



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114650133 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 08

(21) 申请号 202210333160.2

CN 104579564 A, 2015.04.29

(22) 申请日 2022.03.31

CN 109586907 A, 2019.04.05

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 111585747 A, 2020.08.25

申请公布号 CN 114650133 A

CN 111526019 A, 2020.08.11

(43) 申请公布日 2022.06.21

姬一鸣等. 基于量子差分相移系统的混合编码设计方案. 《量子电子学报》. 2015, (第03期),

(73) 专利权人 北京中科国光量子科技有限公司

审查员 郑晓双

地址 100086 北京市海淀区中关村大街18号8层04-171

(72) 发明人 赵义博 王东

(51) Int. Cl.

H04L 9/08 (2006.01)

H04B 10/70 (2013.01)

(56) 对比文件

CN 110601839 A, 2019.12.20

WO 2020140851 A1, 2020.07.09

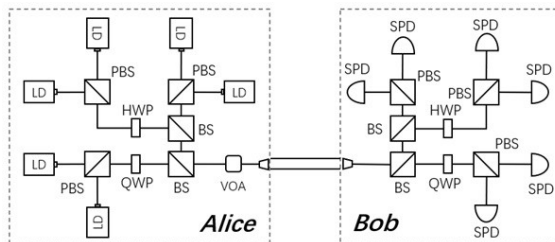
权利要求书2页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

一种量子密钥分发的偏振编码装置以及量子密钥分发系统

(57) 摘要

一种量子密钥分发的偏振编码装置,包括第一环形器和双向偏振调制模块,所述偏振编码装置内部均为保偏光纤;所述第一环形器的第一端口作为偏振编码装置的输入端口In;所述第一环形器的第二端口与双向偏振调制模块的第一端口通过45°偏振旋转器相连;所述双向偏振调制模块的第二端口通过保偏光纤L2与第一环形器第三端口相连。与现有技术相比,本发明可以稳定制备6种偏振态,无需多激光器,消除了多激光器波长不一致导致的安全性漏洞,制备偏振态非常稳定,无需任何补偿,接收端只需2个单光子探测器,降低了系统的复杂度和成本。另外,本发明的偏振编码装置可用于实现BB84协议、6态协议和参考系无关协议。



1. 一种量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,包括第一环形器(1)和双向偏振调制模块(2),所述偏振编码装置内部均为保偏光纤;所述第一环形器(1)的第一端口作为偏振编码装置的输入端口In;所述第一环形器(1)的第二端口与双向偏振调制模块(2)的第一端口通过 $45^\circ$ 偏振旋转器相连;所述双向偏振调制模块(2)的第二端口通过保偏光纤L2与第一环形器(1)第三端口相连;所述第一环形器(1)的第四端口作为偏振编码装置的输出端口;所述双向偏振调制模块(2)用于调制从第一端口入射光脉冲的两个偏振分量之间的相位差,并分别将所述两个偏振分量旋转 $90^\circ$ 后从第一端口输出,经第一次偏振调制后的光脉冲再次经过保偏光纤L1和 $45^\circ$ 偏振旋转之后进入第一环形器(1)的第二端口,从其第三端口出射,并沿保偏光纤L2到达双向偏振调制模块(2)的第二端口进行第二次偏振调制;与第一次偏振调制类似,光脉冲的两个偏振分量被双向偏振调制模块(2)分别旋转 $90^\circ$ ,并对二者之间调制相位差 $\varphi_2$ ,从双向偏振调制模块(2)的第二端口出射,再次经过保偏光纤L2之后回到第一环形器(1)的第三端口,从其第四端口出射,最终从偏振编码装置的输出端口出射,通过琼斯矩阵计算输出偏振态。

2. 如权利要求1所述的量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,所述双向偏振调制模块(2)包括第一偏振分束器(2-1)、第二偏振分束器(2-2)、第一法拉第镜(2-3)、第二法拉第镜(2-4)以及第一相位调制器(2-5),所述第一偏振分束器(2-1)的第一端口、第二偏振分束器(2-2)的第四端口分别作为双向偏振调制模块(2)的第一端口、第二端口;所述第一偏振分束器(2-1)的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L3、L4与第二偏振分束器(2-2)的第二端口、第三端口相连;所述第一相位调制器(2-5)位于保偏光纤L3中;所述第二偏振分束器(2-2)的第一端口通过保偏光纤L5与第一法拉第镜(2-3)相连;所述第一偏振分束器2-1的第四端口通过保偏光纤L6与第二法拉第镜(2-4)相连。

3. 如权利要求1所述的量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,所述双向偏振调制模块(2)包括第三偏振分束器(2-6)、第四偏振分束器(2-7)和第二相位调制器(2-8),所述第三偏振分束器(2-6)的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块(2)的第一端口、第二端口;所述第三偏振分束器(2-6)的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L7、L8与第四偏振分束器(2-7)的第二端口、第三端口相连;所述第二相位调制器(2-8)位于保偏光纤L7中,并且保偏光纤L7进行 $90^\circ$ 熔接;所述第四偏振分束器(2-7)的第一端口和第四端口通过保偏光纤L9进行 $90^\circ$ 熔接后相连。

4. 如权利要求1所述的量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,所述双向偏振调制模块(2)包括第五偏振分束器(2-9)、法拉第旋转器(2-11)和第三相位调制器(2-10),所述第五偏振分束器(2-9)的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块(2)的第一端口、第二端口;所述第五偏振分束器(2-9)的第二端口依次连接第三相位调制器(2-10)、法拉第旋转器(2-11)之后与第三端口相连,构成萨格纳克环;所述法拉第旋转器的偏振旋转角度为 $90^\circ$ ,支持双轴工作,两端的偏振方向均与保偏光纤慢轴对准。

5. 如权利要求1-4任意一种所述的量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,所述 $45^\circ$ 偏振旋转器为进行 $45^\circ$ 熔接的保偏光纤L1。

6. 如权利要求1-4任意一种所述的量子密钥分发的偏振编码装置,其特征在于,所述 $45^\circ$ 偏振旋转器为半波片,所述半波片的慢轴与所连接保偏光纤的慢轴夹角为 $22.5^\circ$ 。

7. 一种量子密钥分发系统,包括通过自由空间信道连接的发射端Alice以及接收端

Bob,其特征在于,所述发射端Alice包括权利要求1或2或3或4中的偏振编码装置。

## 一种量子密钥分发的偏振编码装置以及量子密钥分发系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及量子相位编码技术领域,特别涉及一种量子密钥分发的偏振编码装置以及量子密钥分发系统。

### 背景技术

[0002] 量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)可以为远距离的通信双方提供无条件安全的密钥分发,其信息理论安全性由量子力学的基本原理来保障。目前, BB84协议量子密钥分发系统日益成熟,已走向实用化。在自由空间应用场景中,一般采用偏振编码方式。BB84协议常用的偏振编码的4种偏振态为 $|H\rangle$ 、 $|V\rangle$ 、 $|+\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle + |V\rangle)$ 、 $|-\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle - |V\rangle)$ 。为了提高量子密钥分发系统的安全性,研究者提出了6态协议,即在BB84协议4态的基础上增加2个偏振态 $|R\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle + i|V\rangle)$ 、 $|L\rangle = 1/\sqrt{2}(|H\rangle - i|V\rangle)$ ,可以进一步限制窃听者获取的信息量。然而,现有技术中制备6种偏振态的偏振编码装置具有较高的复杂度,如图1所示的一种典型的6态协议偏振编码QKD系统。其发送端每种偏振态都由一个激光器产生,通过偏振分束器PBS及分束器BS等耦合到同一路光纤中。接收端通过分束器分成三路,分成三组基矢,再经过偏振分束器进行偏振分析,之后在单光子探测器上进行探测。这种偏振编码的QKD方案需要6个激光器,以及6个单光子探测器。因此,该系统不仅具有体积大、成本高、系统复杂、稳定性差等缺点,还因为多激光器存在波长不一致而导致侧信道信息泄露,安全性降低。

[0003] 为了解决多激光器造成的安全性和稳定性差的缺点,专利CN105897413A和CN110545180A分别提出了两种基于萨格纳克环的偏振调制方案,通过萨格纳克环中的相位调制器PM调节环内两个方向的偏振分量之间的相位差来产生偏振态,制备的偏振态非常稳定。然而这两种方案仅能产生4种BB84偏振态,无法产生6态协议所需的另外2种偏振态。因此需要一种无需多激光器的能够稳定产生6种偏振态的偏振编码装置。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在以上缺陷,本发明提出一种量子密钥分发偏振编码装置及系统。

[0005] 本发明的技术方案是这样实现的:

[0006] 一种量子密钥分发的偏振编码装置,包括第一环形器和双向偏振调制模块,所述偏振编码装置内部均为保偏光纤;所述第一环形器的第一端口作为偏振编码装置的输入端口In;所述第一环形器的第二端口与双向偏振调制模块的第一端口通过 $45^\circ$ 偏振旋转器相连;所述双向偏振调制模块的第二端口通过保偏光纤L2与第一环形器第三端口相连;所述第一环形器的第四端口作为偏振编码装置的输出端口;所述双向偏振调制模块用于调制从第一端口入射光脉冲的两个偏振分量之间的相位差,并分别将所述两个偏振分量旋转 $90^\circ$ 后从第一端口输出,随后调制从第二端口入射光脉冲的两个偏振分量之间的相位差,并分

别将所述两个偏振分量旋转 $90^\circ$ 后从第二端口输出。

[0007] 优选地,所述双向偏振调制模块包括第一偏振分束器、第二偏振分束器、第一法拉第镜、第二法拉第镜以及第一相位调制器,所述第一偏振分束器的第一端口、第二偏振分束器的第四端口分别作为双向偏振调制模块的第一端口、第二端口;所述第一偏振分束器的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L3、L4与第二偏振分束器的第二端口、第三端口相连;所述第一相位调制器位于保偏光纤L3中;所述第二偏振分束器的第一端口通过保偏光纤L5与第一法拉第镜相连;所述第一偏振分束器的第四端口通过保偏光纤L6与第二法拉第镜相连。

[0008] 优选地,所述双向偏振调制模块包括第三偏振分束器、第四偏振分束器2-7和第二相位调制器,所述第三偏振分束器的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块的第一端口、第二端口;所述第三偏振分束器的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L7、L8与第四偏振分束器的第二端口、第三端口相连;所述第二相位调制器位于保偏光纤L7中,并且保偏光纤L7进行 $90^\circ$ 熔接;所述第四偏振分束器的第一端口和第四端口通过保偏光纤L9进行 $90^\circ$ 熔接后相连。

[0009] 优选地,所述双向偏振调制模块包括第五偏振分束器、法拉第旋转器和第三相位调制器,所述第五偏振分束器的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块的第一端口、第二端口;所述第五偏振分束器的第二端口依次连接第三相位调制器、法拉第旋转器之后与第三端口相连,构成萨格纳克环;所述法拉第旋转器的偏振旋转角度为 $90^\circ$ ,支持双轴工作,两端的偏振方向均与保偏光纤慢轴对准。

[0010] 优选地,所述 $45^\circ$ 偏振旋转器为进行 $45^\circ$ 熔接的保偏光纤L1。

[0011] 优选地,所述 $45^\circ$ 偏振旋转器为半波片,所述半波片的慢轴与所连接保偏光纤的慢轴夹角为 $22.5^\circ$ 。

[0012] 本发明还提供了一种量子密钥分发系统,包括通过自由空间信道连接的发射端Alice以及接收端Bob,所述发射端Alice包括上述的偏振编码装置。

[0013] 与现有技术相比,本发明有以下有益效果:

[0014] 本发明提出一种量子密钥分发偏振编码装置及系统,可以稳定制备6种偏振态,无需多激光器,消除了多激光器波长不一致导致的安全性漏洞,制备偏振态非常稳定,无需任何补偿,接收端只需2个单光子探测器,降低了系统的复杂度和成本。另外,本发明的偏振编码装置可用于实现BB84协议、6态协议和参考系无关协议。

## 附图说明

[0015] 图1为现有技术6态偏振编解码方案的原理框图;

[0016] 图2为本发明量子密钥分发偏振编码装置的原理框图;

[0017] 图3为本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例一的原理框图;

[0018] 图4为本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例二的原理框图;

[0019] 图5为本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例三的原理框图;

[0020] 图6为本发明量子密钥分发系统的原理框图。

[0021] 图中:第一环形器-1、双向偏振调制模块-2、第一偏振分束器-2-1、第二偏振分束器-2-2、第一法拉第镜-2-3、第二法拉第镜-2-4、第一相位调制器-2-5、第三偏振分束器-2-



6、第四偏振分束器-2-7、第二相位调制器-2-8、第五偏振分束器-2-9、第三相位调制器-2-10、法拉第旋转器-2-11。

### 具体实施方式

[0022] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明进行清楚、完整地描述。

[0023] 如图2所示,一种量子密钥分发偏振编码装置,包括第一环形器1和双向偏振调制模块2,所述偏振编码装置内部均为保偏光纤;所述第一环形器1的第一端口作为偏振编码装置的输入端口In;所述第一环形器1的第二端口与双向偏振调制模块2的第一端口通过保偏光纤L1进行45°熔接后相连,另外第一环形器1的第二端口与双向偏振调制模块2的第一端口之间也可设置半波片,从而替换保偏光纤45°熔接,所述半波片的慢轴与所连接保偏光纤的慢轴夹角为22.5°,45度保偏光纤熔接实现起来比较简单,但是半波片调准也较为容易;所述双向偏振调制模块2的第二端口通过保偏光纤L2与第一环形器CIR第三端口相连;所述第一环形器1的第四端口作为偏振编码装置的输出端口;所述双向偏振调制模块2用于调制从第一端口入射光脉冲的两个偏振分量之间的相位差,并分别将所述两个偏振分量旋转90°后从第一端口输出,随后调制从第二端口入射光脉冲的两个偏振分量之间的相位差,并分别将所述两个偏振分量旋转90°后从第二端口输出。

[0024] 具体偏振编码过程如下:

[0025] 水平偏振的光脉冲进入所述偏振编码装置的输入端口In,首先从第一环形器1的第一端口进入从第二端口出射,经过45°熔接点偏振旋转后,偏振态变为 $1/\sqrt{2}(|H\rangle + |V\rangle)$ ,水平偏振分量H沿保偏光纤L1慢轴传播,竖直偏振分量沿保偏光纤L1快轴传播,随后到达双向偏振调制模块2的第一端口,两个偏振分量被双向偏振调制模块2分别旋转90°,并且二者之间调制相位差 $\varphi_1$ ,从双向偏振调制模块2的第一端口出射。经第一次偏振调制后的光脉冲再次经过保偏光纤L1和45°偏振旋转之后进入第一环形器1的第二端口,从其第三端口出射,并沿保偏光纤L2到达双向偏振调制模块2的第二端口进行第二次偏振调制。与第一次偏振调制类似,光脉冲的两个偏振分量被双向偏振调制模块2分别旋转90°,并对二者之间调制相位差 $\varphi_2$ ,从双向偏振调制模块2的第二端口出射,再次经过保偏光纤L2之后回到第一环形器1的第三端口,从其第四端口出射,最终从偏振编码装置的输出端口Out出射,可以通过琼斯矩阵计算输出的偏振态。

[0026] 偏振编码装置的输入光脉冲偏振态为水平偏振,可写为

$$[0027] \quad E_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0028] 光脉冲依次经过45°偏振旋转、保偏光纤A1、双向偏振调制模块2第一次偏振调制、保偏光纤L2以及双向偏振调制模块2第二次偏振调制,最终从偏振编码装置输出的偏振态为

$$E_1 = \overline{PMF2} \cdot \overline{BPM2} \cdot \overline{PMF2} \cdot \overline{R45} \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{BPM1} \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{R45} \cdot E_0$$

$$[0029] \quad = \frac{e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}}{2} \begin{bmatrix} 1 - e^{i\varphi_1} \\ e^{i\varphi_2}(1 + e^{i\varphi_1}) \end{bmatrix} = e^{i(\varphi_1 + \varphi_2 + \frac{\varphi_1}{2})} \begin{bmatrix} -i \sin \frac{\varphi_1}{2} \\ e^{i\varphi_2} \cos \frac{\varphi_1}{2} \end{bmatrix}$$

[0030] 其中保偏光纤L1、L2、45°偏振旋转、第一次和第二次双向偏振调制BPM1、BPM2的琼斯矩阵分别为

$$[0031] \quad \overrightarrow{PMF1} = \overrightarrow{PMF1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{bmatrix}, \overrightarrow{PMF2} = \overrightarrow{PMF2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{bmatrix}$$

$$[0032] \quad BPM1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\phi_1} & 0 \end{bmatrix}, BPM2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\phi_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0033] \quad \overrightarrow{R45} = \overrightarrow{R45} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

[0034] 忽略全局相位因子,可以得到光脉冲的偏振态为 $E1 = -i \sin \frac{\phi_1}{2} |H\rangle + e^{i\phi_2} \cos \frac{\phi_1}{2} |V\rangle$ 。

可以看出制备的偏振态仅与调制的相位差 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 有关,因此偏振编码装置的态制备非常稳定,不存在相位漂移,无需进行任何补偿。通过调制不同的相位差 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ ,可以制备X、Y、Z基下的6种偏振态,如表1所示。

[0035] 表1. 相位差 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 与制备的偏振态关系标

$\phi_1$	$\phi_2$	偏振态	基矢
0	0	$ V\rangle$	Z 基
$\pi$	0	$ H\rangle$	
$-\pi/2$	$\pi/2$	$ +\rangle = 1/\sqrt{2} ( H\rangle +  V\rangle)$	X 基
$\pi/2$	$\pi/2$	$ -\rangle = 1/\sqrt{2} ( H\rangle -  V\rangle)$	
$\pi/2$	0	$ R\rangle = 1/\sqrt{2} ( H\rangle + i V\rangle)$	Y 基
$-\pi/2$	0	$ L\rangle = 1/\sqrt{2} ( H\rangle - i V\rangle)$	

[0037] 如图3所示,本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例一:

[0038] 所述偏振编码装置的结构为:所述双向偏振调制模块2包括第一偏振分束器2-1、第二偏振分束器2-2、第一法拉第镜2-3、第二法拉第镜2-4以及第一相位调制器2-5,所述第一偏振分束器2-1的第一端口、第二偏振分束器2-2的第四端口分别作为双向偏振调制模块2的第一端口、第二端口;所述第一偏振分束器2-1的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L3、L4与第二偏振分束器2-2的第二端口、第三端口相连;所述第一相位调制器2-5位于保偏光纤L3中;所述第二偏振分束器2-2的第一端口通过保偏光纤L5与第一法拉第镜2-3相连;所述第一偏振分束器2-1的第四端口通过保偏光纤L6与第二法拉第镜2-4相连。

[0039] 实施例一偏振编码过程为:

[0040] 水平偏振的光脉冲P1进入所述偏振编码装置的输入端口In,首先从第一环形器1的第一端口进入从第二端口出射,经过45°熔接点偏振旋转后,偏振态变为 $1/\sqrt{2} (|H\rangle + |V\rangle)$ ,水平偏振分量P11沿保偏光纤L1慢轴传播,竖直偏振分量P12沿保偏光纤L1快轴传播,随后

到达第一偏振分束器2-1的第一端口,其中P11从第三端口透射,沿保偏光纤L4慢轴传播到达第二偏振分束器2-2的第三端口,并透射到第一端口,沿保偏光纤L5的慢轴传播,到达第一法拉第镜2-3被反射后,偏振态旋转 $90^\circ$ ,沿保偏光纤L5的快轴传播,到达第二偏振分束器2-2的第一端口后被反射到第二端口,沿保偏光纤L3的慢轴传播,经过第一相位调制器2-5时被调制相位 $\varphi_1$ ,然后到达第一偏振分束器2-1的第二端口,反射到第一端口出射,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P11从第一偏振分束器2-1的第一端口入射时沿保偏光纤L1的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0041] P12从第一偏振分束器2-1的第二端口反射,沿保偏光纤L3慢轴传播,经过第一相位调制器2-5时不调相,然后到达第二偏振分束器2-2的第二端口,被反射到第一端口,沿保偏光纤L5的快轴传播,到达第一法拉第镜2-3被反射后,偏振态旋转 $90^\circ$ ,沿保偏光纤L5的慢轴传播,到达第二偏振分束器2-2的第一端口后透射到第三端口,沿保偏光纤L4的慢轴传播,然后到达第一偏振分束器2-1的第三端口,从第一端口出射,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P12从第一偏振分束器2-1的第一端口入射时沿保偏光纤L1的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0042] 由于P11和P12均经过了保偏光纤L3、L4的慢轴和L5的快慢轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P11经过第一相位调制器2-5时调制了相位 $\varphi_1$ ,P12经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\varphi_1$ 。因此,双向偏振调制模块2第一次偏振调制的作用可以表示为

$$[0043] \quad BPM1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_1} & 0 \end{bmatrix}$$

[0044] 光脉冲P11和P12从第一偏振分束器2-1的第一端口出射后合成一个脉冲P2,再次经过保偏光纤L1和 $45^\circ$ 偏振旋转之后进入第一环形器1的第二端口,从其第三端口出射,并沿保偏光纤L2到达第二偏振分束器2-2的第四端口。其中,沿保偏光纤L2慢轴传播的偏振分量P21被反射到第三端口,沿保偏光纤L4的快轴传播,随后到达第一偏振分束器2-1的第三端口,并从第四端口出射,沿保偏光纤L6的慢轴传播,被第二法拉第镜2-4反射后沿保偏光纤L6的快轴传播,回到第一偏振分束器2-1的第四端口,被透射到第二端口后沿保偏光纤L3的快轴传播,经过第一相位调制器2-5时调制相位 $\varphi_2$ ,然后到达第二偏振分束器2-2的第二端口,从第四端口出射,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P21从第二偏振分束器2-2的第四端口入射时沿保偏光纤L2的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0045] 沿保偏光纤L2快轴传播的偏振分量P22透射到第二偏振分束器2-2的第二端口,沿保偏光纤L3的快轴传播,经过第一相位调制器2-5时不调相,随后到达第一偏振分束器2-1的第二端口,并从第四端口出射,沿保偏光纤L6的快轴传播,被第二法拉第镜2-4反射后沿保偏光纤L6的慢轴传播,回到第一偏振分束器2-1的第四端口,被反射到第三端口后沿保偏光纤L4的快轴传播,然后到达第二偏振分束器2-2的第三端口,从第四端口出射,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P22从第二偏振分束器2-2的第四端口入射时沿保偏光纤L2的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0046] 由于P21和P22均经过了保偏光纤L3、L4的快轴和L6的快慢轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P21经过第一相位调制器2-5时调制了相位 $\varphi_2$ ,P22经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\varphi_2$ 。因此,双向偏振调制模块2第二次偏振调制的作用可以表示为



$$[0047] \quad BPM2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_2} & 0 \end{bmatrix}$$

[0048] 光脉冲P21和P22从第二偏振分束器2-2的第四端口出射后合成一个脉冲P3,再次经过保偏光纤L2之后回到第一环形器1的第三端口,从其第四端口出射,最终从偏振编码装置的输出端口Out出射,可以通过琼斯矩阵计算输出的偏振态。光脉冲依次经过45°偏振旋转、保偏光纤A1、双向偏振调制模块2第一次偏振调制、保偏光纤L2以及双向偏振调制模块2第二次偏振调制,最终从偏振编码装置输出的偏振态为

$$E1 = \overline{PMF2} \cdot BPM2 \cdot \overline{PMF2} \cdot \overline{R45} \cdot \overline{PMF1} \cdot BPM1 \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{R45} \cdot E0$$

$$[0049] \quad = \frac{e^{i(\varphi_1+\varphi_2)}}{2} \begin{bmatrix} 1 - e^{i\varphi_1} \\ e^{i\varphi_2}(1 + e^{i\varphi_1}) \end{bmatrix} = e^{i(\varphi_1+\varphi_2+\frac{\varphi_1}{2})} \begin{bmatrix} -i \sin \frac{\varphi_1}{2} \\ e^{i\varphi_2} \cos \frac{\varphi_1}{2} \end{bmatrix}$$

[0050] 忽略全局相位因子,可以得到光脉冲的偏振态为 $E1 = -i \sin \frac{\varphi_1}{2} |H\rangle + e^{i\varphi_2} \cos \frac{\varphi_1}{2} |V\rangle$ 。

可以看出制备的偏振态仅与调制的相位差 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 有关,因此偏振编码装置的态制备非常稳定,不存在相位漂移,无需进行任何补偿。通过调制不同的相位差 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ,可以制备X、Y、Z基下的6种偏振态,如表1所示。

[0051] 如图4所示,本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例二:

[0052] 所述偏振编码装置的结构为:所述双向偏振调制模块2包括第三偏振分束器2-6、第四偏振分束器2-7和第二相位调制器2-8,所述第三偏振分束器2-6的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块2的第一端口、第二端口;所述第三偏振分束器2-6的第二端口、第三端口分别通过保偏光纤L7、L8与第四偏振分束器2-7的第二端口、第三端口相连;所述第二相位调制器2-8位于保偏光纤L7中,并且保偏光纤L7进行90°熔接;所述第四偏振分束器2-7的第一端口和第四端口通过保偏光纤L9进行90°熔接后相连。

[0053] 实施例二偏振编码过程为:

[0054] 水平偏振的光脉冲P1进入所述偏振编码装置的输入端口In,首先从第一环形器1的第一端口进入从第二端口出射,经过45°熔接点偏振旋转后,偏振态变为 $1/\sqrt{2}(|H\rangle + |V\rangle)$ ,水平偏振分量P11沿保偏光纤L1慢轴传播,竖直偏振分量P12沿保偏光纤L1快轴传播,随后到达第三偏振分束器2-6的第一端口,其中P11从第三端口透射,沿保偏光纤L8慢轴传播到达第四偏振分束器2-7的第三端口,并透射到第一端口,沿保偏光纤L9的慢轴传播,经过90°偏振旋转后沿保偏光纤快轴传播,随后从第四偏振分束器2-7的第四端口透射到第二端口,沿保偏光纤L7的快轴传播,经过90°偏振旋转后沿保偏光纤的慢轴传播,经过第二相位调制器2-8时被调制相位 $\varphi_1$ ,然后到达第三偏振分束器2-6的第二端口,反射到第一端口出射,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P11从第三偏振分束器2-6的第一端口入射时沿保偏光纤L1的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了90°。

[0055] P12从第三偏振分束器2-6的第二端口反射,沿保偏光纤L3慢轴传播,经过第二相位调制器2-8时不调相,经过90°偏振旋转后沿保偏光纤快轴传播,然后到达第四偏振分束器2-7的第二端口,从第四端口透射,沿保偏光纤L9的快轴传播,经过90°偏振旋转之后,沿保偏光纤的慢轴传播,到达第四偏振分束器2-7的第一端口后透射到第三端口,沿保偏光纤

L8的慢轴传播,然后到达第三偏振分束器2-6的第三端口,从第一端口出射,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P12从第三偏振分束器2-6的第一端口入射时沿保偏光纤L1的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0056] 由于P11和P12均经过了保偏光纤L7、L8和L9的快慢轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P11经过第二相位调制器2-8时调制了相位 $\varphi_1$ ,P12经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\varphi_1$ 。因此,双向偏振调制模块2第一次偏振调制的作用可以表示为

$$[0057] \quad BPM1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_1} & 0 \end{bmatrix}$$

[0058] 光脉冲P11和P12从第三偏振分束器2-6的第一端口出射后合成一个脉冲P2,再次经过保偏光纤L1和 $45^\circ$ 偏振旋转之后进入第一环形器1的第二端口,从其第三端口出射,并沿保偏光纤L2到达第三偏振分束器2-6的第四端口。其中,沿保偏光纤L2慢轴传播的偏振分量P21被反射到第三端口,沿保偏光纤L8的快轴传播,随后到达第四偏振分束器2-7的第三端口,并从第四端口出射,沿保偏光纤L9的慢轴传播,经过 $90^\circ$ 偏振旋转后沿保偏光纤快轴传播,到达第四偏振分束器2-7的第一端口,被反射到第二端口后沿保偏光纤L7的慢轴传播,经过 $90^\circ$ 偏振旋转后沿保偏光纤快轴传播,经过第二相位调制器2-8时调制相位 $\varphi_2$ ,然后到达第三偏振分束器2-6的第二端口,从第四端口出射,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P21从第三偏振分束器2-6的第四端口入射时沿保偏光纤L2的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0059] 沿保偏光纤L2快轴传播的偏振分量P22透射到第三偏振分束器2-6的第二端口,沿保偏光纤L7的快轴传播,经过第二相位调制器2-8时不调相,经过 $90^\circ$ 偏振旋转后沿保偏光纤慢轴传播,随后到达第四偏振分束器2-7的第二端口,被反射到第一端口,沿保偏光纤L9的快轴传播,经过 $90^\circ$ 偏振旋转后沿保偏光纤慢轴传播,到达第四偏振分束器2-7的第四端口,反射到第三端口后沿保偏光纤L8的快轴传播,然后到达第三偏振分束器2-6的第三端口,从第四端口出射,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P22从第三偏振分束器2-6的第四端口入射时沿保偏光纤L2的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0060] 由于P21和P22均经过了保偏光纤L7、L8和L9的快慢轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P21经过第二相位调制器2-8时调制了相位 $\varphi_2$ ,P22经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\varphi_2$ 。因此,双向偏振调制模块2第二次偏振调制的作用可以表示为

$$[0061] \quad BPM2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_2} & 0 \end{bmatrix}$$

[0062] 光脉冲P21和P22从第三偏振分束器2-6的第四端口出射后合成一个脉冲P3,再次经过保偏光纤L2之后回到第一环形器1的第三端口,从其第四端口出射,最终从偏振编码装置的输出端口Out出射,可以通过琼斯矩阵计算输出的偏振态。光脉冲依次经过 $45^\circ$ 偏振旋转、保偏光纤A1、双向偏振调制模块2第一次偏振调制、保偏光纤L2以及双向偏振调制模块2第二次偏振调制,最终从偏振编码装置输出的偏振态为

$$E1 = \overline{PMF2} \cdot \overline{BPM2} \cdot \overline{PMF2} \cdot \overline{R45} \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{BPM1} \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{R45} \cdot E0$$

$$[0063] \quad = \frac{e^{i(\phi_1 + \phi_2)}}{2} \begin{bmatrix} 1 - e^{i\phi_1} \\ e^{i\phi_2}(1 + e^{i\phi_1}) \end{bmatrix} = e^{i(\phi_1 + \phi_2 + \frac{\phi_1}{2})} \begin{bmatrix} -i \sin \frac{\phi_1}{2} \\ e^{i\phi_2} \cos \frac{\phi_1}{2} \end{bmatrix}$$

[0064] 忽略全局相位因子,可以得到光脉冲的偏振态为 $E1 = -i \sin \frac{\phi_1}{2} |H\rangle + e^{i\phi_2} \cos \frac{\phi_1}{2} |V\rangle$ 。可以看出制备的偏振态仅与调制的相位差 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 有关,因此偏振编码装置的态制备非常稳定,不存在相位漂移,无需进行任何补偿。通过调制不同的相位差 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ ,可以制备X、Y、Z基下的6种偏振态,如表1所示。

[0065] 如图5所示,本发明量子密钥分发偏振编码装置实施例三:

[0066] 所述偏振编码装置的结构为:所述双向偏振调制模块2包括第五偏振分束器2-9、法拉第旋转器2-11和第三相位调制器2-10,所述第五偏振分束器2-9的第一端口、第四端口分别作为双向偏振调制模块2的第一端口、第二端口;所述第五偏振分束器2-9的第二端口依次连接第三相位调制器2-10、法拉第旋转器2-11之后与第三端口相连,构成萨格纳克环;所述法拉第旋转器的偏振旋转角度为 $90^\circ$ ,支持双轴工作,两端的偏振方向均与保偏光纤慢轴对准。

[0067] 实施例三偏振编码过程为:

[0068] 水平偏振的光脉冲P1进入所述偏振编码装置的输入端口In,首先从第一环形器1的第一端口进入从第二端口出射,经过 $45^\circ$ 熔接点偏振旋转后,偏振态变为 $1/\sqrt{2}(|H\rangle + |V\rangle)$ ,水平偏振分量P11沿保偏光纤L1慢轴传播,竖直偏振分量P12沿保偏光纤L1快轴传播,随后到达第五偏振分束器2-9的第一端口,其中P11从第三端口透射,沿保萨格纳克环内的保偏光纤慢轴传播,经过 $90^\circ$ 法拉第旋转器2-11之后偏振旋转了 $90^\circ$ ,仍然沿保偏光纤慢轴传播,经过第三相位调制器2-10时调制相位 $\phi_1$ ,然后到达第五偏振分束器2-9的第二端口,反射到第一端口,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P11从第五偏振分束器2-9的第一端口入射时沿保偏光纤L1的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0069] P12从第五偏振分束器2-9的第二端口反射,沿萨格纳克环的保偏光纤慢轴传播,经过第三相位调制器2-10时不调相,随后经过 $90^\circ$ 法拉第旋转器偏振旋转 $90^\circ$ 后仍沿保偏光纤慢轴传播,最后到达第五偏振分束器2-9的第三端口,透射到第一端口,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P12从第三偏振分束器2-6的第一端口入射时沿保偏光纤L1的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了 $90^\circ$ 。

[0070] 由于P11和P12均经过了萨格纳克环的保偏光纤慢轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P11经过第三相位调制器2-10时调制了相位 $\phi_1$ ,P12经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\phi_1$ 。因此,双向偏振调制模块2第一次偏振调制的作用可以表示为

$$[0071] \quad BPM1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\phi_1} & 0 \end{bmatrix}$$

[0072] 光脉冲P11和P12从第五偏振分束器2-9的第一端口出射后合成一个脉冲P2,再次经过保偏光纤L1和 $45^\circ$ 偏振旋转之后进入第一环形器1的第二端口,从其第三端口出射,并沿保偏光纤L2到达第五偏振分束器2-9的第四端口。其中,沿保偏光纤L2慢轴传播的偏振分



量P21被反射到第三端口,沿保萨格纳克环内的保偏光纤快轴传播,经过90°法拉第旋转器2-11之后偏振旋转了90°,仍然沿保偏光纤快轴传播,经过第三相位调制器2-10时调制相位 $\varphi_2$ ,然后到达第五偏振分束器2-9的第二端口,透射到第四端口,沿保偏光纤快轴传播。可以看出P21从第五偏振分束器2-9的第四端口入射时沿保偏光纤L2的慢轴传播,再次出射时沿快轴传播,偏振旋转了90°。

[0073] P22从第五偏振分束器2-9的第二端口透射,沿萨格纳克环的保偏光纤快轴传播,经过第三相位调制器2-10时不调相,随后经过90°法拉第旋转器偏振旋转90°后仍沿保偏光纤快轴传播,最后到达第五偏振分束器2-9的第三端口,反射到第四端口,沿保偏光纤慢轴传播。可以看出P12从第五偏振分束器2-9的第四端口入射时沿保偏光纤L2的快轴传播,再次出射时沿慢轴传播,偏振旋转了90°。

[0074] 由于P21和P22均经过了萨格纳克环的保偏光纤快轴,二者所经历的相位变化相同,而由于P21经过第三相位调制器2-10时调制了相位 $\varphi_2$ ,P22经过时不调相,所以二者之间的相位差为 $\varphi_2$ 。因此,双向偏振调制模块2第二次偏振调制的作用可以表示为

$$[0075] \quad BPM2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_2} & 0 \end{bmatrix}$$

[0076] 光脉冲P21和P22从第五偏振分束器2-9的第四端口出射后合成一个脉冲P3,再次经过保偏光纤L2之后回到第一环形器1的第三端口,从其第四端口出射,最终从偏振编码装置的输出端口Out出射,可以通过琼斯矩阵计算输出的偏振态。光脉冲依次经过45°偏振旋转、保偏光纤A1、双向偏振调制模块2第一次偏振调制、保偏光纤L2以及双向偏振调制模块2第二次偏振调制,最终从偏振编码装置输出的偏振态为

$$E1 = \overline{PMF2} \cdot BPM2 \cdot \overline{PMF2} \cdot \overline{R45} \cdot \overline{PMF1} \cdot BPM1 \cdot \overline{PMF1} \cdot \overline{R45} \cdot E0$$

$$[0077] \quad = \frac{e^{i(\varphi_1+\varphi_2)}}{2} \begin{bmatrix} 1 - e^{i\varphi_1} \\ e^{i\varphi_2}(1 + e^{i\varphi_1}) \end{bmatrix} = e^{i(\varphi_1+\varphi_2+\frac{\varphi_1}{2})} \begin{bmatrix} -i \sin \frac{\varphi_1}{2} \\ e^{i\varphi_2} \cos \frac{\varphi_1}{2} \end{bmatrix}$$

[0078] 忽略全局相位因子,可以得到光脉冲的偏振态为 $E1 = -i \sin \frac{\varphi_1}{2} |H\rangle + e^{i\varphi_2} \cos \frac{\varphi_1}{2} |V\rangle$ 。可以看出制备的偏振态仅与调制的相位差 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 有关,因此偏振编码装置的态制备非常稳定,不存在相位漂移,无需进行任何补偿。通过调制不同的相位差 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ,可以制备X、Y、Z基下的6种偏振态,如表1所示。

[0079] 本发明还公开了一种偏振编码量子密钥分发系统,实施例的结构如图6所示,包括发射端Alice以及接收端Bob,发射端Alice包括激光器、强度调制器、偏振编码装置以及可调衰减器,所述偏振编码装置采用实施例三中的具体接受,所述发射端Alice中,激光器通过强度调制器连接偏振编码装置的输入端口,所述偏振编码装置的输出端口连接可调衰减器后耦合到空间中,通过自由空间信道与接收端Bob相连。所述接收端Bob包括偏振解码装置、第七偏振分束器、第一单光子探测器和第二单光子探测器SPD2,所述偏振解码装置包括第二环形器、第六偏振分束器、第二法拉第旋转器、第四相位调制器,结构与发射端Alice的偏振编码结构相同,唯一的区别在于将45°熔接点从环形器第二端口之后移到第三端口之后。从自由空间信道进入接收端Bob的光信号通过光纤耦合后进入第二环形器的第一端口,

经过解码之后从第二环形器的第四端口出射,最后通过第七偏振分束器、第一单光子探测器和第二单光子探测器进行探测。

[0080] 具体偏振解码过程为:

[0081] 从发射端Alice发出的量子态为 $E1 = -i \sin \frac{\varphi_1^A}{2} |H\rangle + e^{i\varphi_2^A} \cos \frac{\varphi_1^A}{2} |V\rangle$ ,按照表1制备6种偏振态,经过信道传输后到达接收端Bob,首先从第二环形器的第一端口到达第二端口,经过保偏光纤到达第六偏振分束器,两个偏振分量经过萨格纳克环后偏振均旋转 $90^\circ$ ,二者之间的相位差被第四相位调制器调制为 $\varphi_1^B$ ,然后经过保偏光纤返回第二环形器的第二端口,从第三端口出射,经过 $45^\circ$ 偏振旋转之后沿保偏光纤到达第六偏振分束器,两个偏振分量经过萨格纳克环后偏振均旋转 $90^\circ$ ,二者之间的相位差被第四相位调制器调制为 $\varphi_2^B$ ,然后经过保偏光纤和 $45^\circ$ 偏振旋转后返回第二环形器的第三端口,从第四端口出射,最后到达第七偏振分束器,水平分量透射进入第二单光子探测器,垂直分量反射进入第一单光子探测器。解码过程与编码过程类似,可以通过琼斯矩阵来描述解码过程,得到两个单光子探测器的探测概率。

[0082] 由前面的分析可知,往返两次经过同一段保偏光纤对偏振态无影响,只增加了整体相位,因此其作用可以忽略,作为单位矩阵来处理。因此,从第二环形器的第四端口出射的偏振态可写为

$$\begin{aligned}
 E2 &= \overline{R45} \cdot \overline{BPM2} \cdot \overline{R45} \cdot \overline{BPM1} \cdot E1 \\
 &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_1^B} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -e^{i\varphi_1^B} & 0 \end{bmatrix} \cdot E1 \\
 &= e^{i(\varphi_1^A + \varphi_2^B)} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1^B} \sin \frac{\varphi_1^A}{2} \sin \frac{\varphi_2^B}{2} + e^{i\varphi_2^A} \cos \frac{\varphi_1^A}{2} \cos \frac{\varphi_2^B}{2} \\ ie^{i\varphi_1^B} \sin \frac{\varphi_1^A}{2} \cos \frac{\varphi_2^B}{2} - ie^{i\varphi_2^A} \cos \frac{\varphi_1^A}{2} \sin \frac{\varphi_2^B}{2} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[0084] 当 $\varphi_1^B = \varphi_2^A$ 时,忽略全局相位因子,出射偏振态为

$$E2 = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi_1^A - \varphi_2^B}{2} \\ i \sin \frac{\varphi_1^A - \varphi_2^B}{2} \end{bmatrix}$$

[0086] 因此,第一单光子探测器和第二单光子探测器探测到光子的概率分别为 $SPD1 = \left(\sin \frac{\varphi_1^A - \varphi_2^B}{2}\right)^2$ 和 $SPD2 = \left(\cos \frac{\varphi_1^A - \varphi_2^B}{2}\right)^2$ ,当相位差 $\varphi_1^A - \varphi_2^B = 0$ 时, $SPD1=0, SPD2=1$ ,即第一单光子探测器不响应,第二单光子探测器响应;当相位差 $\varphi_1^A - \varphi_2^B = \pi$ 时, $SPD1=1, SPD2=0$ ,即第一单光子探测器响应,第二单光子探测器不响应,这两种情况说明发射端和接收端的基矢匹配;当相位差 $\varphi_1^A - \varphi_2^B = \pm \pi/2$ 时, $SPD1=0.5, SPD2=0.5$ ,即第一单光子探测器和第二单光子探测器响应的概率均为50%,这两种情况说明发射端和接收端的基矢不匹



配。因此,通过调制 $\varphi_1^B, \varphi_2^B$ 即可对发射端所发出的6种偏振态进行完备地测量,可完整实现6态协议。

[0087] 特别地,保持 $\varphi_1^B = \varphi_2^A = 0$ 时,量子密钥分发系统可制备4种偏振态并进行相应地测量,即可以实现BB84协议。

[0088] 综合本发明实施例可知,本发明提出一种量子密钥分发偏振编码装置及系统,可以稳定制备6种偏振态,无需多激光器,消除了多激光器波长不一致导致的安全性漏洞,制备偏振态非常稳定,无需任何补偿,接收端只需2个单光子探测器,降低了系统的复杂度和成本。另外,本发明的偏振编码装置可用于实现BB84协议、6态协议和参考系无关协议。

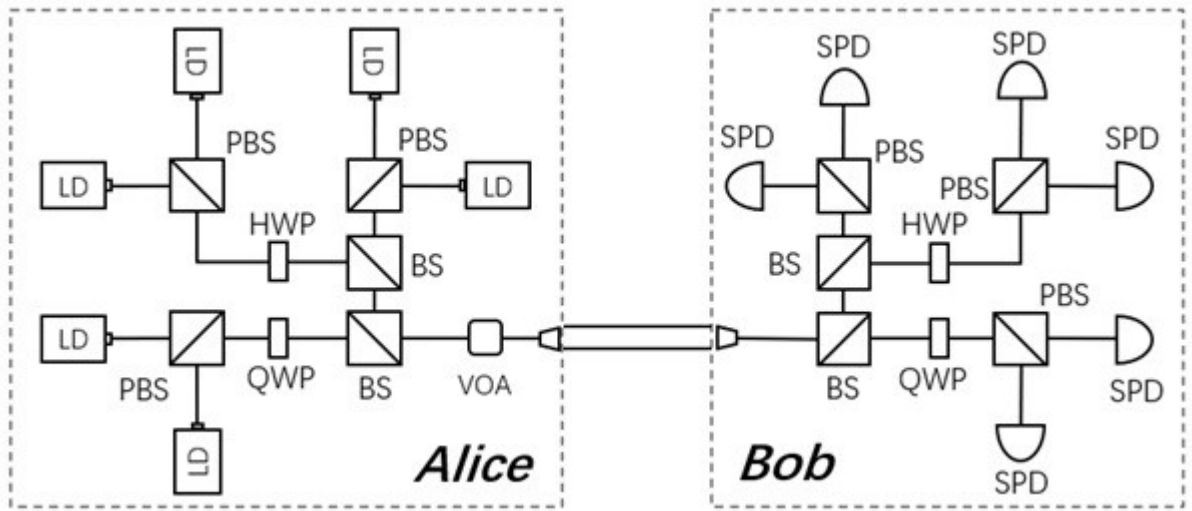


图1

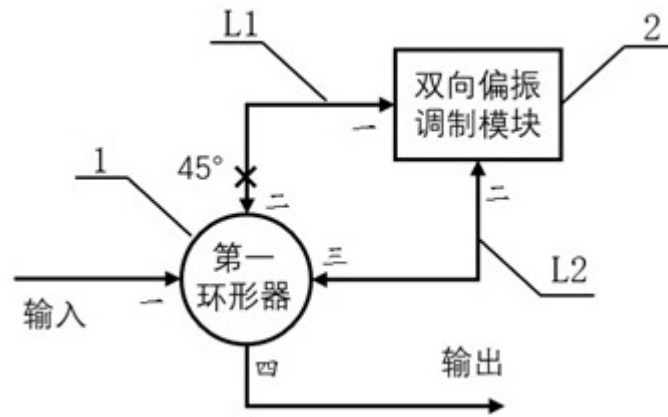


图2

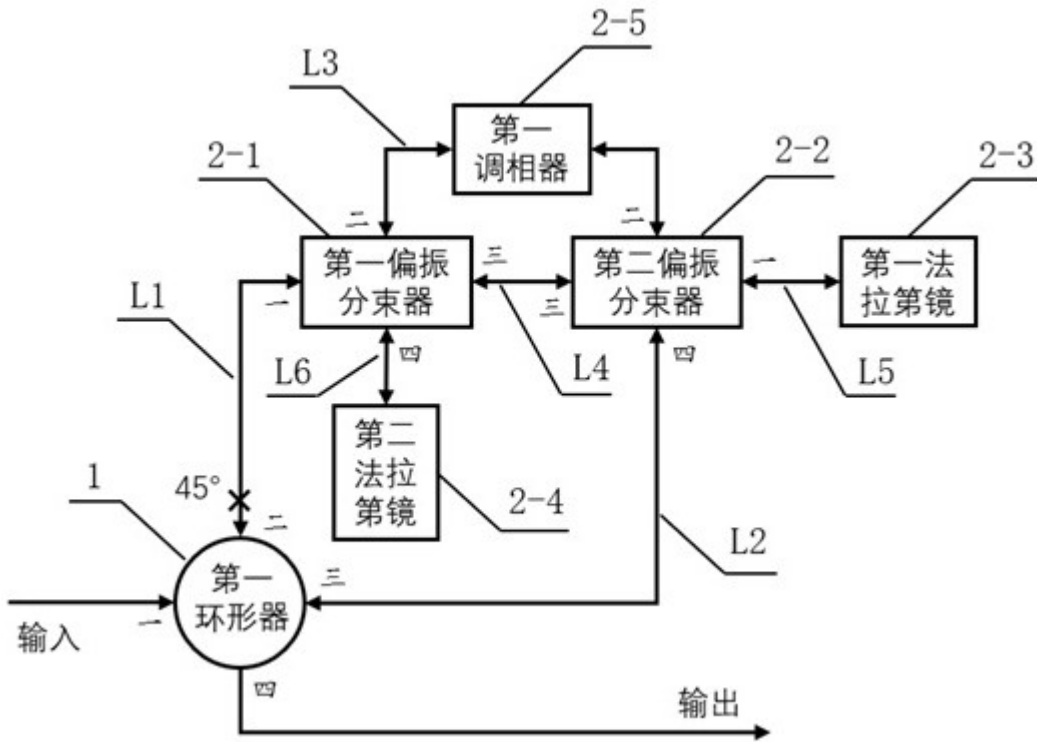


图3

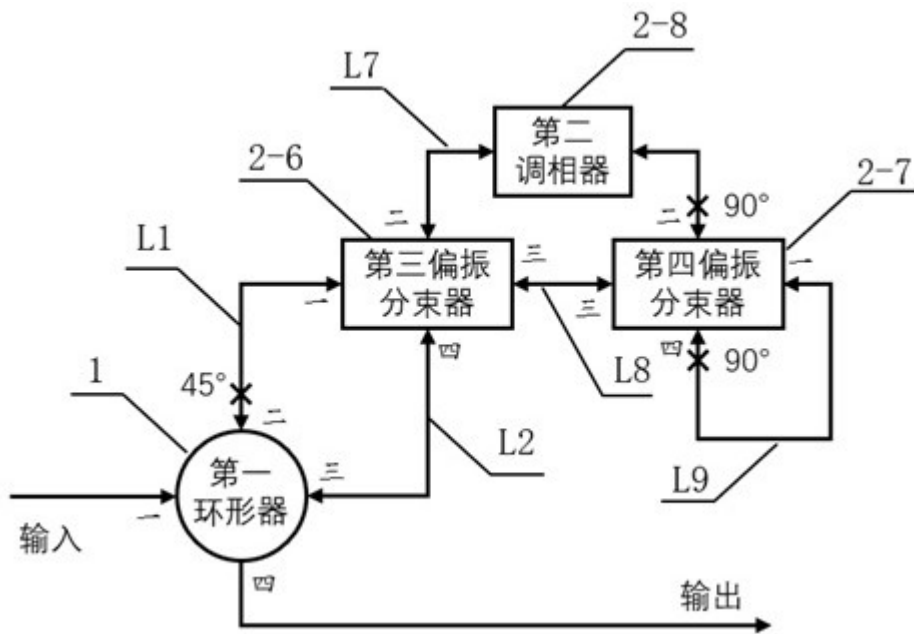


图4

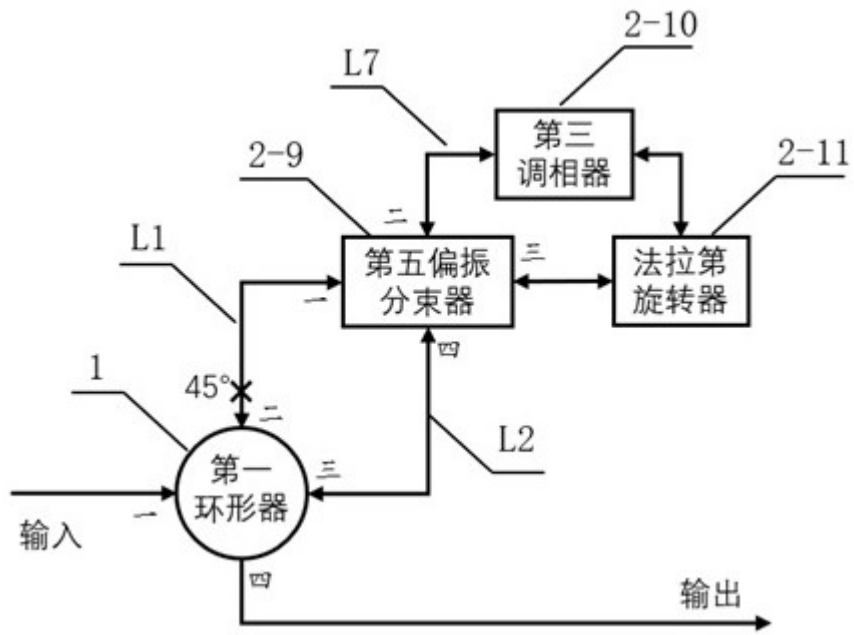


图5

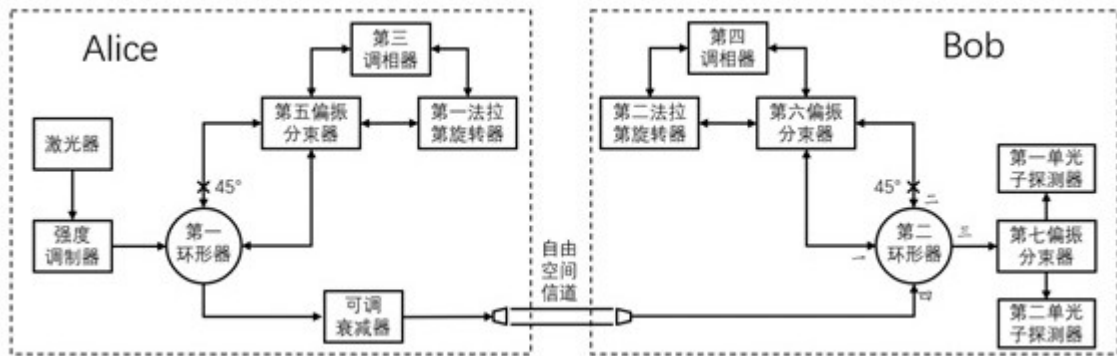


图6