证书号第6469999号

发明专利证书

发 明 名 称：基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统及方法

发　明　人：息朝祥;何广强

专　利　号：ZL 2021 1 1596096.9

专利申请日：2021年12月24日

专 利 权 人：上海交通大学

地　　址：200240 上海市闵行区东川路800号

授权公告日：2023年11月07日　　授权公告号：CN 114285489 B

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发发明专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为二十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

国家知识产权局
2023年11月07日

其他事项参见续页

证书号第6469999号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年12月24日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

上海交通大学

发明人：

息朝祥;何广强

(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 114285489 A
(43)申请公布日 2022.04.05

(21)申请号 202111596096.9

(22)申请日 2021.12.24

(71)申请人 上海交通大学
地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 息朝祥 何广强

(74)专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 31317
代理人 徐红银 张琳

(51)Int.Cl.
H04B 10/70(2013.01)
H04L 9/08(2006.01)
H04J 14/02(2006.01)

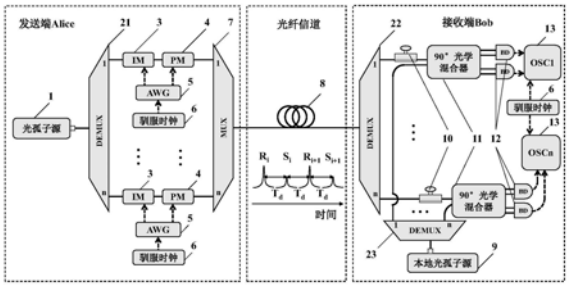
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统及方法

(57)摘要

本发明提供基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,包括:发送端,所述发送端使用光孤子源作为光源,并将其分离至各个波长通道;每个波长通道运用先导辅助的前馈数据恢复方案进行连续变量量子密钥分发;光纤信道,所述光纤信道传输所述发送端发出的光信号;接收端,所述接收端接收所述经光纤信道传输的光信号,并将其分离至各个波长通道;所述接收端使用本地光孤子源作为光源,并将其分离至所述各波长通道进行信号外差探测并进行后处理,获取量子密钥。本发明采用的光孤子源除了与分立激光器相比具有基本的技术优势外,频率梳还可以减少发送端的功率消耗。光孤子源的整体功耗已经可以与大规模平行阵列的商用集成可调谐激光器组件竞争。



CN 114285489 A

1.一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征在于,包括:

发送端,所述发送端使用光孤子源作为光源,并将光孤子分离至各个波长通道;每个所述波长通道运用先导辅助的前馈数据恢复方案进行连续变量量子密钥分发;

光纤信道,所述光纤信道传输所述发送端发出的光信号;

接收端,所述接收端接收所述经光纤信道传输的光信号,并将其分离至各个波长通道;所述接收端使用本地光孤子源作为光源,并将其分离至所述各波长通道进行信号外差探测并进行后处理,获取量子密钥。

2.根据权利要求1所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征在于,所述发送端,包括:

第一解复用器,所述第一解复用器分离处于不同波长通道的光孤子梳状光谱,每个波长通道对应于接收端(Bob)的一个用户;

强度调制器,所述强度调制器连接于每个波长通道;

相位调制器,所述相位调制器连接于每个波长通道,并位于所述强度调制器之后;

任意波形发生器,所述任意波形发生器分别与所述强度调制器和相位调制器连接;

卫星驯服时钟,所述卫星驯服时钟与所述任意波形发生器连接;每个波长通道的光信号由强度调制器和相位调制器进行调制,调制信号来自任意波形发生器,任意波形发生器的频率标准由卫星驯服时钟提供。

复用器,所述复用器将每个波长通道的光信号复用至所述光纤信道。

3.根据权利要求2所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征在于,所述先导辅助的前馈数据恢复方案,包括:发送端(Alice)交替发出一个量子信号和一个由光孤子同一频率成分产生的相位参考脉冲;

所述量子信号携带Alice的随机数,相位参考脉冲未经调制;

所述每个波长通道的量子信号和相位参考脉冲经过所述复用器复用至一根所述光纤信道中,由光纤信道传输到接收端。

4.根据权利要求1所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征在于,所述接收端,包括:

第二解复用器,所述第二解复用器将通过所述光纤信道传输的光信号分离各波长通道,

第三解复用器,所述第三解复用器将本地光孤子源的各波长通道解复用后获得对应的本振光,与所述各波长通道的光信号进行外差探测。

5.根据权利要求4所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征在于,所述接收端,还包括:

偏振控制器,所述偏振控制器连接于发送端的光信号的每个波长通道;

90°光学混合器,所述90°光学混合器并联于发送端的光信号和本地光孤子源的波长通道处;

平衡光探测器,所述平衡光探测器连接于所述90°光学混合器之后,

示波器,所述示波器与所述平衡光探测器连接,

卫星驯服时钟,所述卫星驯服时钟与所述示波器连接。

6.根据权利要求5所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统,其特征

在于，所述外差探测，包括：

来自发送端的光信号经过偏振控制器调整偏振后，和对应的来自本地光孤子源的本振光一起输入90°光学混合器中，再经两个平衡光探测器转为电信号输入示波器；示波器由卫星驯服时钟提供频率基准，从而实现与发送端的任意波形发生器同步。

7.根据权利要求1所述的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统，其特征在于，所述外差探测，还包括：

接收端利用已有的外差探测方案，使用本振光测量相位参考脉冲的正则分量，

相位参考脉冲的幅度与相位这两个正则分量(X_R,P_R)的测量结果用来确定相位参考脉冲的瞬时相位Φ_R，$\phi_R = -\tan^{-1}\frac{P_R}{X_R}$；

一个量子信号S_i和相应的相位参考脉冲R_i在不同时间被测量，其时间延迟为T_d；

从R_i和R_{i+1}的相位测量结果中计算出量子信号$\Phi_{S,i}$的估计值为$\overline{\phi}_{S,i} = \frac{\phi_{R,i} + \phi_{R,i+1}}{2} = \phi_{R,i} + 2\pi\overline{f}_d T_d$，其中$\overline{f}_d = \left(\phi_{R,i+1} - \phi_{R,i} / 4\pi T_d\right)$是光孤子源和本地光孤子源在两个相邻的相位参考脉冲之间的短时间隔内的频率差；

获得所述量子信号瞬时相位的估计值$\overline{\phi}_{S,i}$，完成外差探测。

8.一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发方法，基于权利要求1-7任一项所述的系统，其特征在于，包括：

发送端的光孤子提供等频率间隔的连续载波；

分别在所述各频率上交替加载量子信息和相位参考脉冲；

利用波分复用发送量子信息和相位参考脉冲至光纤信道中；

在接收端解复用并和本地光孤子源对应的本振光发送至用户；

用户经先导辅助的前馈数据恢复方案的探测和后处理，获取量子密钥。

9.一种终端，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述程序时可用于执行权利要求8所述的方法，或，运行权利要求1-7中任一项所述的系统。

10.一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，该程序被处理器执行时可用于执行权利要求1-7中任一项所述的系统，或，运行权利要求8所述的方法。

基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及连续变量量子密钥分发系统,具体地,涉及一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统及方法。

背景技术

[0002] 使用弱相干态和零差检测的连续变量量子密钥分发(CV-QKD)由于其与现有电信设备的兼容性和高检测效率,是量子密钥分发的一个有希望的候选方案。量子密钥分发(QKD)是一种基于传输非正交量子态的方法,在两个相距遥远的当事人,即Alice和Bob之间产生一个秘密密钥。在传输和测量这些量子态后,Alice和Bob交换经典信息,并进行后处理以生成安全密钥。为了防止中间人攻击,Alice和Bob需要事先验证这些经典信息(所以严格来说QKD是一个密钥生成协议)。一个著名的CV-QKD协议是高斯调制相干态(GMCS)协议,CV-QKD使用的相干态相对于压缩态协议的优势主要在于避免了技术上具有挑战性的压缩光的产生(Advanced Quantum Technologies,2018,1(1):1800011),同时它对非相干背景噪声具有鲁棒性。

[0003] 在GMCS QKD中,Alice从一组高斯随机数(平均值为0,方差为VAN0)中抽取两个随机数XA和PA,相应地制备一个相干态,并将其发送给Bob。这里,N0＝1/4表示散粒噪声方差。在Bob端,他可以进行光零差探测或光外差探测。在基于零差检测的GMCS QKD协议中,Bob随机选择测量传入信号的振幅(X)或相位(P)。之后,他通过一个认证的公共信道宣布他对每个传入信号测量的正交度,而Alice只保留相应的数据。在基于外差检测的GMCS QKD中,Bob首先用一个50:50的分束器将传入的信号分成两个。然后他在一个输出端口测量X,在另一个端口测量P。在这种情况下,Al ice保留她所有的正交数据。在量子传输阶段之后,Alice分享一组相关的高斯随机变量(称为"原始密钥")与Bob分享。Alice和Bob通过一个认证的经典信道比较原始密钥的随机样本,以估计量子信道的传输率和过剩噪声。如果观察到的过剩噪声足够小,他们可以进一步算出一个安全的密钥。但是为了减少相位噪声,GMCS CV-QKD信号和本振光(LO)都由同一激光器产生,并通过不安全的量子通道传播。这增加了系统不安全性和复杂度,并且通过有损信道发送强LO会大大降低QKD的效率。目前对CV-QKD已经有了先导辅助的前馈数据恢复方案,该方法不需要在量子信号和本地振荡器激光之间进行频率和相位锁定(Physical Review X,2015,5(4):041009)。

[0004] 光孤子是在传播过程中保持其形状的波形,是色散和非线性平衡的结果,其频谱成梳状。通过使用相干频率梳的连续载波作为通信的载体,孤子可以在光通信中作为大规模平行波分复用的一个关键元素,提供更好的可扩展性,以提高数据传输率。耗散克尔孤子(DKS)(依靠参数增益和腔体损耗以及色散和非线性的双重平衡的孤子)通过克尔非线性介导的四光子相互作用,可生成低噪声、光谱平滑、宽带的光频率梳(Science,2016,351(6271):357-360)。孤子为大规模并行波分复用提供数十甚至数百个定义明确的窄带光载波;与从激光阵列模块中得到的载波不同,梳子的频率在本质上是等距的,从而消除了对单个波长控制和信道间保护带的需要。此外,当来自同一光孤子时,光载波的随机频率变化是

强烈相关的，允许有效地补偿由传输光纤的非线性引起的损害。为了在光通信中的应用，频率梳状源必须是紧凑的；基于微谐振器的DKS频率梳源具有良好的可扩展性，用于发射器和接收器的大规模并行通信，有可能取代目前用于高速通信的连续激光器阵列(Nature，2017，546(7657)：274-279)。

[0005] 然而，连续变量量子密钥分发还没有利用光孤子上述优良特性，连续变量量子密钥分发系统大规模组网能力有待进一步拓展。

发明内容

[0006] 针对现有技术中的缺陷，本发明的目的是提供一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统和方法。

[0007] 根据本发明的一个方面，提供一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统，包括：

[0008] 发送端，所述发送端使用光孤子源作为光源，并将其分离至各个波长通道；每个波长通道运用先导辅助的前馈数据恢复方案进行连续变量量子密钥分发；

[0009] 光纤信道，所述光纤信道传输所述发送端发出的光信号；

[0010] 接收端，所述接收端接收所述经光纤信道传输的信号，并将其分离至各个波长通道；所述接收端使用本地光孤子源作为光源，并将其分离至所述各波长通道进行信号外差探测并进行后处理，获取量子密钥。

[0011] 优选地，所述发送端，包括：

[0012] 第一解复用器，所述第一解复用器分离处于不同波长通道的光孤子梳状光谱，每个波长通道对应于接收端(Bob)的一个用户；

[0013] 强度调制器，所述强度调制器连接于每个波长通道；

[0014] 相位调制器，所述相位调制器连接于每个波长通道，并位于所述强度调制器之后；

[0015] 任意波形发生器，所述任意波形发生器分别与所述强度调制器和相位调制器连接；

[0016] 卫星驯服时钟，所述卫星驯服时钟与所述任意波形发生器连接；每个波长通道的光信号由强度调制器和相位调制器进行调制，调制信号来自任意波形发生器，任意波形发生器的频率标准由卫星驯服时钟提供。

[0017] 复用器，所述复用器将每个波长通道的光信号复用至所述光纤信道。

[0018] 优选地，所述先导辅助的前馈数据恢复方案，包括：发送端(Alice)交替发出一个量子信号和一个由光孤子同一频率成分产生的相位参考脉冲；

[0019] 所述量子信号携带Alice的随机数，相位参考脉冲未经调制；

[0020] 所述每个波长通道的量子信号和相位参考脉冲经过所述复用器复用至一根所述光纤信道中，由光纤信道传输到接收端。

[0021] 优选地，所述接收端，包括：

[0022] 第二解复用器，所述第二解复用器将通过所述光纤信道传输的光信号分离各波长通道，

[0023] 第三解复用器，所述第三解复用器将本地光孤子源的各波长通道解复用后获得对应的本振光，与所述各波长通道的光信号进行外差探测。

[0024] 优选地，所述接收端，还包括：

[0025] 偏振控制器，所述偏振控制器连接于发送端的光信号的每个波长通道；

[0026] 90°光学混合器，所述90°光学混合器并联于发送端的光信号和本地光孤子源的波长通道处；

[0027] 平衡光探测器，所述平衡光探测器连接于所述90°光学混合器之后，

[0028] 示波器，所述示波器与所述平衡光探测器连接，

[0029] 卫星驯服时钟，所述卫星驯服时钟与所述示波器连接。

[0030] 优选地，所述外差探测处理，包括：

[0031] 来自发送端的光信号经过偏振控制器调整偏振后，和对应的来自本地光孤子源的本振光一起输入90°光学混合器中，再经两个平衡光探测器转为电信号输入示波器；示波器由卫星驯服时钟提供频率基准，从而实现与发送端的任意波形发生器同步。

[0032] 优选地，接收端使用本振光测量相位参考脉冲，

[0033] 相位参考脉冲(X_R,P_R)的测量结果可以用来确定Φ_R，$\phi_R = -\tan^{-1}\frac{P_R}{X_R}$。

[0034] 根据本发明的第二个方面，提供一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发方法，包括：发送端的光孤子提供等频率间隔的连续载波；

[0035] 分别在所述各频率上交替加载量子信息和相位参考脉冲；

[0036] 利用波分复用发送量子信息和相位参考脉冲至光纤信道中；

[0037] 在接收端解复用并和本光光孤子源对应的本振光发送至用户；

[0038] 用户经先导辅助的前馈数据恢复方案的探测和后处理，获取量子密钥。

[0039] 根据本发明的第三个方面，提供一种终端，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时可用于执行上述的方法，或，运行上述系统。

[0040] 根据本发明的第四个方面，提供一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行时可用于执行上述的方法，或，运行上述系统。

[0041] 与现有技术相比，本发明具有如下的有益效果：

[0042] 1、本发明采用先导辅助的前馈数据恢复的探测方法，无需锁定信号和本振光，克服了在量子信号和本地振荡器激光之间进行频率和相位锁定的困难。

[0043] 2、本发明采用的光孤子源除了与分立激光器相比具有基本的技术优势外，频率梳还可以减少发送端的功率消耗。光孤子源的整体功耗已经可以与大规模平行阵列的商用集成可调谐激光器组件竞争。

[0044] 3、本发明利用光孤子宽带的光谱资源，发挥了CV-QKD在大规模并行波分复用方面的潜力，为量子密钥分发网络的构建打下了基础。

[0045] 4、本发明中的光孤子源可以采用集成微腔，可以实现小型密封封装，实现收发机的小型化，提高器件对外部环境干扰因素的抵抗能力。

[0046] 5、本发明提供的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统，结合量子光学、非线性光学等多个学科领域，创新地利用光孤子提高了CV-QKD的组网能力。

附图说明

[0047] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述，本发明的其它特征、目的和优点将会变得更明显：

[0048] 图1为本发明提供的一个实施例基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统的原理图。

[0049] 其中，1-光孤子源；21-第一解复用器；22-第二解复用器；23-第三解复用器；3-强度调制器；4-相位调制器；5-任意波形发生器；6-卫星驯服时钟；7-复用器；8-光纤；9-本地光孤子源；10-偏振控制器；11-90°光学混合器；12-平衡光探测器；13-示波器。

[0050]

具体实施方式

[0051] 下面结合具体实施例对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明，但不以任何形式限制本发明。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变形和改进。这些都属于本发明的保护范围。

[0052] 本发明提供一个实施例，一种基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统，包括：

[0053] 发送端，发送端使用光孤子源作为光源，并将其分离至各个波长通道；每个波长通道运用先导辅助的前馈数据恢复方案进行连续变量量子密钥分发；

[0054] 光纤信道，光纤信道传输发送端发出的光信号；

[0055] 接收端，接收端接收经光纤信道传输的信号，并将其分离至各个波长通道；接收端使用本地光孤子源作为光源，并将其分离至各波长通道进行信号外差探测并进行后处理，获取量子密钥。

[0056] 本实施例中，外差探测为来自发送端Alice的光信号和接收端Bob处的本振光之间的频率差。后处理是现有技术中的成熟技术，在本实施例中不再赘述。

[0057] 如图1所示，为发明的一个优选实施例的基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发系统的原理图。

[0058] 发送端包括光孤子源1、第一解复用器21、强度调制器3、相位调制器4、任意波形发生器5、卫星驯服时钟6和复用器7。

[0059] 使用光孤子源1作为发送端(Alice)的光源，光孤子的自由光谱范围称为FSR。

[0060] 解复用器2(DEMUX)分离处于不同波长通道的光孤子梳状光谱，每个波长通道对应于接收端(Bob)的一个用户。

[0061] 每个波长通道运用先导辅助的前馈数据恢复方案来进行连续变量量子密钥分发。在先导辅助的前馈数据恢复方案中，对于每个量子传输，发送端(Alice)交替发出一个量子信号和一个由光孤子同一频率成分产生的相对强的相位参考脉冲。该量子信号携带Alice的随机数，就像传统的GMCS CV-QKD的情况一样；另一方面，相位参考脉冲则没有被调制。每个波长通道的光信号由强度调制器3和相位调制器4进行调制，调制信号来自任意波形发生器5，任意波形发生器5的频率标准由卫星驯服时钟6提供。

[0062] 每个波长通道的量子信号和相位参考脉冲这两种脉冲经过一个复用器7(MUX)复

用至一根光纤8中，由光纤信道传输到接收端(Bob)。

[0063] 接收端包括本地光孤子源9、第二解复用器22、第三解复用器23、偏振控制器10、90°光学混合器11、平衡光探测器12、示波器13和卫星驯服时钟。

[0064] 接收端经过解第二复用器22分离各波长通道，并使用第三解复用器23将本地光孤子源9各波长通道解复用后对应的本振光(LO)对信号进行外差探测。其中，发送端的光孤子源和接收端本地光孤子源不存在光学和电学上的连接。

[0065] 为了更好的对信号进行外差探测，本发明提供一个优选实施例。

[0066] 为了避免检测器饱和，接收端可以使用一个相对较弱的本振光LO来测量相位参考脉冲。相位参考脉冲(X_R,P_R)的测量结果可以用来确定Φ_R，$\phi_R=-\tan^{-1}\frac{P_R}{X_R}$，其中的减号是由于相位参考的定义，$X_R$表示相位参考脉冲的振幅，$P_R$表示相位参考脉冲的相位。通过使用一个相对较强的相位参考脉冲，接收端可以获得对Φ_R的准确估计，并使用这一相位信息来建立与接收端的相位映射；Alice和Bob经过后处理之后，即可获得量子密钥。

[0067] 来自发送端的光信号经过偏振控制器10调整偏振后，和对应的来自本地光孤子源9的本振光一起输入90°光学混合器11中，再经两个平衡光探测器12转为电信号输入示波器13。示波器13由卫星驯服时钟6提供频率基准，从而实现与发送端的任意波形发生器5同步。

[0068] 作为一个优选实施例，如图1所示，在本实施例中，一个量子信号Si和相应的相位参考脉冲Ri在不同时间被测量，其时间延迟为Td。光孤子源1和本地光孤子源9各自的瞬时频率的偏移均为随机变量；光孤子源1和本地光孤子源9在同一波长通道下设定的光载波频率差(f1-f2)是一个常数，并且可以精确地确定。具体的，首先加上2π(f1-f2)Td的恒定相移来估计量子信号Si被测量时的相位$\Phi_{S,i}$。接着从Ri和Ri+1的相位测量结果中计算出$\Phi_{S,i}$的估计值为$\overline{\phi}_{S,i}=\frac{\phi_{R,i}+\phi_{R,i+1}}{2}=\phi_{R,i}+2\pi\overline{f}_dT_d$，其中$\overline{f}_d=\left(\phi_{R,i+1}-\phi_{R,i}/4\pi T_d\right)$是光孤子源1和本地光孤子源9在两个相邻的相位参考脉冲之间的短时间隔内的频率差。最后，获得该频率差，完成外差探测，以计算获得量子信号瞬时相位的估计值。

[0069] 本实施例中，光孤子源1和本地光孤子源9之间无需锁定，克服了在量子信号和本地振荡器激光之间进行频率和相位锁定的困难。

[0070] 作为一优选实施例，光孤子源1和本地光孤子源9均优选为单孤子源。

[0071] 作为一优选实施例，光孤子源1和本地光孤子源9的中心波长均优选为1550.12nm(频率为193.4THz)，自由光谱范围FSR均优选为100GHz，用以匹配国际电信联盟(ITU)100GHz波分复用通道的标准。

[0072] 作为一优选实施例，光孤子源和本地光孤子源均优选为由具有微加热器的集成微纳谐振腔，其中心波长和FSR可通过热调谐改变。

[0073] 作为一优选实施例，解复用器2和复用器4的频率间隔均优选为100GHz。

[0074] 基于上述实施例的相同构思，本发明还提供另一个实施例。基于光孤子的波分复用连续变量量子密钥分发方法，包括：

[0075] 在发送端利用光孤子提供的等频率间隔的连续载波，每个波长通道对应一个用户，分别在各频率成分上交替加载量子信息和相位参考脉冲，并经过波分复用发送至光纤信道中；在接收端处解复用并和本地光孤子源对应的本振光一起发给用户；用户经先导辅

助的前馈数据恢复方案的探测和后处理，即可获取量子密钥。本发明中，光孤子可以提供良好的可扩展性，可以降低系统成本，有利于构建大规模的连续变量量子密钥分发网络。

[0076] 基于上述实施例的相同构思，本发明还提供一个实施例。一种终端，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时可用于执行上述的方法，或，运行上述系统。

[0077] 基于上述实施例的相同构思，本发明还提供一个实施例。一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行时可用于执行上述的方法，或，运行上述系统。

[0078] 以上对本发明的具体实施例进行了描述。需要理解的是，本发明并不局限于上述特定实施方式，本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改，这并不影响本发明的实质内容。上述各优选特征在互不冲突的情况下，可以任意组合使用。

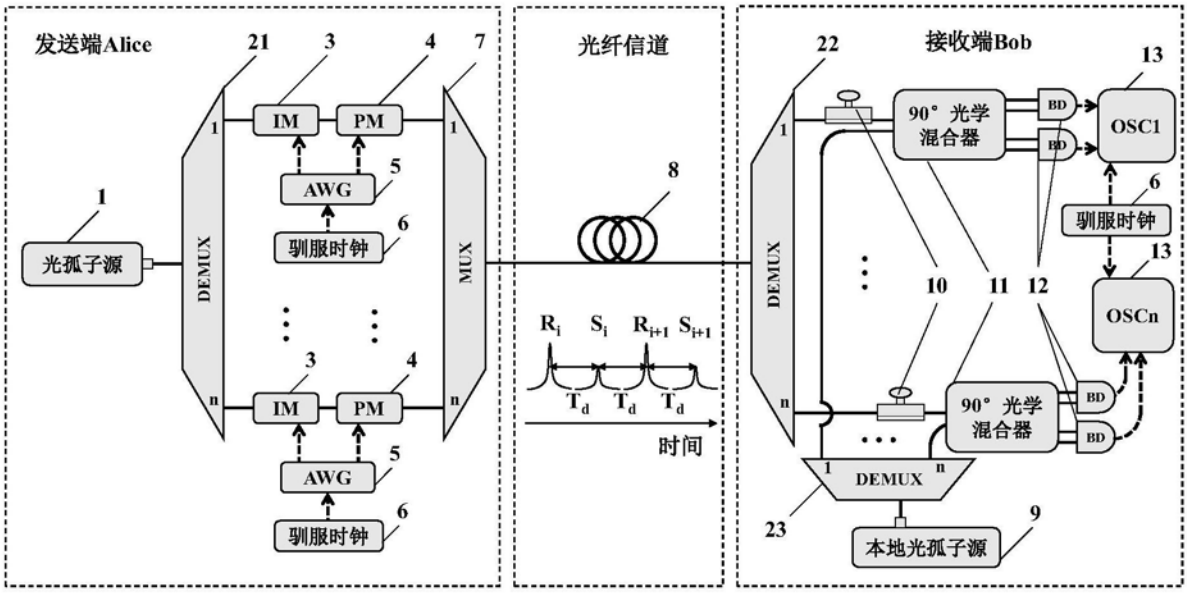

发送端Alice
光纤信道
接收端Bob
光孤子源
DEMUX
MUX
IM
PM
AWG
驯服时钟
90° 光学混合器
BD
OSC1
OSCn
本地光孤子源
时间

图1