

文章编号 1004-924X(2013)06-1628-07

100 km 量子纠缠分发实验捕获跟踪技术

亓 波^{1,2,3*}, 陈洪斌^{1,2}, 任 戈^{1,2}, 黄永梅^{1,2}, 丁 科^{1,2}, 马佳光^{1,2}

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院 光束控制重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:介绍了 100 km 量子纠缠分发实验中的捕获跟踪瞄准(ATP)技术。以 Alice 接收端的 700 mm 望远镜为例分析了 ATP 系统的技术指标、光路布局和高带宽跟踪精度的实现方法。为了抑制近地面水平大气湍流引起的量子信息传输光束和信标光束的到达角起伏,在经典复合轴跟踪模式的基础上,设计了具有粗跟踪、精跟踪和超精跟踪功能的双重复合轴跟踪系统和双快速控制反射镜融合的跟踪算法,用高帧频 CMOS 探测器和压电快速控制反射镜构建了超精跟踪回路。采用这些方法有效解决了跟踪动态范围和跟踪精度之间的矛盾,更好地发挥了高帧频探测器的性能,提高了抑制带宽和跟踪精度。将该双重复合轴跟踪系统成功应用于 100 km 量子纠缠分发实验,结果显示捕获跟踪系统的跟踪精度为 $4 \mu\text{rad}$,抑制带宽达到了 70 Hz。

关 键 词:量子通信;量子纠缠分发;捕获跟踪瞄准

中图分类号: TN929.1; O431.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1628

ATP technology for 100-kilometer quantum entanglement distribution experiment

QI Bo^{1,2,3*}, CHEN Hong-bin^{1,2}, REN Ge^{1,2}, HUANG Yong-mei^{1,2}, DING Ke^{1,2}, MA Jia-guang^{1,2}

(1. *Institute of Optics And Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. Beam Control Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

** Corresponding author, E-mail: qibo@ioe.ac.cn*

Abstract: Acquiring, tracking and pointing(ATP) technique in a 100 km quantum entanglement distribution experiment was introduced in detail. By taking a 700 mm telescope at Alice receiving terminal as an example, the technological specification, light path layout, and tracking accuracy of the ATP system were analyzed. In order to reduce the angle-of-arrival fluctuations of quantum information transmission beams and beacon beams caused by air turbulence, a cascade acquisition and tracking system with coarse tracking, fine tracking and a ultra-fine loop was designed and a dual fast-steering mirror tracking algorithm was proposed. On the basis of a higher frame frequency CMOS detector and a piezoelectric fast-steering mirror, the ultra-fine tracking circuit was developed. Experiments show that these methods solve the contradiction between tracking dynamic range and tracking accuracy, promote the performance of the detector and improve band width and tracking accuracy.

收稿日期:2013-01-10;修订日期:2013-02-25.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(No. YYYJ-0815)

cy. The system was used in a ground 100 km quantum entanglement distribution experiment and the results indicate that the tracking error of the system is $4 \mu\text{rad}$ for a 70 Hz bandwidth.

Key words: quantum communication; quantum entanglement distribution; acquiring, tracking and pointing

1 引言

量子通信是量子信息领域最接近实用化的方向,自由空间量子通信则可借助空间平台建立高稳定低损耗信道,实现超远距离量子通信实验,通过空间平台中转将有可能实现覆盖全球的量子通信网络^[1]。

在任意距离间传输未知量子态是实现远距离量子通信和分布式量子网络必不可少的环节,它可以通过远距离量子态隐形传输和纠缠分发来实现^[2-3]。构建量子通信系统依赖于高性能的捕获跟踪瞄准(ATP)系统。ATP系统的任务是实现对卫星通信终端发射的信标光进行捕获和高精度跟踪,完成星上量子信号光的高效率、高保偏度的接收,构建高稳定、低损耗的量子信道。量子通信激光源发射的是单光子量子信号,为了避免过大的几何衰减降低接收效率,通信光束的发散角必须很窄,通常在几十微弧度量级。另外星地量子通信光路经过大气层,大气湍流会引起量子信息传输光束和信标光束的方向漂移,造成链路起伏。这就要求 ATP 系统有很高的跟踪精度和系统带宽,也决定了 ATP 系统的设计和实现是量子通信系统中的一项非常关键且难度很大的技术。

为了对将来的空间量子通信系统研制打下坚实的技术基础,从 2010 年开始,中科院联合研究团队在青海湖建立了实验基地,开展验证星地量子通信可行性的 100 km 实验研究,从多个方面进行攻关,旨在突破基于卫星平台自由空间量子通信的关键技术瓶颈。本文详细介绍了 100 km 纠缠分发实验中的 ATP 技术,以 Alice 接收端的 700 mm 望远镜为例分析了 ATP 系统技术指标、系统光路布局和高精度、高带宽跟踪精度的实现方法,最后给出了青海湖纠缠分发实验的 ATP 跟踪实验结果。

2 100 km 量子纠缠分发实验介绍

100 km 量子纠缠分发实验系统主要由三大

模块构成: Alice 接收端, Bob 接收端和 Charlie 发射端,其详细布局如图 1 所示^[4]。Alice 端望远镜口径为 700 mm,接收来自 Charlie 端的纠缠光子,传输距离 51.2 km。Bob 端望远镜口径为 400 mm,接收来自 Charlie 端的纠缠光子,传输距离为 52.2 km。Charlie 端产生纠缠光子对后往 Alice 和 Bob 端分发。Alice 和 Bob 端相距 101.8 km, Alice 和 Bob 望远镜分别跟踪 Charlie 发射的信标光(532 nm, 200 mW, 1.5 mrad), Charlie 端望远镜分别跟踪接收端发射的信标光(671 nm, 2 W, 200 μrad)。另外接收端还需要接收发射端发射的同步光(1 064 nm, 50 mW, 200 μrad)信号,达到时间同步的目的,为科学数据的分析处理提供高精度的时间基准。在双方完成信标光跟踪的基础上,发射量子纠缠光,当 Alice 和 Bob 接收到光子后,开展量子纠缠分发实验。

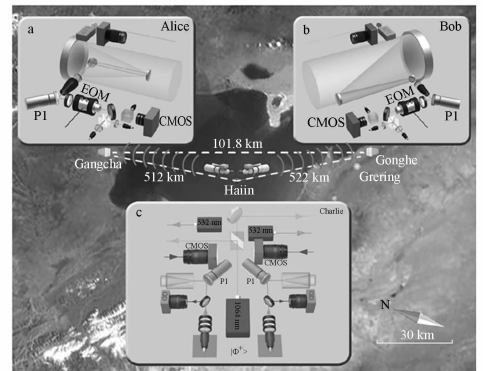


图 1 量子纠缠分发实验布局图

Fig. 1 Diagram of quantum entanglement distribution experiment

3 双重复合轴捕获跟踪系统架构

如图 1 所示,为了保证量子信道的稳定性,接收端和发射端均采用具有跟踪功能的望远镜,实现高动态范围和高精度跟踪。跟踪望远镜采用粗、精复合轴 ATP 结构,即在大惯量、低谐振频率的主机架(主轴)上加一惯量小、刚度高的快速跟踪反射镜(子轴),以保证系统的快速性能和跟踪精度。为了减少自由空间损耗角度出发,量子

光的发散角通常较少,100 km 纠缠分发实验中量子光的发散角为 $20 \mu\text{rad}$,根据文献[5]的计算,要开展高可靠性的通信实验,发散角和跟踪误差一般有 5 倍的关系,因此要求系统的跟踪精度要优于 $4 \mu\text{rad}$ 。另外纠缠分发实验传输经过近地面大气层,大气湍流引起量子信息传输光束和信标光束的方向漂移,造成到达角起伏。到达角起伏可以用下式估算^[5]:

$$\sigma_{\beta}^2 = 0.17 \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{\gamma_0}\right)^{\frac{5}{3}}, \quad (1)$$

其中: D 表示望远镜口径, λ 表示望远镜工作波长, γ_0 表示大气相干长度。下面以 Alice 端 700 mm 望远镜为例,具体分析 ATP 系统的技术指标:532 nm 信标光波长,大气相干长度 10 cm,大气导致的抖动(RMS)接近 $2 \mu\text{rad}$ 。在弱湍流情况下,频谱集中在 50 Hz 以下;在强湍流情况下,最高频谱超过 200 Hz^[6-7]。因此要达到高的跟踪精度,必须抑制大气湍流引起的起伏效应。上述公式还只是激光斜程大气传输的近似公式,对于近地面湍流要远强于这个估算数据,考虑到青海湖高海拔地区,大气宁静度相对较好,因此设计系统的闭环带宽至少也要达到 50 Hz 以上。

基于上述的技术指标分析,设计了量子纠缠分发实验的 ATP 系统光路,具体如图 2 所示。采用 700 mm 反射式望远镜,主次镜构成 5 倍缩束系统,671 nm 信标光旁轴发射,粗跟踪探测系统也采用旁轴平行安装。精/超精探测系统和 Alice 量子接收模块采用共孔径接收探测。532 nm 信标光和量子光在到达精探测系统前就通过分光镜 BS_1 隔离分光,可以最大限度提高量子光接收效率,并减轻了镀膜量子保偏的难度。压电快速控制反射镜 FSM_2 的偏转角度很小,通常在 mrad 量级,因此为了保证快速控制反射镜的偏转角度与视场匹配,在系统中增加一套大偏转角度的快速控制反射镜 FSM_1 ,采用音圈电机驱动,其偏转角度大于 4 mrad,带宽低于 FSM_2 的带宽,这样整个 ATP 系统就成为具有粗跟踪、精跟踪和超精跟踪功能的双重复合轴跟踪系统,可以解决跟踪动态范围和跟踪精度之间的矛盾。

信标光和量子光经过 PM 和 SM 传输后出光口径变为 120 mm,经过第三镜 M_1 反射后到达 FSM_1 ,经过 BE 二级缩束后到达 FSM_2 ,此时光束直径为 24 mm,和 FSM_2 反射镜直径匹配。量子

光到达 BS_1 后反射进入 Alice 量子接收模块,信标光到达 BS_1 后透射传输进入精/超精探测系统,精探测和超精探测系统通过单波段分光镜分光,一路经成像透镜 IL_1 后到达精跟踪探测器 TS_1 ,一路经成像透镜 IL_2 后到达精跟踪探测器 TS_2 。

按照经典的复合轴跟踪系统光路设计,应该在 FSM_1 和 FSM_2 之间放置一块分光镜(图中虚线),在分光镜后放置 TS_1 系统,这样就可以保证超精跟踪校正的是精跟踪的闭环残差。之所以没有如此布局是考虑到量子通信 ATP 光路的量子传输效率和膜系偏振保真度,将 TS_1 和 TS_2 放置于量子分光镜 BS_1 之后,这样系统就省去一块分光镜,降低了整个光路偏振保真的难度。

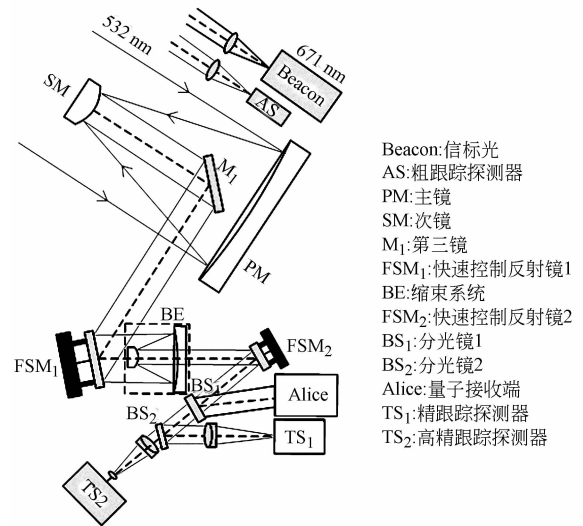


图 2 量子通信 ATP 系统光路

Fig. 2 Optical layout of quantum ATP system

为了保证高的跟踪精度和闭环抑制带宽,望远镜采用复合轴 ATP 架构^[8-11]。量子通信 ATP 设计方法又不同于其它 ATP 系统,其等同于存在有源跟踪信标的 ATP 系统。这样就可以在满足探测能力的前提下,尽量提高跟踪探测器的带宽,以抑制大气湍流带来的光束抖动。ATP 系统的粗跟踪探测选用大视场光学系统,这样可以迅速捕获目标,其口径 200 mm,焦距 1 200 mm,瞬时视场 $8 \mu\text{rad}$ 。为了保证粗、精跟踪过程的平稳过渡,并考虑目标丢失后系统的迅速再捕获问题,精跟踪的探测视场不能太小,选用 CCD 传感器作为精跟踪探测器,其帧频 400 Hz,像元尺寸 $14.8 \mu\text{m}$,设计精探测系统的焦距 4.3 m,可以保证瞬

时视场小于 $4 \mu\text{rad}$, 全视场也达到 0.8 mrad 的中等视场。采用压电快速控制反射镜作为子轴的执行器件, 系统闭环抑制带宽可以做到 15 Hz 左右, 还不能满足系统闭环带宽要求。因此增加一级超精跟踪模式, 进一步利用超精探测器提高采样频率, 进而提高闭环带宽。超精跟踪探测器选用 CMOS 传感器, 在 128×128 分辨率情况下, 帧频可以达到 $2\,000 \text{ Hz}$ 。若超精跟踪探测器的像元尺寸为 $14 \mu\text{m}$, 此时进一步将系统焦距加大到 7 m , 这样探测器瞬时视场为 $2 \mu\text{rad}$ 左右, 为达到 $4 \mu\text{rad}$ 的最终跟踪精度提供了更可靠的保证。用压电快速控制反射镜作为闭环执行器件, 系统闭环抑制带宽可以做到 45 Hz 左右, 对中强湍流也具有一定的抑制能力。

4 双重复合轴控制技术

量子通信 ATP 光路为了保证量子传输效率和膜系偏振保真度, 将 BS_1 前置于 TS_1 和 TS_2 之前, 这就导致快速控制反射镜在光路中串联布局, 这种结构采用任何一个探测器进行闭环控制都会相互影响。因此控制过程中需要考虑解耦, 保证 ATP 系统达到高的跟踪控制精度。

依据系统需求, 设计了整个 ATP 系统的跟踪控制流程: 首先系统引导信标光进入粗探测视场 (AS), 机架采用粗探测器闭环, 进而信标光进入精探测视场 (TS_1), 这时精探测器脱靶量控制 FSM_1 进行闭环, 系统形成第一级双检测型复合轴控制结构。信标光进入超精探测器视场 (TS_2)

后, 将利用超精探测器输出的脱靶量控制 FSM_2 进行闭环, 同时 FSM_1 不再采用精探测器脱靶量进行闭环, 而是改用解耦后的 FSM_2 位置信息和超精探测器的脱靶量信息进行闭环控制, 形成第二级单检测型复合轴控制结构。

图 3 为系统最终形成的双复合轴控制结构的

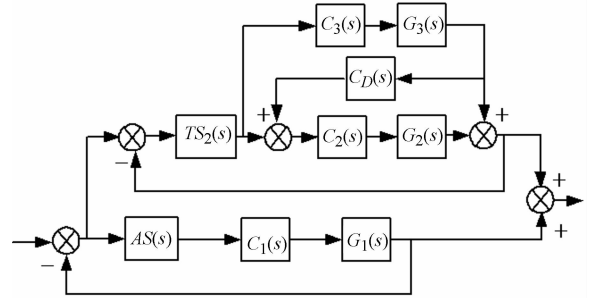


图 3 双复合轴控制结构原理图

Fig. 3 Diagram of dual axis control system

原理图, 其中 $C_1(s)$ 、 $G_1(s)$ 为主轴的控制器和对象传递函数, $C_2(s)$ 、 $G_2(s)$ 为粗子轴的控制器和对象的传递函数, $C_3(s)$ 、 $G_3(s)$ 为精子轴的控制器和对象的传递函数, $AS(s)$ 和 $TS_2(s)$ 分别为粗探测器和超精探测器, $C_D(s)$ 为 FSM_1 位置信号的解耦控制器。第一级复合轴是由粗、超精两极探测器形成的双检测型复合轴, 第二级是由超精、探测器 FSM_1 和 FSM_2 形成的单检测型复合轴。

令:

$$\begin{aligned} W_1(s) &= C_1(s)G_1(s), W_2(s) = C_2(s)G_2(s), \\ W_3(s) &= C_3(s)G_3(s), \end{aligned} \tag{2}$$

推导得出该双复合轴控制器的闭环传递函数为:

$$W_b(s) = \frac{AS(s)W_1(s) + [TS_2(s)W_2(s) + TS_2(s)W_3(s) + TS_2(s)C_D(s)W_2(s)W_3(s)] [1 + AS(s)W_1(s)]}{[1 + AS(s)W_1(s)] \{ [1 + TS_2(s)W_2(s)] [1 + TS_2(s)W_3(s)] + TS_2(s)W_2(s)W_3(s) [C_D(s) - TS_2(s)] \}}, \tag{3}$$

当 $C_D(s) = TS_2(s)$ 时, 第二级单检测型复合轴形成静态自主, 由于第一级复合轴为双检测型,

它已为非条件静态自主。在此条件下, 上述闭环传递函数可写为:

$$W_b(s) = \frac{[1 + AS(s)W_1(s)] [1 + TS_2(s)W_2(s)] [1 + TS_2(s)W_3(s)] - 1}{[1 + AS(s)W_1(s)] [1 + TS_2(s)W_2(s)] [1 + TS_2(s)W_3(s)]}, \tag{4}$$

其系统的特征方程为

$$\begin{aligned} [1 + AS(s)W_1(s)] [1 + TS_2(s)W_2(s)] \\ [1 + TS_2(s)W_3(s)] = 0, \end{aligned} \tag{5}$$

而主轴、粗子轴、精子轴的闭环传递函数分别为

$$W_{b1}(s) = \frac{TS_2(s)W_1(s)}{1 + TS_2(s)W_1(s)}, W_{b2}(s) =$$

$$\frac{TS_2(s)W_2(s)}{1+TS_2(s)W_2(s)}, W_{b3}(s) = \frac{AS_2(s)W_3(s)}{1+AS_2(s)W_3(s)}.$$

因此,双复合轴控制系统的特征方程为主轴、粗子

$$W_e(s) = 1 - W_b(s) = \frac{1}{[1+AS(s)W_1(s)][1+TS_2(s)W_2(s)][1+TS_2(s)W_3(s)]}, \quad (6)$$

而主轴、粗子轴、精子轴的误差传递函数分别为

$$W_{e1}(s) = \frac{1}{1+AS(s)W_1(s)}, W_{e2}(s) = \frac{1}{1+TS_2(s)W_2(s)}, W_{e3}(s) = \frac{1}{1+TS_2(s)W_3(s)},$$

由上式可知,双复合轴系统的误差传递函数是主轴、粗子轴、精子轴误差传递函数之积,这说明双复合轴系统的无差度阶数为主轴、粗子轴、精子轴子系统无差度阶数之和,因此双复合轴系统具有很高的控制精度。

5 100 km 量子纠缠分发实验与结果分析

在青海湖地区开展了 100 km 量子纠缠分发实验,实验中利用 Alice 端的超精跟踪探测器记录光斑质心的变化,以此来评价 ATP 系统的跟踪精度。系统闭环前的开环误差曲线和光斑质心分布图如图 4 所示(彩图见期刊电子版),光斑抖动(RMS_x, RMS_y)分别为 15.7 μrad 和 14.1 μrad。

系统转入精探测器闭环模式后误差曲线和光斑质心分布图如图 5 所示,光斑抖动(RMS_x, RMS_y)分别为 4.4 μrad 和 6.2 μrad。

系统转入精、超精跟踪融合的双重复合轴闭环模式后误差曲线和光斑质心分布图如图 6 所示,光斑抖动(RMS_x, RMS_y)分别为 3.2 μrad 和

轴、精子轴特征方程的乘积,只要 3 个轴的控制系统稳定,该双复合轴控制系统就能稳定。

双复合轴控制器的误差传递函数为:

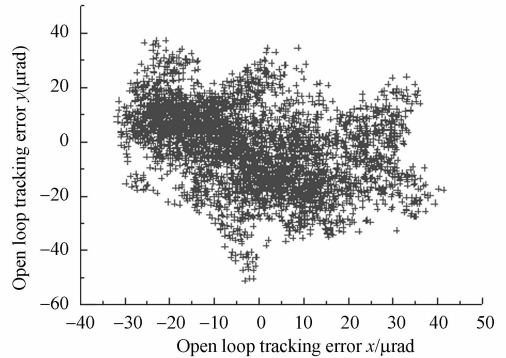


图 4 系统开环误差曲线和光斑分布图

Fig. 4 Open-loop tracking error of ATP system

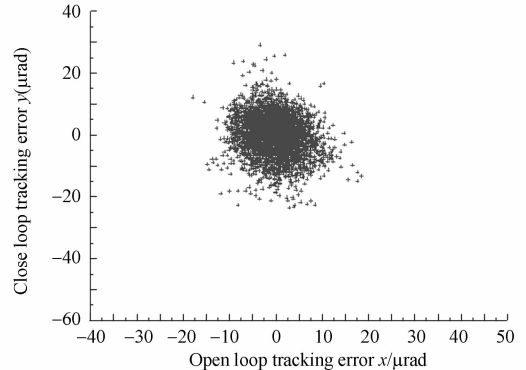
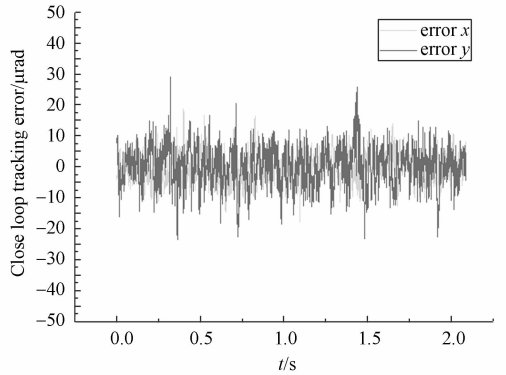
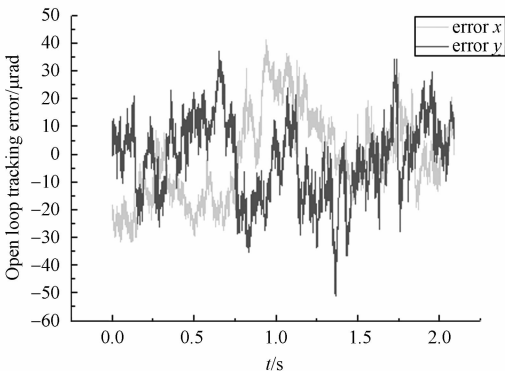


图 5 精跟踪闭环误差曲线和光斑分布图

Fig. 5 Fine tracking error of ATP system

4.0 μrad。各跟踪模式跟踪误差对应的功率谱密度曲线见图 7(彩图见期刊电子版)。

从开环实验数据看,光斑质心抖动 RMS 值



近 $16 \mu\text{rad}$, PV 值接近 $90 \mu\text{rad}$, 水平近地面传输的大气湍流要严重得多。因此在进行 ATP 系统设计的时候,要适当增大精跟踪的视场,以实现各跟踪模式的平稳切换。利用 ATP 系统的跟踪误差数据经过功率谱密度分析,精跟踪模式的误差抑制能力大约在 15 Hz 左右,双重复合轴跟踪控制模式误差抑制能力大约在 70 Hz 左右,影响抑制带宽的主要原因是探测器处理系统带来的系统延迟,通过提高探测器的处理频率可以有效提高系统的带宽,在下一步的工作中将采用新的图像处理算法,缩短处理时间,进一步提高系统带宽。 100 km 量子纠缠分发实验验证了强湍流条件下的高精度稳定跟踪技术,虽然实验是基于准定点的捕获跟踪模式,和未来星地通信的工作模式还有些不同,但双探测器的 ATP 控制技术仍然可以值得借鉴,这种配置可以有效降低粗跟踪精度要求,缩短捕获时间。另外采用双快速控制反射镜可以解决快速反射镜的设计矛盾,如果要制作

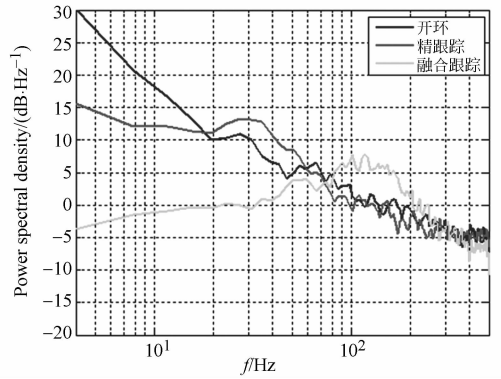


图7 跟踪误差的功率谱密度曲线

Fig. 7 Curves of power spectral density (PSD) of tracking error

大偏转范围而且具有高谐振频率、高线性度的快速反射镜,则费用会大幅上升。采用两个快速控制反射镜,一个大范围低谐振提供大范围偏转,一个小范围高谐振提供高精度跟踪,从而降低系统成本,提高整个系统的抑制带宽。

6 结论

为抑制水平大气远距离传输引起的光束抖动,在经典复合轴跟踪模式的基础上,用高帧频 CMOS 探测器和压电快速控制反射镜构建超精跟踪回路,研究了其融合控制方法。实验结果表明,利用双快速控制反射镜(FSM)融合的双重复合轴跟踪算法,可以有效发挥高帧频探测器的性能,提高抑制带宽和跟踪精度。在 100 km 纠缠分发实验中,跟踪精度达到 $4 \mu\text{rad}$,为圆满完成纠缠分发实验提供了保障。 100 km 水平传输引起的信道衰减远远大于星地通信时的斜程大气传输大气衰减,无论是从高损耗的地面指向卫星的上行链路,或是从卫星指向两个地面站的双通道下行链路,实现量子纠缠分发是可行的。

7 致谢

感谢与刘顺发和王继红研究员多次有益的讨论,才使本文得以发表。另外感谢中国科技大学的任继刚和印娟老师为本文提供了部分原始数据。

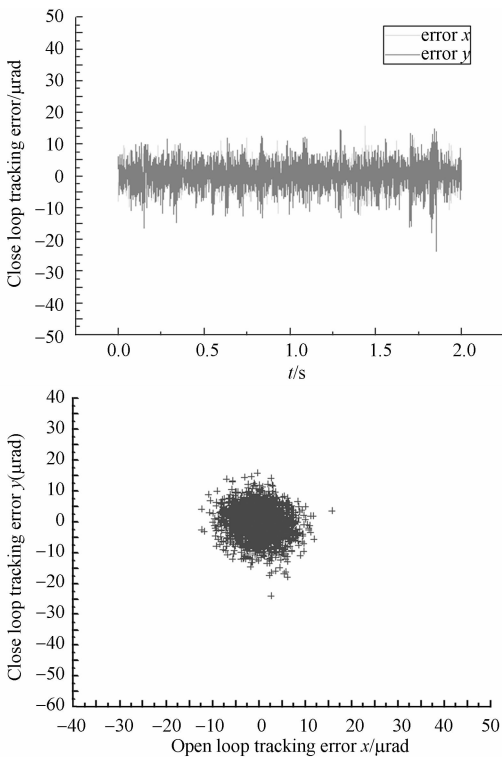


图6 融合跟踪闭环误差曲线和光斑分布图

Fig. 6 Dual compound axis close-loop tracking error of ATP system

参考文献:

- [1] 任继刚. 基于空间平台远程量子通信实验的研究 [D]. 北京:清华大学, 2007.
REN J G. *Study on the quantum communication experiment based on space bench* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [2] BENNETT C H. Teleporting an unknown quantum state via dual classic and Einstein-Podolsky-Rosen channels [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70: 1895-1899.
- [3] BOUWMEESTER D. Experimental quantum teleportation [J]. *Nature*, 390: 575-579.
- [4] YIN J. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. *Nature*, 2012, 488: 135-138.
- [5] 王平. 深空光通信 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
WANG P. *Deep Space Optical Communications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [6] 姜会林. 空间激光通信技术与系统 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
JIANG H L. *The Technologies and Systems of*

- Space Laser Communication* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [7] MORIYA N, MAKOTO A. Experimental evaluation of spot dancing of laser beam in atmospheric propagation using high-speed camera [J]. *SPIE*, 2003, 4976: 149-158.
- [8] GREENWOOD D P. Bandwidth specification for adaptive optics systems [J]. *Opt soc Am. (A)*, 1977, 67(3): 390-393.
- [9] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题 [J]. *光学工程*, 1989, 3(1): 1-42.
MA J G. The basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems [J]. *Optical Engineering*, 1989, 3(1): 1-42. (in Chinese)
- [10] 王毅, 高志伟, 王贵文, 等. 光电精密跟踪的双重复合轴伺服系统 [J]. *光学精密工程*, 1996, 4(4): 58-61.
WANG Y, GAO ZH W, WANG G W. Dual compound axis servo system of opto-electronic precision tracking [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4): 58-61. (in Chinese)
- [11] COSSON F, DOUBRERE P, PEREZ E. Simulation model and on-ground performances validation of the PAT system for SILEX program [J]. *SPIE*, 1991, 1417: 262-276.

作者简介:



亓波(1978—),男,山东莱芜人,副研究员,博士研究生,1999年于长春光学精密机械学院获得学士学位,2002年于中科院光电技术研究所获得硕士学位,主要从事光束控制技术 & 光学机械系统设计方面的研究。E-mail: qibo@ioe.ac.cn



陈洪斌(1953—),男,四川彭山人,研究员,博士生导师,主要从事激光光束控制技术方面的研究。E-mail: chb@ioe.ac.cn



任戈(1964—),男,四川绵阳人,研究员,博士生导师,主要从事激光光束控制技术方面的研究。E-mail: rengen@ioe.ac.cn



黄永梅(1968—),女,四川内江人,研究员,1985年毕业于电子科技大学自动化学院获学士学位,2004年与中科院光电所获得博士学位,主要从事光电工程中跟踪控制和信号处理技术研究。E-mail: hjn666@sohu.com



丁科(1982—),男,重庆南川人,博士,2004年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2011年于中国科学院光电技术获得博士学位,主要从事光电跟踪系统,星地激光通信捕获跟瞄系统研究。E-mail: dingke206@mails.gucas.cn



马佳光(1941—),男,辽宁沈阳人,研究员,博士生导师,1964年毕业于大连工学院无线电工程系,主要从事光电捕获跟瞄技术及其应用研究。E-mail: mjg@ioe.ac.cn