

证书号第9131970号



专利公告信息

发明专利证书

发明名称：一种终端量子时间同步网络方法及系统

专利权人：上海交大平湖智能光电研究院;上海交通大学

地址：314200 浙江省嘉兴市平湖市经济开发区新兴二路988号三号楼三楼

发明人：何广强;李鑫龙

专利号：ZL 2023 1 0543085.7

授权公告号：CN 116405148 B

专利申请日：2023年05月15日

授权公告日：2026年07月24日

申请日时申请人：上海交大平湖智能光电研究院;上海交通大学

申请日时发明人：何广强;李鑫龙

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，并予以公告。
专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

申长雨





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116405148 A
(43) 申请公布日 2023. 07. 07

(21) 申请号 202310543085.7

(22) 申请日 2023.05.15

(71) 申请人 上海交大平湖智能光电研究院
地址 314200 浙江省嘉兴市平湖市经济开发
区新兴二路988号三号楼三楼
申请人 上海交通大学

(72) 发明人 何广强 李鑫龙

(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
专利代理师 徐红银 张琳

(51) Int. Cl.
H04J 3/06 (2006.01)
H04B 10/70 (2013.01)

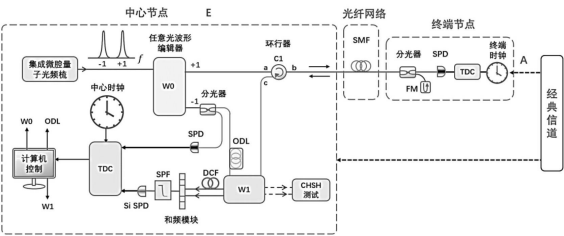
权利要求书2页 说明书10页 附图2页

(54) 发明名称

一种终端量子时间同步网络方法及系统

(57) 摘要

本发明提供一种终端量子时间同步网络方法及系统,包括:中心节点使用集成微腔光频梳作为纠缠源,获得数对个信号光与闲置光,用于各个节点时间同步;分离的信号光经过光纤链路传输后到达终端节点;终端节点有概率吸收或反射信号光,使信号光重新进入中心节点;闲置光有概率与反射信号光在和频模块中发生和频效应;中心节点的计算机根据和频信号结算的钟差动态调整使分离的信号光和闲置光在光纤中传输时经历相同的传播时间,实现钟差解算。本发明实现多终端同时进行时间同步;利用和频效应检测两地时钟差,在光域上进行,时间精度高,为飞秒量级;使用集成微腔光频梳作为纠缠源,可以同时提供大量的纠缠对,使得网络规模方便扩展、拓扑灵活。



1. 一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,包括:

中心节点从集成微腔量子光频梳中取出多对纠缠光子,所述纠缠光子分开为信号光和闲置光两路,所述信号光输入至终端节点,所述闲置光输入至所述中心节点本身;

在所述终端节点中,所述信号光一部分用于产生终端节点探测事件序列,并通过经典信道反馈至所述中心节点,另一部分被反射至所述中心节点的超快符合模块;

在所述中心节点中,所述闲置光一部分用于产生一个中心节点探测事件序列,另一部分经过时延和色散控制后,进入所述中心节点的超快符合模块;

在所述超快符合模块中,进入的所述信号光和所述闲置光和频,得到另一个中心节点探测事件序列;

基于所述终端节点探测事件序列和所有所述中心节点探测事件序列,进行钟差解算,获得钟差;

基于所述钟差,调整对闲置光的时延和色散控制,实现所述闲置光与所述信号光经历相同的传播时间,从而实现多个终端节点的时间同步。

2. 根据权利要求1所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,所述光频梳为中心频率为 f_{s0} ,重复频率为 f_{sr} 的多纠缠源,所述中心频率 f_{s0} 的对称梳齿为一对纠缠光子;

所述光频梳由任意光波形编辑器 W_0 将与 f_{s0} 对称的两侧梳齿分为所述信号光与闲置光两路;

所述信号光依次经过环行器与光纤链路传输至所述终端节点。

3. 根据权利要求2所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,所述在所述终端节点中,所述信号光一部分用于产生终端节点探测事件序列,并通过经典信道反馈至所述中心节点,另一部分被反射至所述中心节点的超快符合模块,包括:

所述信号光经过分光器分成两路,一路经法拉第反射镜FM反射回所述中心节点,经所述环行器和任意光波形编辑器后进入超快符合模块;

另一路经单光子探测模块SPD、时间-数字转换模块TDC进行时间标记,形成终端节点探测事件序列,所述单光子探测模块TDC的同步信号由终端时钟提供。

4. 根据权利要求2所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,所述在所述中心节点中,所述闲置光一部分用于产生一个中心节点探测事件序列,另一部分经过时延和色散控制后,进入所述中心节点的超快符合模块,包括:

所述闲置光经过分光器分成两路,一路由单光子探测模块SPD接收,形成闲置光的一个探测事件序列,另一路任意光波形编辑器的时延和色散后进入超快符合模块。

5. 根据权利要求1所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,在所述超快符合模块中,所述信号光和所述闲置光和频,得到另一个中心节点探测事件序列,包括:

任意光波形编辑器输出的所述信号光和所述闲置光进入和频模块SPF发生和频效应,获得和频信号;

硅单光子探测模块SiSPD探测所述和频信号,并输出至中心节点的时间-数字转换模块TDC进行时间标记,获得中心节点探测事件序列,所述中心节点的时间-数字转换模块TDC的同步信号由中心时钟提供。

6. 根据权利要求1所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,所述基于所述终端节点探测事件序列和所有所述中心节点探测事件序列,进行钟差解算,获得钟差,包

括:

通过快速傅里叶变换和其逆变换从探测事件序列中获得中心节点与终端节点的探测事件序列的关联函数为 $c(\tau) = F^{-1}[F^*[a] \cdot F[b]]$,其中,a、b分别代表中心节点、终端节点的探测事件序列; τ 为时间偏移量;

通过时延控制搜索所述关联函数 $c(\tau)$ 中的最大值找到时间偏移;

得到所述关联函数在 τ_1 处达极大值,中心节点处的和频信号在 τ_2 处达极大值,得到钟差 δ : $\delta = \tau_1 - \frac{1}{2}\tau_2$ 。

7.根据权利要求1所述的一种终端量子时间同步网络方法,其特征在于,所述基于所述钟差,调整对闲置光的时延和色散控制,实现所述闲置光与所述信号光经历相同的传播时间,从而实现多个终端节点的时间同步,包括:

基于所述钟差,通过光学延迟线ODL消除钟差,通过色散补偿光纤DCF调整补偿光纤色散,实现中心节点与一个终端节点的时间同步;

从当前节点的通信光路切换到要同步的终端节点的通信光路或者使用另一对频率纠缠光子,实现多个终端节点之间的量子时间同步。

8.一种终端量子时间同步网络系统,其特征在于,包括中心节点和多个终端节点;所述中心节点和多个所述终端节点之间实现权利要求1-7任一项所述的多终端量子时间同步网络方法,其中:

每个终端节点和所述中心节点通过单根光纤连接;

或者,多个终端节点通过波分复用共用一条光纤链路与所述中心节点连接,并在终端节点前插入阵列波导光栅用于波长解复用,配合中心节点对任意光波形编辑器的波分复用与解复用。

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1-7中任一项所述的方法,或,运行权利要求8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中任一项所述的方法,或,运行权利要求8所述的系统。

一种终端量子时间同步网络方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及量子时间同步技术领域,具体地,涉及一种终端量子时间同步网络方法及系统。

背景技术

[0002] 时间作为基本物理量,时间同步精度的提高推动着基本物理的前沿探索、保证着人类社会的高效运转。在对时间同步方法精度有影响的各种噪声中,由到达时间测量产生的噪声是基本噪声,即散粒噪声极限。量子时间同步是一项新兴技术,它在时间同步系统中利用量子光源和量子测量技术,信号到达时间的测量精度可以突破经典极限。且量子时间同步系统可以进一步利用量子不可克隆定理等物理定律,融合量子安全的概念,实现传统时间同步方法难以企及的安全性。时间同步各方可以通过与量子纠缠的光子对同步,并进行贝尔测量来验证每个光子的来源是否可靠。如果信号被克隆或量子纠缠度受到干扰,其干扰程度可以通过贝尔不等式来约束。可以将贝尔测量结果添加到通过经典信道传输的时间信息中,有望解决目前经典时间同步协议中的欺骗问题。

[0003] 目前常见的量子时间同步协议有:基于符合测量纠缠光子对的单向量子时间同步协议、基于纠缠光子的二阶量子相干符合测量的时间同步协议、双向量子时间同步协议等。量子时间同步中对光子到达时刻的符合测量十分关键,一般采用的手段为单光子探测器输出电信号的时间间隔探测、洪欧曼(Hong Ou-Mandel, HOM)二阶量子干涉;虽然HOM干涉提供了比电学手段更精确的符合测量,但HOM干涉仍局限在亚皮秒量级。

发明内容

[0004] 针对现有技术中的缺陷,本发明的目的是提供一种终端量子时间同步网络方法及系统。

[0005] 根据本发明的一个方面,提供一种终端量子时间同步网络方法,包括:

[0006] 中心节点从集成微腔量子光频梳中取出多对纠缠光子,所述纠缠光子分开为信号光和闲置光两路,所述信号光输入至终端节点,所述闲置光输入至所述中心节点本身;

[0007] 在所述终端节点中,所述信号光一部分用于产生终端节点探测事件序列,并通过经典信道反馈至所述中心节点,另一部分被反射至所述中心节点的超快符合模块;

[0008] 在所述中心节点中,所述闲置光一部分用于产生一个中心节点探测事件序列,另一部分经过时延和色散控制后,进入所述中心节点的超快符合模块;

[0009] 在所述超快符合模块中,进入的所述信号光和所述闲置光和频,得到另一个中心节点探测事件序列;

[0010] 基于所述终端节点探测事件序列和所有所述中心节点探测事件序列,进行钟差解算,获得钟差;

[0011] 基于所述钟差,调整对闲置光的时延和色散控制,实现所述闲置光与所述信号光经历相同的传播时间,从而实现多个终端节点的时间同步。

[0012] 优选地,所述光频梳为中心频率为 f_{s0} ,重复频率为 f_{sr} 的多纠缠源,所述中心频率 f_{s0} 的对称梳齿为一对纠缠光子;

[0013] 所述光频梳由任意光波形编辑器W0将与 f_{s0} 对称的两侧梳齿分为所述信号光与闲置光两路;

[0014] 所述信号光依次经过环行器与光纤链路传输至所述终端节点。

[0015] 优选地,所述在所述终端节点中,所述信号光一部分用于产生终端节点探测事件序列,并通过经典信道反馈至所述中心节点,另一部分被反射至所述中心节点的超快符合模块,包括:

[0016] 所述信号光经过分光器分成两路,一路经法拉第反射镜FM反射回所述中心节点的所述环行器和任意光波形编辑器后进入超快符合模块;

[0017] 另一路经单光子探测模块SPD、时间-数字转换模块TDC进行时间标记,形成终端节点探测事件序列,所述单光子探测模块TDC的同步信号由终端时钟提供。

[0018] 优选地,所述在所述中心节点中,所述闲置光一部分用于产生一个中心节点探测事件序列,另一部分经过时延和色散控制后,进入所述中心节点的超快符合模块,包括:

[0019] 所述闲置光经过分光器分成两路,一路由单光子探测模块SPD接收,形成闲置光的一个探测事件序列,另一路任意光波形编辑器的时延和色散后进入超快符合模块。

[0020] 优选地,在所述超快符合模块中,所述信号光和所述闲置光和频,得到另一个中心节点探测事件序列,包括:

[0021] 任意光波形编辑器输出的所述信号光和所述闲置光进入和频模块SPF发生和频效应,获得和频信号;

[0022] 硅单光子探测模块SiSPD探测所述和频信号,并输出至中心节点的时间-数字转换模块TDC进行时间标记,获得中心节点探测事件序列,所述中心节点的时间-数字转换模块TDC的同步信号由中心时钟提供。

[0023] 优选地,所述基于所述终端节点探测事件序列和所述中心节点探测事件序列,进行钟差解算,获得钟差,包括:

[0024] 所述中心节点与终端节点的探测事件序列的关联函数为 $c(\tau) = F^{-1}[F^*[s] \cdot F[b]]$,通过快速傅里叶变换和其逆变换从探测事件序列中获得:其中,a、b分别代表中心节点、终端节点的探测事件序列; τ 为时间偏移量;

[0025] 通过时延控制搜索所述关联函数 $c(\tau)$ 中的最大值找到时间偏移;

[0026] 得到中心节点与终端节点的关联函数在 τ_1 处达极大值,中心节点处的和频信号在 τ_2 处达极大值,则钟差 δ 由 τ_1 和 τ_2 计算得来: $\delta = \tau_1 - \frac{1}{2}\tau_2$ 。

[0027] 优选地,所述基于所述钟差,调整对闲置光的时延和色散控制,实现所述闲置光与所述信号光经历相同的传播时间,从而实现多个终端节点的时间同步,包括:

[0028] 基于所述钟差,通过光学延迟线ODL消除钟差,通过色散补偿光纤DCF调整补偿光纤色散,实现中心节点与一个终端节点的时间同步;

[0029] 从当前节点的通信光路切换到要同步的终端节点的通信光路或者使用另一对频率纠缠光子,实现多个终端节点之间的量子时间同步。

[0030] 根据本发明的第二个方面,提供一种终端量子时间同步网络系统,包括中心节点

和多个终端节点；

[0031] 每个终端节点和所述中心节点通过单根光纤连接；

[0032] 或者，多个终端节点通过波分复用共用一条光纤链路与所述中心节点连接，并在终端节点前插入阵列波导光栅用于波长解复用，配合中心节点对任意光波形编辑器的波分复用与解复用。

[0033] 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任一项所述的终端量子时间同步网络方法，或，运行所述的终端量子时间同步网络系统。

[0034] 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任一项所述的终端量子时间同步网络方法，或，运行所述的终端量子时间同步网络系统。

[0035] 与现有技术相比，本发明实施例至少具有如下的一项有益效果：

[0036] 本发明实施例提供的终端量子时间同步网络方法及系统，使用集成微腔光频梳作为纠缠源，拥有丰富的频谱资源，为大规模的量子时间同步做好了量子纠缠资源方面的准备；

[0037] 本发明实施例提供的终端量子时间同步网络方法及系统，利用和频晶体符合探测技术，能大大提高探测带宽，实现比HOM干涉探测更高的时间分辨率，达到飞秒量级。同时，无相位匹配的和频晶体能够覆盖很宽的频谱区域，因此能够测量超短关联时间，进而提高时间同步的精度。

[0038] 本发明实施例提供的终端量子时间同步网络方法及系统，可以通过时分复用，减少每次需要从中心节点发送的纠缠光子对，来减少和频模块、单光子探测模块的数量需求，从而压缩中心节点的制造成本；

[0039] 本发明实施例提供的终端量子时间同步网络方法及系统，兼容波分复用，可以适应多种光纤固网的物理结构，大大增强量子时间同步方法的适应性和兼容性；

[0040] 本发明实施例提供的终端量子时间同步网络方法及系统，可以在中心节点通过对任意光波形编辑器的程序控制，实现重点节点的量子纠缠资源的倾斜分配；还可以经过简单的修改后，将终端节点更改为下一级中心节点，从而为网络级联模式提供了兼容性保证，有利于进一步扩展量子时间同步网络的规模。

附图说明

[0041] 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加明显：

[0042] 图1为本发明实施例中的终端量子时间同步网络方法流程示意图；

[0043] 图2为本发明具体实施例的终端量子时间同步网络方法流程示意图；

[0044] 图3为本发明具体实施例中的钟差解算原理示意图；

[0045] 图4为本发明另一具体实施例的终端量子时间同步网络方法流程示意图。

具体实施方式

[0046] 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。以下实施例中未详细说明的部分可以采用现有技术。

[0047] 参见图1,本发明提供一种终端量子时间同步网络方法,其具体过程如下:

[0048] S100,中心节点从集成微腔量子光频梳中取出多对纠缠光子,纠缠光子分开为信号光和闲置光两路,信号光输入至终端节点,闲置光输入至中心节点本身;

[0049] S200,在终端节点中,信号光一部分用于产生终端节点探测事件序列,并通过经典信道反馈至中心节点,另一部分被反射至所述中心节点的超快符合模块;

[0050] S300,在中心节点中,闲置光一部分用于一个产生中心节点探测事件序列,另一部分经过时延和色散控制后,进入中心节点的超快符合模块;

[0051] S400,在超快符合模块中,进入的信号光和闲置光和频,得到另一个中心节点探测事件序列;

[0052] S500,基于终端节点探测事件序列和S300和S400的所有中心节点探测事件序列,进行钟差解算,获得钟差;

[0053] S600,基于钟差,调整对闲置光的时延和色散控制,实现闲置光与信号光经历相同的传播时间,从而实现多个终端节点的时间同步。

[0054] 本发明可以实现多终端同时进行时间同步;本方法利用和频效应检测两地时钟差,在光域上进行,时间精度高,为飞秒量级;使用集成微腔光频梳作为纠缠源,可以同时提供大量的纠缠对,使得网络规模方便扩展、拓扑灵活。

[0055] 在本发明的一个优选实施例中,实施S100,具体过程如下:

[0056] S101,中心节点产生一个光频梳作为多纠缠源,具体为一个中心频率为 f_{s0} ,重复频率为 f_{sr} 的光频梳作为多纠缠源,根据中心频率对称梳齿为一对纠缠光子;

[0057] S102,S101的光频梳由任意光波形编辑器 W_0 将与 f_{s0} 对称的两侧梳齿分为信号光与闲置光两路;

[0058] S103,S102得到的信号光依次经过环行器与光纤链路传输至相应终端节点;

[0059] S104,S102得到的闲置光输入至中心节点本身,并且对其进行时延控制,随后进入超快符合模块。

[0060] 本实施例使用集成微腔光频梳作为纠缠源,拥有丰富的频谱资源,为大规模的量子时间同步做好了量子纠缠资源方面的准备。

[0061] 在本发明的一个优选实施例中,实施S200,具体过程如下,

[0062] S201,在终端节点中,信号光经过分光器分光输出;

[0063] S202,一部分经过法拉第反射镜FM反射;

[0064] S203,另一部分依序经过单光子探测模块SPD、时间-数字转换模块TDC进行时间标记形成终端节点探测序列,时间-数字转换模块TDC的同步信号由所述终端时钟提供;

[0065] S204,S202的反射信号再次经过光纤链路,而后在中心节点经由环行器和任意光波形编辑器,接入超快符合模块。

[0066] 本实施例中,终端节点探测序列是信号光去到终端节点之后留下的探测序列,在后续中心节点解算时使用,所以终端节点会通过传统信道跟中心节点通信将这个终端节点探测序列传给中心节点。

[0067] 在本发明的一个优选实施例中,实施S300,具体过程如下:

[0068] S301,中心节点处,纠缠光子的闲置光经过分光器输出,闲置光有概率被单光子探测模块SPD接收(在E处产生闲置光的一个探测事件序列),也有概率经过任意光波形编辑器的时延和色散后进入超快符合模块。

[0069] 在本发明的一个优选实施例中,实施S400,具体过程如下:

[0070] S401,经过任意光波形编辑器输出的信号光和闲置光(即经过了时延控制后的闲置光)两信号进入和频模块发生和频,获得和频信号;

[0071] S402,硅单光子探测模块SiSPD探测短波通滤波器SPF滤波后的和频信号;

[0072] S403,硅单光子探测模块SiSPD输出至中心节点的时间-数字转换模块TDC进行时间标记,中心节点的时间-数字转换模块TDC的同步信号由中心节点的中心时钟提供。

[0073] 本实施例利用和频晶体符合探测技术,能大大提高探测带宽,实现比HOM干涉探测更高的时间分辨率,达到飞秒量级。同时,无相位匹配的和频晶体能够覆盖很宽的频谱区域,因此能够测量超短关联时间,进而提高时间同步的精度。

[0074] 在本发明的一个优选实施例中,实施S500,具体过程如下:

[0075] S501,上述S203得到的终端节点探测序列经由经典信道与中心节点进行沟通;

[0076] S502,中心节点计算机计算得出中心节点与终端节点两地探测事件序列的符合计数;

[0077] S503,中心节点的计算机根据中心节点由和频效应得出的符合计数信号;

[0078] S504,动态调整任意光波形编辑器的时延和色散,以确保分离的信号光和闲置光在光纤中传输时经历相同的传播时间,由此实现钟差解算。

[0079] 进一步的,中心节点和终端节点两个节点的探测事件序列做互相关计算,通过改变时延,在相关最大时找到时间差1;同样的,找出和频信号最大时的时延2,则钟差由两者唯一确定;根据得到的钟差解算信号,控制ODL时延进行钟差消除、控制DCF调整补偿光纤色散,使光的色散展宽较小提高时间同步精度。

[0080] 即,钟差解算的具体过程为:

[0081] 中心节点与终端节点的探测事件序列的关联函数为 $c(\tau) = F^{-1}[F^*[a] \cdot F[b]]$,通过快速傅里叶变换和其逆变换从探测事件序列中获得:其中,a、b分别代表中心节点、终端节点的探测事件序列; τ 为时间偏移量。

[0082] 通过时延控制搜索所述关联函数 $c(\tau)$ 中的最大值找到时间偏移;

[0083] 得到中心节点与终端节点的关联函数在 τ_1 处达极大值,中心节点处的和频信号在 τ_2 处达极大值,则钟差 δ 由 τ_1 和 τ_2 计算得来: $\delta = \tau_1 - \frac{1}{2}\tau_2$ 。

[0084] 在本发明的一个优选实施例中,实施S600,具体包括如下步骤:

[0085] S601,基于S500计算得到的钟差,通过光学延迟线ODL消除钟差,通过色散补偿光纤DCF调整补偿光纤色散,实现中心节点与一个终端节点的时间同步;

[0086] S602,从当前节点的通信光路切换到要同步的终端节点的通信光路或者使用另一对频率纠缠光子,实现多个终端节点之间的量子时间同步。

[0087] 上述实施例的,中心节点的计算机根据和频信号结算的钟差动态调整使分离的信号光和闲置光在光纤中传输时经历相同的传播时间,实现钟差解算,实现多终端同时进行

时间同步。

[0088] 在本发明的其他优选实施例中,提供了对应的量子安全性监测方式,其内容是中心节点随机控制W1、W2是否将光路切换至CHSH不等式测试模块,以确保方法的安全性。如需进行终端节点之间的量子时间同步,则只需切换光路或者使用另一对频率纠缠光子,重新进行上方步骤,从而实现中心节点和终端节点的量子时间同步,于是可以最终完成一个中心节点和多个终端节点的量子时间同步并确保安全性。

[0089] 图2为本发明的具体实施例一示意图。如图2所示,该实施例为中心节点E与单个终端A同步的点到点量子时间同步方案。中心节点E与终端节点A之间通过光纤网络连接,并且可以通过经典信道沟通,E与A线性连接。

[0090] 中心节点包含集成微腔光频梳量子纠缠源、任意光波形编辑器(Waveshaper,W0和W1)、环行器、分光器、可调光延迟线(ODL)、色散补偿光纤(DCF)、和频模块、短波通滤波器(SPF)、硅单光子探测模块(Si SPD)、单光子探测模块(SPD)、时间-数字转换模块(TDC)、中心时钟、CHSH不等式测试模块和计算机;光纤网络为标准单模光纤通信链路;终端节点(A)包含分光器、法拉第反射镜(FM)、单光子探测模块(SPD)、TDC和终端时钟。

[0091] 本实施例提供的这种E到A点对点量子时间同步网络方法的具体实施如下:

[0092] S11,中心节点从集成微腔量子光频梳提取出一对纠缠光子(+1和-1),纠缠光子对由任意光波形编辑器W0分开至两路,分别输至两路。

[0093] S12,将得到的信号光依次经过环行器C1与光纤链路传输至A节点;传输的信号光在终端节点处被反射或者吸收,具体包括在某一终端节点处,将信号光输入一个10:90分光器,分光器90%输出端接法拉第反射镜FM反射信号光,10%输出端接单光子探测模块(SPD),单光子探测模块SPD输出信号由终端节点时间-数字转换模块TDC进行时间标记形成A处的探测序列,终端节点的时间-数字转换模块TDC的同步信号由节点的终端时钟提供;

[0094] S13,终端节点处被法拉第反射镜FM反射的信号光再次经过光纤链路,而后在中心节点经由环行器C1,接入任意光波形编辑器W1;

[0095] S14,对应的闲置光经过50:50分光器,分光器输出端一个接单光子探测模块SPD、一个接可调光延迟线ODL,使得闲置光有概率被单光子探测模块SPD接收(在E处产生闲置光的一个探测事件序列),也有概率进入可调光延迟线、到达任意光波形编辑器W1;

[0096] S15,终端节点A处反射回到中心节点的信号光信号由任意光波形编辑器W1输出,对应的闲置光若到达任意光波形编辑器W1,则W1输出信号,经光学延迟线ODL补充时延与色散补偿光纤DCF非定域地补偿光纤链路的色散后,两信号进入和频模块发生和频,硅单光子探测模块Si SPD探测短波通滤波器SPF滤波后的和频信号,并输出至中心节点的时间-数字转换模块TDC进行时间标记,获得中心节点的另一个事件序列;中心节点的时间-数字转换模块TDC的同步信号由中心节点的中心时钟提供。

[0097] 图3为本实施例的钟差解算原理示意图。和频效应的解算方法,主要是终端节点的信号光探测事件序列经由经典信道与中心节点进行沟通,中心节点可以计算得出中心节点与终端节点两地探测事件序列的符合计数。如图3所示,本实施例提供的钟差解算的具体原理方法如下:

[0098] 令中心节点E的时间为 t ,终端节点A的时间为 t_0 ,两地钟差为 δ 。令光子从E发送到A的时间为 Δt_{EA} ,光子从A发送到E的时间为 Δt_{AE} 。E和A两个节点的探测事件序列分别为 $a(t)$

$= \sum_i \delta(t-t_i)$, 和 $b(t) = \sum_j \delta(t-t_j)$, t_i, t_j 表示每个光子的探测脉冲的时间。这两个序列的关联函数为 $c(\tau) = \int a(t)b(t+\tau)dt$ 。 $c(\tau)$ 在 $\tau = \Delta t$ 处有一个峰值, 这是由于在两边独立的背景噪声基线之上有关的光探测事件。因此, 通过时延控制搜索 $c(\tau)$ 中的最大值就可以简单地找到时间偏移 Δt 。长度为 N 的离散数组 $c(\tau)$ 可以通过快速傅里叶变换和它们的逆变换从探测事件序列中有效地获得: $c(\tau) = F^{-1}[F^*[a] \cdot F[b]]$ 。 E 和 A 两个节点的关联函数在 $\tau_{EA} = \Delta t_{EA} + \delta$ 处达极大值, E 处的和频信号 $R(\tau)$ 在 $\tau_{EE} = \Delta t_{EA} + \Delta t_{AE}$ 处达极大值。假设 $\Delta t_{EA} = \Delta t_{AE}$, 则钟差可以由 τ_{EA} 和 τ_{EE} 计算得来: $\delta = \tau_{EA} - \frac{1}{2}\tau_{EE}$ 。

[0099] 得到中心节点 E 和终端节点 A 两地的钟差后, 中心节点 E 的计算机根据钟差, 动态调整任意光波形编辑器 $W1$ 的时延和色散, 以确保分离的信号光和闲置光在光纤中传输时经历相同的传播时间。

[0100] 本发明实施例的具体实施包含点对点量子安全性监测, 主要是中心节点 E 随机控制 $W1$ 是否将光路切换至 CHSH 不等式测试模块, 以确保方案的安全性。

[0101] 此处, CHSH 不等式描述光子的纠缠性质, 具体是当光子的物理量满足 CHSH 不等式, 则没有发生纠缠, 反之满足纠缠。因此, 光路不切换, 则仍然按照一般时间同步步骤进行; 光路切换时, 光子对进入 CHSH 不等式测试模块测试安全性。

[0102] 图4为本发明的具体实施例二示意图。如图4所示, 该方法包括中心节点 E 、四个终端节点 A, B, C, D 以及光纤网络、经典信道。光纤网络将各个节点通过多种方式连接至主节点, 形成星状结构; 经典信道将各个节点连接, 节点之间可以相互通信。其中, 终端节点 A 和 B 与中心节点 E 之间分别用一条光纤链路连接, 终端节点 C 和 D 通过波分复用共用一条光纤链路与中心节点 E 连接。

[0103] 中心节点包含集成微腔光频梳量子纠缠源、任意光波形编辑器 (Waveshaper, $W0$ 和 $W1$)、环行器、分光器、可调光延迟线 (ODL)、色散补偿光纤 (DCF)、和频模块、短波通滤波器 (SPF)、硅单光子探测模块 (Si SPD)、单光子探测模块 (SPD)、时间-数字转换模块 (TDC)、中心时钟、CHSH 不等式测试模块和计算机; 光纤网络为标准单模光纤通信链路; 终端节点 (A) 包含分光器、法拉第反射镜 (FM)、单光子探测模块 (SPD)、TDC 和终端时钟。

[0104] 本实施例提供的这种多终端量子时间同步网络方法的具体实施如图4所示, 包括如下步骤:

[0105] S21, 中心节点利用集成微腔量子光频梳产生一个光频梳作为多纠缠源, 具体为一个中心频率为 f_{s0} , 重复频率为 f_{sr} 的光频梳作为多纠缠源, 根据中心频率对称梳齿为一对纠缠光子; 光频梳由任意光波形编辑器 $W0$ 将与 f_{s0} 对称的两侧梳齿分为信号光与闲置光两路;

[0106] S22, 将得到的信号光依次经过环行器 $C1$ 与光纤链路传输至相应节点, 即利用任意光波形编辑器 $W0$, 将第 n 对梳齿中的信号光传至第 n 个节点; 对于 A, B 节点, 传输的信号光在终端节点处被反射或者吸收, 具体包括在某一终端节点处, 将信号光输入一个 10:90 分光器, 分光器 90% 输出端接法拉第反射镜 FM 反射信号光, 10% 输出端接单光子探测模块, 单光子探测模块 SPD 输出信号由终端节点 TDC 进行时间标记形成探测序列, 终端节点的 TDC 的同步信号由节点的终端时钟提供; 终端节点处被法拉第反射镜 FM 反射的信号光再次经过光纤链路, 而后在中心节点经由环行器 $C1$, 接入任意光波形编辑器 $W2$; 对于 C, D 节点, 需要在终端

节点前面插入一个阵列波导光栅用于波长解复用,配合中心节点E处对任意光波形编辑器的W0和W2的波分复用与解复用,方案即可正常工作;

[0107] S23,节点对应的闲置光经过50:50分光器,分光器输出端一个接单光子探测模块、一个接ODL,使得闲置光有概率被单光子探测模块SPD接收(在E处产生闲置光的一个探测事件序列),也有概率进入可调光延迟线ODL、到达任意光波形编辑器W1;

[0108] S24,终端节点处反射回到中心节点的信号光信号由任意光波形编辑器W2输出,对应的闲置光若到达任意光波形编辑器W1,则W1输出信号,经光学延迟线ODL补充时延与色散补偿光纤DCF非定域地补偿光纤链路的色散后,两信号进入和频模块发生和频,硅单光子探测模块探测短波通滤波器SPF滤波后的和频信号,并输出至中心节点的TDC进行时间标记,中心节点的TDC的同步信号由中心节点的中心时钟提供;

[0109] 使用具体实施例一所述的钟差解算方法,中心节点E的计算机根据得到的钟差解算信号,控制ODL时延进行钟差消除、控制DCF非定域色散补偿提高时间同步精度。

[0110] 对于四个节点同时的时间同步或者任意某几个节点的时间同步,中心节点E与终端节点A进行时间同步之后,也与终端节点B进行时间同步,从而可以实现终端节点A和B之间的双向量子时间同步,进而可以实现所有节点的量子同步过程。

[0111] 本发明的具体实施包含量子安全性监测,主要是中心节点E随机控制W1与W2是否将光路切换至CHSH不等式测试模块,以确保方案的安全性。

[0112] 在本实施例中,通过时分复用,减少每次需要从中心节点发送的纠缠光子对,来减少和频模块、单光子探测模块的数量需求,从而压缩中心节点的制造成本;兼容波分复用,可以适应多种光纤固网的物理结构,大大增强量子时间同步方法的适应性和兼容性;由于量子光频梳可以产生多对纠缠光子对,也可以在中心节点通过对任意光波形编辑器的程序控制,实现重点节点的量子纠缠资源的倾斜分配;还可以经过简单的修改后,将终端节点更改为下一级中心节点,为网络级联模式提供了兼容性保证,有利于进一步扩展量子时间同步网络的规模。

[0113] 基于相同的发明构思,在本发明的其他实施例中,提供一种多终端量子时间同步网络系统,包括中心节点和多个终端节点;通过单根光纤连接每个终端节点和中心节点;或者,多个终端节点通过波分复用共用一条光纤链路与所述中心节点连接,并在终端节点前插入阵列波导光栅用于波长解复用,配合中心节点对任意光波形编辑器的波分复用与解复用。中心节点和多个终端节点之间实现上述多终端量子时间同步网络方法。

[0114] 本实施例中系统的中心节点和多个终端节点具体技术特征与上述实施例中多终端量子时间同步网络方法对应,在此不再赘述。

[0115] 基于相同的发明构思,在本发明的其他实施例中,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任一项实施例中的多终端量子时间同步网络方法,或,运行上述的多终端量子时间同步网络系统。

[0116] 可选地,存储器,用于存储程序;存储器,可以包括易失性存储器(英文:volatile memory),例如随机存取存储器(英文:random-access memory,缩写:RAM),如静态随机存取存储器(英文:static random-access memory,缩写:SRAM),双倍数据率同步动态随机存取存储器(英文:Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory,缩写:

DDR SDRAM)等;存储器也可以包括非易失性存储器(英文:non-volatile memory),例如快闪存储器(英文:flash memory)。存储器用于存储计算机程序(如实现上述方法的应用程序、功能模块等)、计算机指令等,上述的计算机程序、计算机指令等可以分区存储在一个或多个存储器中。并且上述的计算机程序、计算机指令、数据等可以被处理器调用。

[0117] 上述的计算机程序、计算机指令等可以分区存储在一个或多个存储器中。并且上述的计算机程序、计算机指令、数据等可以被处理器调用。

[0118] 处理器,用于执行存储器存储的计算机程序,以实现上述实施例涉及的方法中的各个步骤。具体可以参见前面方法实施例中的相关描述。

[0119] 处理器和存储器可以是独立结构,也可以是集成在一起的集成结构。当处理器和存储器是独立结构时,存储器、处理器可以通过总线耦合连接。

[0120] 基于相同的发明构思,在本发明的其他实施例中,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,运行上述的系统。

[0121] 其中,计算机可读介质包括计算机存储介质和通信介质,其中通信介质包括便于从一个地方向另一个地方传送计算机程序的任何介质。存储介质可以是通用或专用计算机能够存取的任何可用介质。一种示例性的存储介质耦合至处理器,从而使处理器能够从该存储介质读取信息,且可向该存储介质写入信息。当然,存储介质也可以是处理器的组成部分。处理器和存储介质可以位于ASIC中。另外,该ASIC可以位于用户设备中。当然,处理器和存储介质也可以作为分立组件存在于通信设备中。

[0122] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0123] 本申请是参照根据本申请的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0124] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0125] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0126] 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。

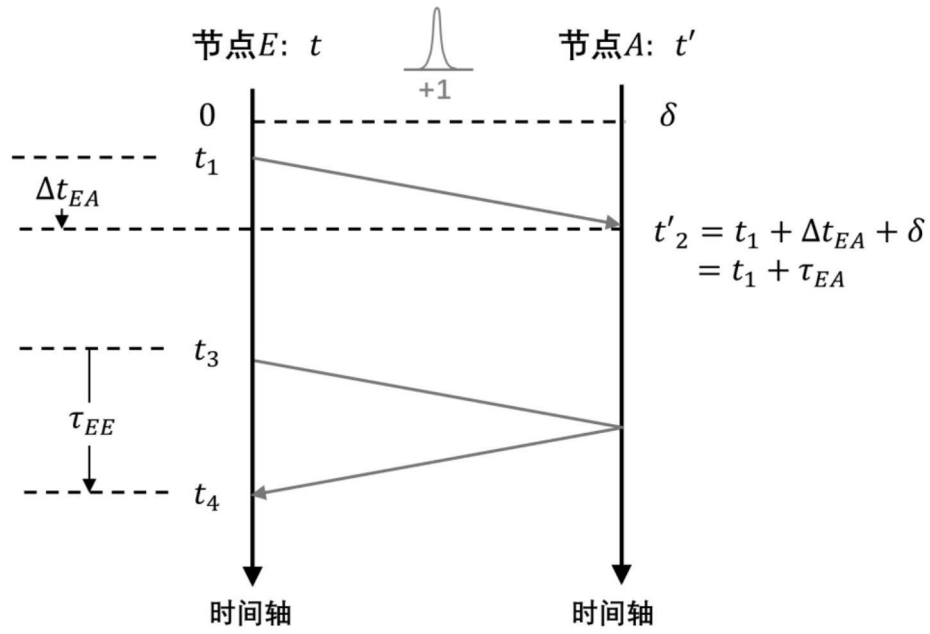


图3

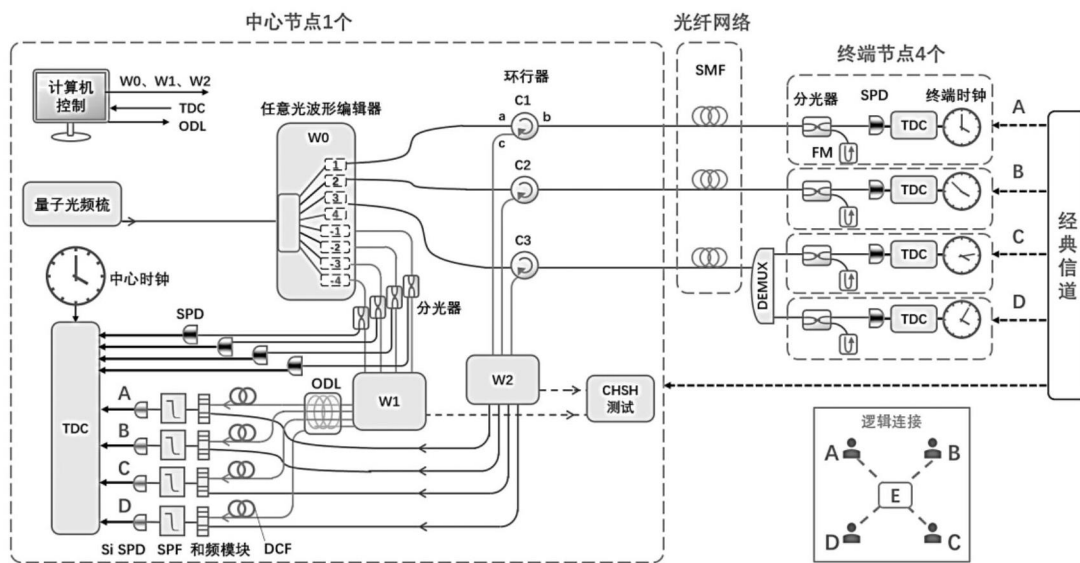


图4