效果而进行的数值计算结果的另外一例。此图同样用圆圈、虚线、实线分别显示了图 1 中 A、B、C 各点光信号的时间波形。这里，假定图 1 中 A 的时间波形为半高全宽 380fs 的高斯型，构成传输线路的长度为 69.4km 的光纤的累积色散分别为 $\beta_2\xi = -0.0037ps^2$、$\beta_3\xi = 0.1ps^3$、$\beta_4\xi = -0.0058ps^4$。也就是说，对于图 5 的色散特性，在这个传输线路中四次色散的符号被反转，三次色散大幅度增加。因此三次色散的影响显著地出现，脉冲在由于光傅里叶变换装置的色散补偿前，在时间轴上明显呈非对称失真状态。但可以看出在本方式下，通过利用光傅里叶变换装置进行色散补偿，向光纤传输线路传送的输入时间波形可以正确复原。

[0122] 产业上的利用可能性

[0123] 正如以上详细说明的那样，根据本发明，使用以相位调制器和二次色散元件构成的光傅里叶变换装置，把在光纤传输线路中受到线性失真的光脉冲串的时间波形变换为作为其不变量的频谱，在传输线路输入中可以再现信号的波谱，并直接提取信息。所以通过利用本发明的傅里叶光传输方式，可以不依靠光纤传输线路的传输特性而正确地传送信息。

[0124] 此外，根据本发明，由于具有三次以上的高次色散，和随时间变动的任意的色散及偏振模色散的光纤传输线路的线性效应而产生的光脉冲的时间波形的波形失真可以同时且完全地被补偿，光纤通信的通信容量的扩大和传送距离的延长成为可能。此外，由于完全不需要任何光纤传输线路的色散和偏振模色散的精密控制，所以可以实现经济实用的光纤通信。

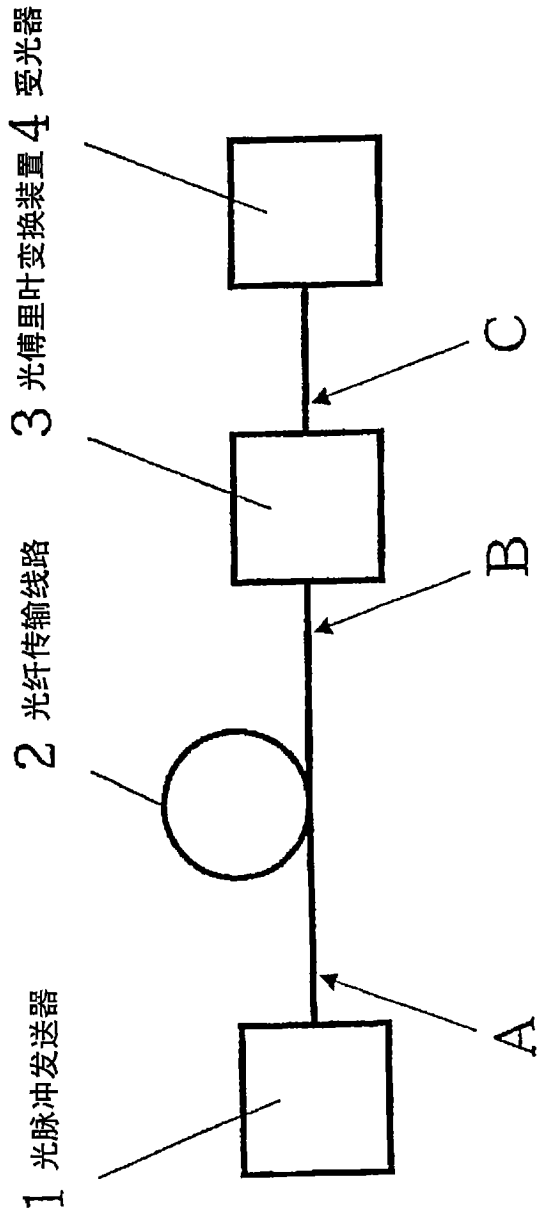


图1

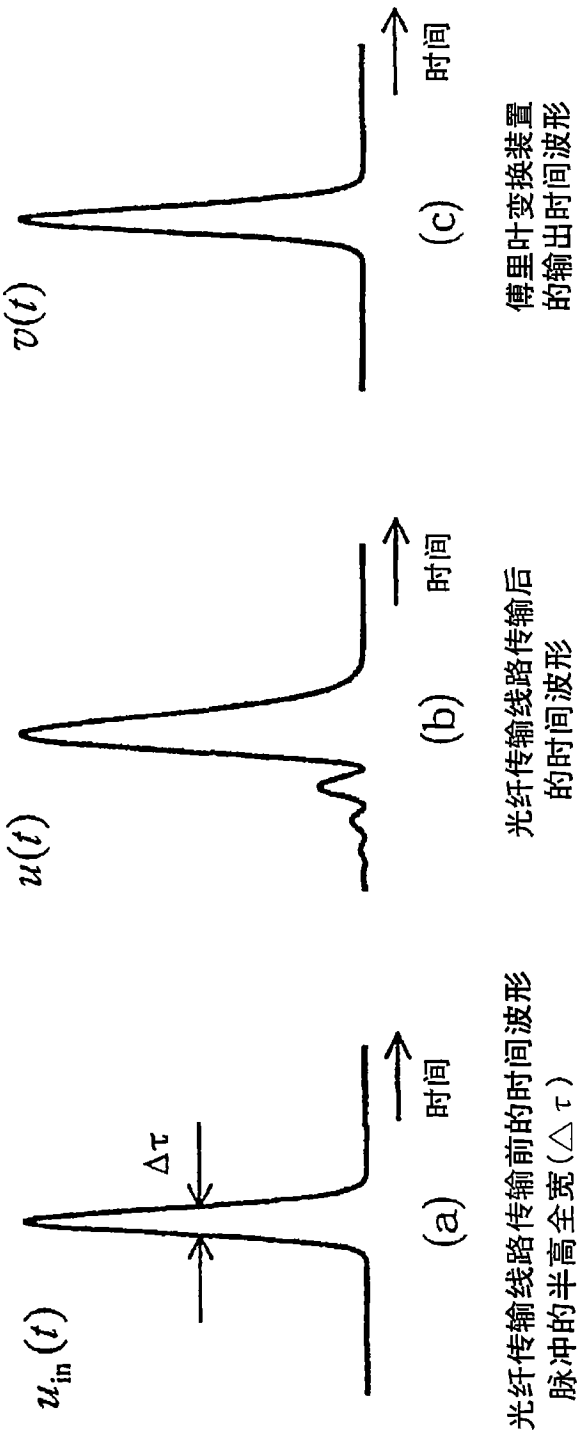

$u_{in}(t)$
Δτ
时间
(a)
光纤传输线路传输前的时间波形
脉冲的半高全宽（△τ）
$u(t)$
时间
(b)
光纤传输线路传输后
的时间波形
$v(t)$
时间
(c)
傅里叶变换装置
的输出时间波形

图2

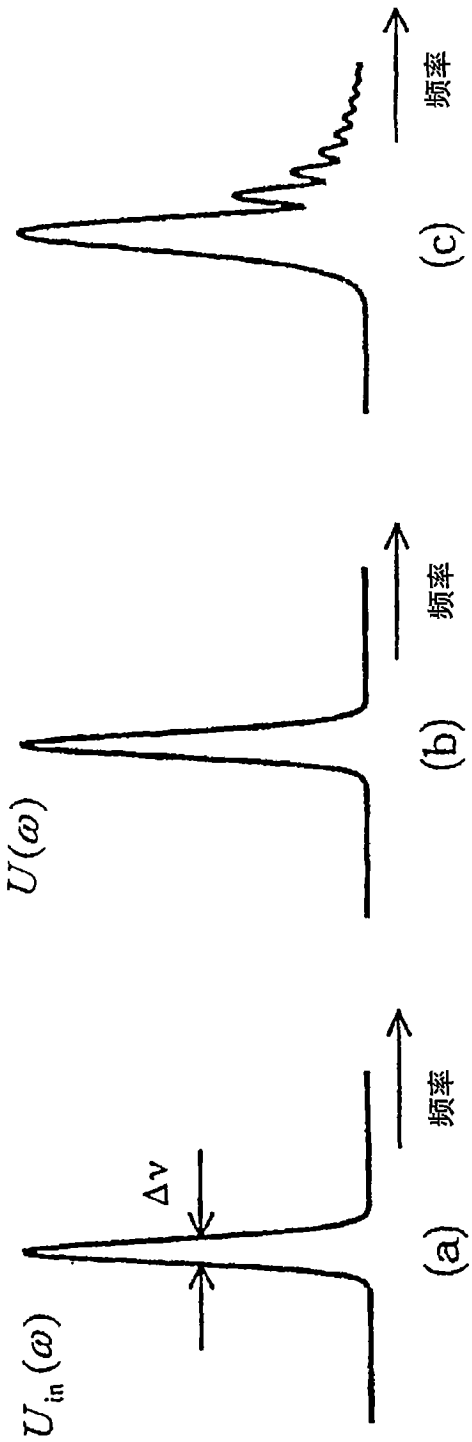

$U_{in}(\omega)$
Δν
(a)
频率
光纤传输线路传输前的频谱
（ 图2的脉宽△τ和频谱
宽度△ν的积满足傅里叶
极限条件）
$U(\omega)$
(b)
频率
光纤传输线路
传输后的频谱
(c)
频率
傅里叶变换装置
的输出频谱

图3

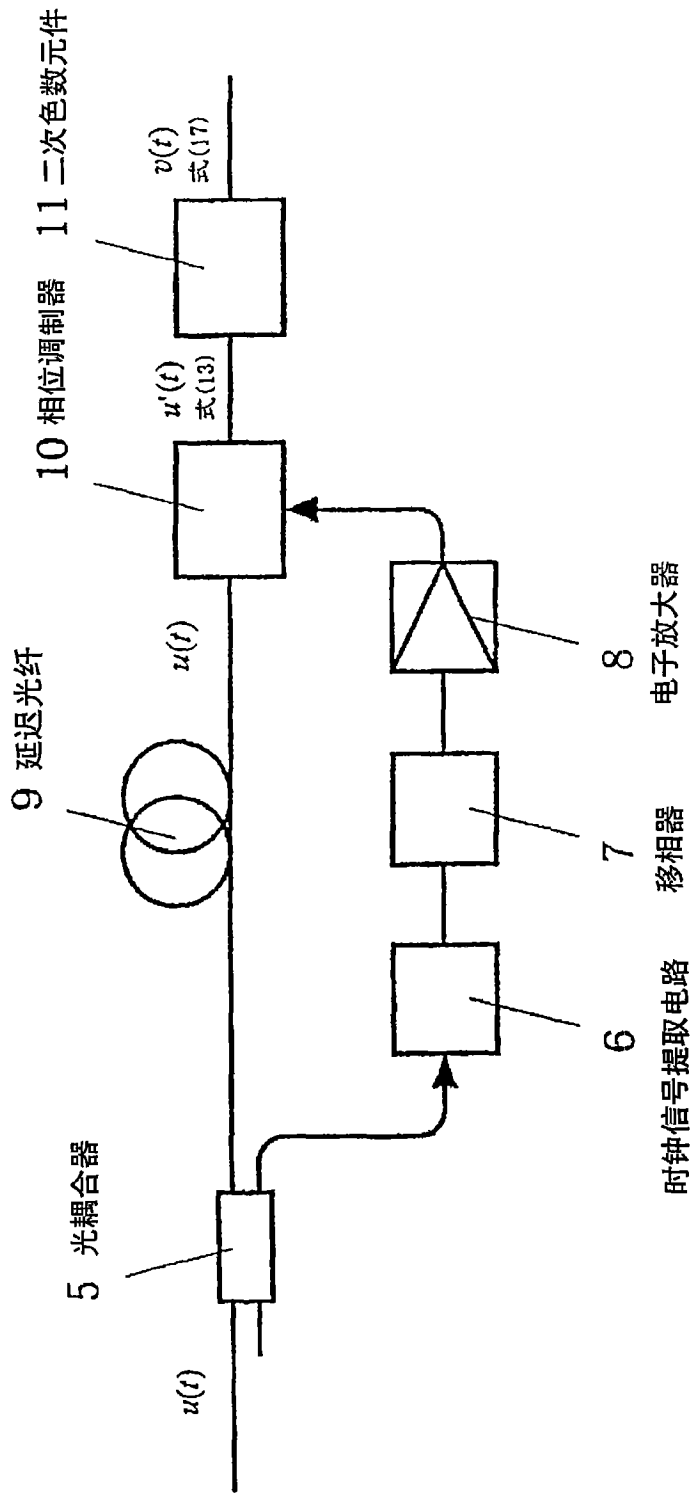

11 二次色数元件
10 相位调制器
9 延迟光纤
5 光耦合器
6 时钟信号提取电路
7 移相器
8 电子放大器
u(t)
u'(t) 式(13)
v(t) 式(17)

图4

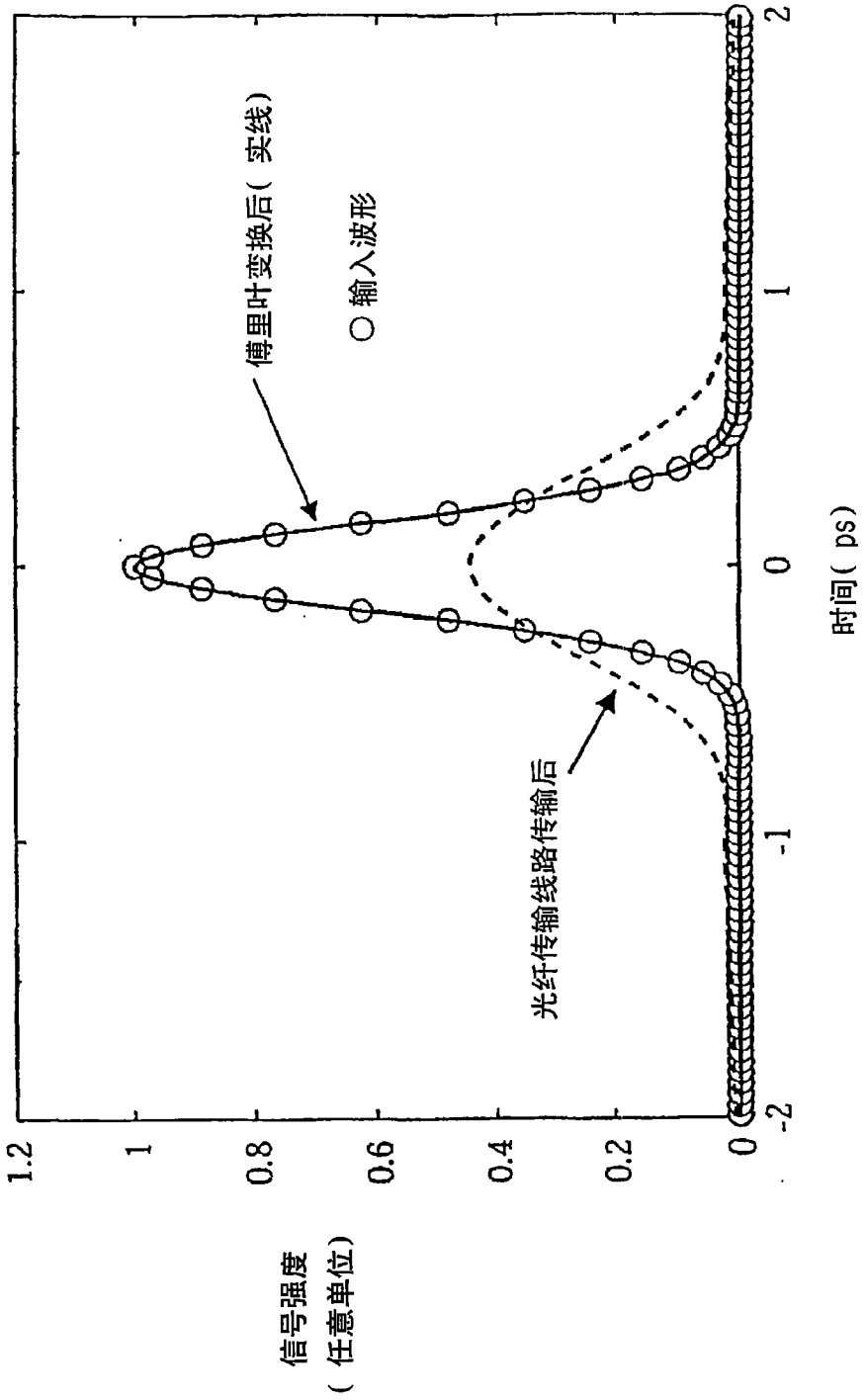

傅里叶变换后（实线）
○ 输入波形
光纤传输线路传输后
信号强度
（任意单位）
时间（ps）
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-2
-1
0
1
2

图5

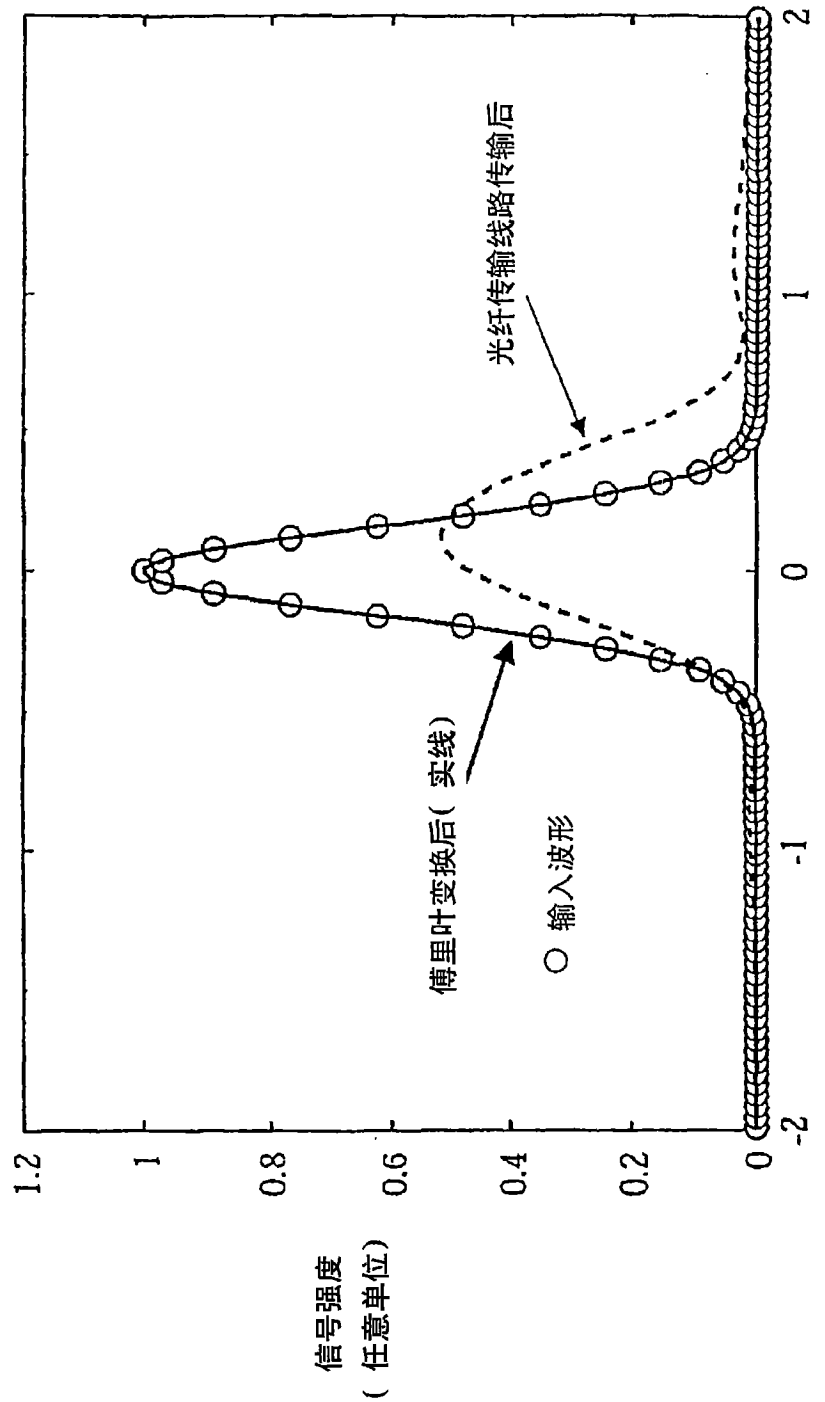

光纤传输线路传输后
傅里叶变换后（实线）
○ 输入波形
信号强度
（任意单位）
时间（ps）
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-2
-1
0
1
2

图6