

移动量子密钥分发技术进展

朱宇, 石磊, 魏家华, 薛阳, 罗均文

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 量子信号在大气信道中传输的可行性已经在多个实验中得到了证实。将量子通信终端搭载到移动平台被认为是量子通信实用化的重要发展之一, 可满足全球量子保密网络构建和军事通信领域高保密性等需求。综述了量子密钥在地面与移动平台之间的分发所涉及的关键技术, 介绍了移动量子密钥分发技术目前的发展状况与难点, 并探讨了下一步实用化发展方向。

关键词 量子光学; 量子密钥分发; 移动平台; 捕获跟踪瞄准系统; 偏振补偿

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.120004

Progress in Mobile Quantum Key Distribution Technique

Zhu Yu, Shi Lei, Wei Jiahua, Xue Yang, Luo Junwen

College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract The feasibility for the quantum signals transmission in the atmospheric channels has been demonstrated in many experiments. The quantum communication terminals are added to mobile platforms, which is considered as one of the most significant practicable applications and can satisfy the requirements of the construction of global quantum secure networks, the strict security of military communications, and so on. The crucial technologies involved in the quantum key distributions between the ground and the mobile platforms are reviewed. The current status and challenges in the development of mobile quantum key distribution technique are introduced and the development direction for the practicable applications is also discussed.

Key words quantum optics; quantum key distribution; mobile platform; arresting-tracking-pointing system; polarization compensation

OCIS codes 270.5565; 010.3310

1 引言

量子密钥分发(QKD)技术经过二十多年的发展已趋于成熟。2009年,美国 Los Alamos 国家实验室利用低噪声超导纳米单光子探测器(SNSPD)完成了 144 km 诱骗态 QKD 实验^[1]。2016年,中国科学技术大学潘建伟团队利用最优化的四强度诱骗态方法^[2],结合超低损耗光纤实现了 404 km 量子密钥安全传输。

为了突破光纤部署的限制,将通信范围拓展到地面以上,QKD 研究将转向自由空间这一新领域。大气信道内不存在双折射效应,且在 700~850 nm 波段内信道损耗很小,这为空间量子通信实验的开展提供了条件。从基础的点对点短距离 QKD 实验到复杂的地对空、空对空和星地量子通信研究,多层次、宽领域的全球量子通信网络正在逐步形成。同时,QKD 和经典光通信相结合可成为革新现有无线移动通信技术的有效手段之一,满足日益增长的高速率大容量信息传输需求,以及金融、军事、卫星通信等特殊领域对信息传输极高的安全性要求。

收稿日期: 2017-06-29; **收到修改稿日期:** 2017-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61168068)

作者简介: 朱宇(1994—),男,硕士研究生,主要从事空间量子密钥分发方面的研究。E-mail: zhuyurichard@163.com

导师简介: 石磊(1980—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事激光通信和量子通信方面的研究。

E-mail: slfly2012@163.com(通信联系人)

本文围绕影响移动 QKD 系统性能和效率的因素,分析了单光子制备技术、捕获跟踪瞄准(ATP)系统设计、光束准直和偏振补偿等关键技术,研究了背景光抑制等难点,总结了当前主要解决方法并探讨了下一步实用化的发展方向。

2 国内外量子通信研究现状

量子通信是利用量子相干叠加和量子纠缠效应传输信息的一种新型通信方式,其安全性由海森堡测不准原理、光子不可分割和量子不可克隆等量子力学基本原理予以保证。QKD 以 BB84 协议为基础,利用光子的偏振态编码信息,理论上可以确保无条件安全,是目前量子通信领域研究最成熟、应用最广泛的通信方式之一。自由空间 QKD 不受双折射效应影响,使用位于大气窗口内波长为 800 nm 左右的激光进行通信时,可极大地降低损耗,同时自由空间 QKD 部署灵活,构造成本低,非常适合地面站与移动平台(如卫星、飞机、汽车等终端)之间的通信。

2010—2012 年,中国科学技术大学潘建伟团队在青海湖地区完成了一系列实验^[3],包括 16 km 远距离自由空间量子隐形传态实验、40 km 和 20 km 基于转台和热气球的移动浮空平台诱骗态 QKD 实验、32 km 车载诱骗态 QKD 实验,以及 96 km 远距离高损耗自由空间 QKD 实验。这四个实验的主要系统模块和实验装置都相同,只是接收端光学望远镜口径、大气信道衰减等参数略有差别。

2012 年,德国航空航天中心(DLR)通信与导航研究所联合慕尼黑大学完成了一次相距 20 km 的飞机与光学地面站之间的 QKD 实验^[4]。该实验首次将 BB84 系统整合到机载平台中,最终实现的密钥率为 $145 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,误码率为 4.8%。

2015 年,法国滑铁卢大学 Bourgoïn 等^[5]使用速度为 $33 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的运动卡车作为接收端,模拟了 600 km 外低轨卫星轨迹的自由空间 QKD 演示实验,且分别使用单光子和纠缠光子传输信息,最终的误码率分别为 6.55% 和 5.49%。

2016 年,中国科学院组织研发的“墨子号”量子科学实验卫星顺利升空^[6],2017 年 6 月该卫星在国际上率先实现了 10^3 km 级的量子纠缠分发^[7]。

定点 QKD 系统和移动 QKD 系统二者在技术需求上略有差别。移动 QKD 系统需要更准确的通信双方的位置信息,当卫星或飞机等通信终端处于运动状态时,微小的位移都会导致接收端捕获不到通信光束,因此需要精确且能在复杂环境下保持稳定的跟踪瞄准系统。定点 QKD 实验多在近地面进行,未能详尽考虑通信链路延伸到对流层(高度约 12 km)及以上时,大气湍流、水分子吸收和各种天气状况等对量子信号偏振态和光束发散角的影响。这些因素会导致光束在探测器上的成像质量较差,因此需要光束准直和偏振补偿技术对信号光进行修正。

3 机载量子通信的关键技术

3.1 单光子制备技术

自由空间量子通信实验通常采用偏振编码方式,即用单光子的四种偏振态进行编码。因此,能否产生单光子脉冲成为了衡量激光器优劣的标准之一,也是影响系统最终误码率的关键因素之一。除此之外,减少多光子脉冲数目还能避免光子数分离攻击等窃听方式的干扰。

理想的单光子源即单光子枪,通过输入触发来控制光子发射,每输入一个触发信号就发射一个单光子信号。现有技术条件下很难做出理想且实用的单光子源,一般采用弱相干光法制备单光子脉冲。激光衰减至单光子水平(每个脉冲的平均光子数低于 0.1)就可以近似当作单光子源来使用。中国科学技术大学与德国航空航天中心各自开展的室外自由空间 QKD 实验均采用这种单光子源方案,如图 1 所示。

弱相干光单光子产生方案希望能够实现发光频率、脉冲宽度、偏振度等自由度可调可控以及单光子之间无确定相位联系。2016 年,电子科技大学周强等^[8]提出了一种增益开关脉冲激光器。该激光器直接使用数字电子器件配合射频三极管,产生了数百个皮秒电流脉冲,实现了 10 ps 量级的增益开关激光脉冲。实验证明,脉冲重复频率 250 MHz、脉冲宽度 19 ps 和输出波长调谐范围 4 nm 足以满足以上要求。

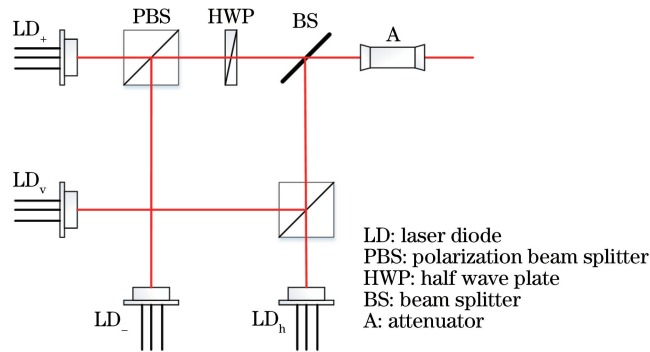


图1 四路弱相干脉冲组成的量子信号源

Fig. 1 Quantum signal source consisted of four weak coherent pulses

同时,为了寻找真正的单光子源,研究者提出了许多其他的单光子制备方案。

1) 色心发光法。金刚石内杂质与晶格空穴的组合称为色心,利用激光抽运之后会发射特定频率的荧光。国际上对金刚石内负电性氮空穴(NV^-)色心的研究较为深入,2002年, Beveratos 等^[9]首次将基于金刚石负电性氮空位色心的单光子源激光器用于量子保密通信,室温下用 532 nm 激光抽运后发出波长为 637 nm 的光,最终系统误码率小于 4.6%,安全密钥率为 $9.5 \times 10^3 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$,该方法与弱相干光衰减法相比,表现出了明显的安全性和误码率方面的优势。2015年, Liu 等^[10]研制了一种新型的基于金刚石负电性硅空穴色心的触发式单光子源,此单光子源波长为 738 nm,线宽为 5 nm,重复频率为 30 MHz。基于晶体色心发光原理的固体激光器具有制备简单、稳定性好、能在常温下工作等优势,被视为能够进入实际应用的理想单光子源之一。

2) 单分子发光法。单分子具有受激辐射发射单光子的特性,可作为量子光源用于量子保密通信。2000年, Lounis 等^[11]首次使用人造纤维作为发光体,在脉冲激光激发下实现了室温可控的单光子源。中国科学技术大学 Zhu 等^[12]利用扫描隧道显微镜技术,诱导单个卟啉分子发出荧光^[12],为电激发单光子源提供了一种新的途径和思路。基于有机分子的室温下可控单光子源成为近十几年来的研究热点之一,其优势是发光频率丰富,发光效率高,分子易获得,容易制成平面结构,利于集成化,但缺点是分子存在闪烁特性,会影响发光稳定性。

3) 量子点法。量子点是一种准零维的纳米材料,由有限数目的原子组成,其内部的载流子受到三个维度的束缚,可形成与原子相类似的分立能级结构,有明显的量子限域效应,可通过改变它的尺寸和化学组成来改变其发射光谱。2000年, Imamoglu 小组首次在 InAs 单量子点上观测到了具有单光子统计性质的光致荧光发射现象^[13]。2006年, Shields 小组演示了利用量子点的双激子跃迁产生纠缠光子对^[14]。2013年,中国科学技术大学 He 等^[15]在国际上首次实现了基于量子点脉冲共振荧光的确定性高品质单光子源,实验产生的单光子源信噪比超过 300:1,二阶关联函数小于 1.5%,光子全同性优于 97%,打破了保持 10 年之久的光子全同性最高只能达到 70%的记录,解决了单光子确定性和高不可分辨性这两个基本问题。量子点单光子源的优点在于可稳定地发出单光子流,重复频率高,谱线宽度窄,且不会发生光褪色。此外,光源尺寸小,易集成,与其他单光子源相比在应用方面有显著的优越性。

3.2 ATP 系统的设计

移动 QKD 系统与一般定点 QKD 系统最大的不同之处在于,其发射端或接收端不是固定而是移动的,这给信号光的对准带来了困难,为此需要选取合适的信标光,引入高精度的 ATP 系统。在空间光通信中,ATP 系统的主要任务是在发射端和接收端之间建立光通信链路,保证链路的稳定,并能持续进行数据传输。

目前,国内外主要采用粗、精跟踪耦合嵌套的方式来实现光路快速高精度捕获跟踪,即用大范围低精度的粗跟踪环嵌套小范围高精度的精跟踪环,通过这种复合轴控制系统望远镜和转台的方位指向。粗、精跟踪的原理基本相同,都是根据探测器上光斑位置相对于基准点的偏差产生控制信号,驱动跟踪单元进行光路的修正补偿,将光斑稳定在基准点的误差范围内。不同之处在于,粗跟踪系统主要完成大范围视场内光束的捕

获,带宽和精度都较低,而精跟踪系统负责补偿粗跟踪之后的位置精度残差,具有高带宽和高精度。

德国航空航天中心采取的复合轴 ATP 系统的发射端和接收端装置如图 2 所示。其基本思想是首先根据全球定位系统(GPS)提供的位置信息调整转台和光学天线的指向方位,完成粗跟踪捕获;然后飞机与地面站终端之间互相发射信标光,经光电探测相机或四象限传感器探测后将信号交由处理单元进行计算,根据计算结果不断修正快速倾斜镜的角度,完成精跟踪;最后飞机传输同步光(也是信标光)的同时,耦合发送量子信号光,经分束、准直、滤波等处理后完成偏振态的测量。

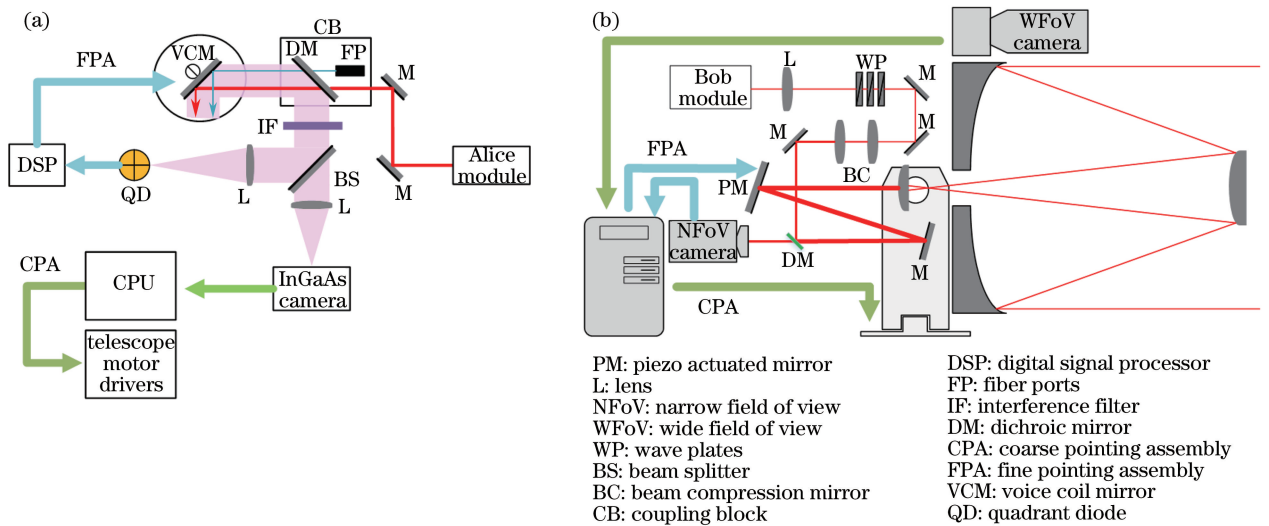


图 2 德国航空航天中心 QKD 系统终端结构。(a)飞机上的发射端;(b)地面站接收端

Fig. 2 Terminal structure of DLR QKD system. (a) Transmitter on aircraft; (b) receiver on ground

ATP 系统结构精巧复杂,捕获跟踪终端内主要有以下三个核心器件。

1) 光学天线。光学天线是一种能接受空间中特定波长的望远镜,也是空间光通信终端的核心器件之一。好的光学天线可提高光束的捕获跟踪精度,提升成像质量,降低误码率。光学天线有折射式、反射式、折反射式三种。目前应用最多的是反射式中的卡塞格林系统^[16-17],该系统结构简单,成像质量好,整个系统没有球差,但不易取得较大视场,除非增大轴向长度才能在扩大视场的同时不降低像质。折射式望远镜制造简单、成像质量好,但色差极难校正,光能量损失大,多用于中小型天文台,激光通信中应用较少。折反射式望远镜^[18-19]结合了前两种的优点,由球面反射镜成像,用折射镜校正球差,具有优良的像质,现阶段因为存在体积大、加工困难、成本高等问题,未能用于激光通信,但随着技术的进步,折反射式结构会是未来发展的趋势之一。

2) 跟踪伺服转台。该器件主要是为了实现光轴的精确指向,控制光束准确进出天线。典型结构有美国用于火星探测的 LCDS 终端采用的单反射镜结构^[20]、日本 LUCE 采用的十字跟踪架式结构^[21]和德国 LCTSX 终端采用的潜望式结构^[22]。伺服转台的设计要求是多功能、小型化和集成化,为达到这一目标,就要尽可能选择轻型、强度高、受热均匀的材料,并且优化转台内部结构,使之更加紧凑。

3) 位置传感器。位置传感器是 ATP 系统中用于接收信标光和通信光以实现光斑精准测量的关键器件。目前常用的传感器有四象限光电探测器(QD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器、CCD 图像传感器和位置敏感探测器(PSD)。QD 由四个光电二极管组成,响应速度快、分辨率高,常用于激光光束准直^[23]、定位、跟踪和制导^[24]等领域。但 QD 探测视场小,且由于其特殊结构,象限之间存在间隙和盲区,无法检测跨越四个象限的光斑。CCD 和 CMOS 均为面阵图像传感器^[25-26],适用于高灵敏度、高帧频、高分辨率的成像系统。二者中 CCD 成像质量更好,CMOS 集成度更高,功耗和成本更低。PSD 是一种基于横向光电效应探测光点重心位置坐标信息的半导体器件,具有分辨率高、响应速度快、信号处理简单等优点,广泛应用于光学位置和角度的测量与控制^[27]、远程光学控制系统、位移和振动监测^[28]、激光光束校准、自动范围探测系统以及人体运动及分析系统等领域。

除对光学器件进行改进,研究具有强大性能的控制算法也是提升 ATP 系统捕获跟踪精度和稳定性的

有效手段之一。ATP 系统作为一个非线性控制系统,其核心问题是当外界参数(如望远镜光轴方位角,大气信道气流温度)和内部参数(如转台机械振动系数)发生变化时,如何获得准确的数学模型,保证系统能快速计算出新的指向角度,将捕获误差降至最小。比例-积分-微分(PID)控制算法是发展最早且最成熟的控制技术之一,稳健性好,算法简单,稳定性高,有很好的瞄准效果,但经典 PID 控制算法要求系统能够建立精确的传递函数模型,对于运动状态变化较大的对象效果较差。随着光通信系统对控制精度要求的提高和应用场景向星地通信、星星通信、机载通信的转变,常规 PID 控制算法存在的响应慢、带宽低、不适应非线性控制过程等缺点也逐渐暴露。针对这些问题,目前有自适应控制^[29]、模糊控制^[30]、滑模控制^[31]这三种典型的改进控制算法,且通常将这几种算法结合使用,能够对内外部参数变化作出及时反应,实时修正控制模型。

神经网络控制的发展也令人瞩目,自 1943 年被提出以来,经过几十年的发展,现在有了反向传播(BP)神经网络、径向基函数(RBF)神经网络、时滞神经网络、延时回归神经网络、模糊神经网络、自组织神经网络等各种新型的神经网络。这些网络广泛地应用于各种非线性不确定系统的智能控制领域中,如用于改善压电陶瓷驱动器的迟滞非线性,提高其定位精度^[32],可用于漂浮基空间机器人在轨捕获目标卫星过程的碰撞动力学建模和捕获结束后的稳定控制^[33]。与上述自适应控制和模糊控制相比,神经网络控制具有更强大的非线性逼近能力、识别能力、学习能力和并行处理能力,有望在星地量子通信、机载量子通信等基于移动目标的空间光通信系统的 ATP 技术中发挥巨大作用。

3.3 光束准直

在星地通信等远距离通信中,激光器发出的光束传输损耗很大。作为光通信系统中的关键技术之一,高精度的激光准直技术可以通过压缩光束发散角,使通信接收端尽可能获得高功率的激光束。具体到移动平台的光通信系统,光束准直技术还可以起到提高光信号跟踪瞄准精度的作用。

通常光束准直需要进行预设调整,中国科学技术大学热气球实验和德国机载实验均先在实验室内进行了量子光源、精/粗跟踪 CCD、同步光、信标光的同轴度校正和发散角压缩,再到室外场地进行实际操作。德国机载实验由于通信过程中飞机一直围绕地面站快速飞行,捕获跟踪难度大,同时终端里的面包板、数据处理单元、电源等器件容易在飞行中发生振动,或因温度变化而膨胀,因此仅靠实验前的校准无法弥补实验中光束出现的偏差,需要更频繁、更精确的准直方案。

首先,飞机在每次飞行前都会进行光束校正,在距飞机发射端 300~400 m 处设立一个目标靶,如图 3 所示,量子光源发出光束打在靶中心,图像传感器和处理器根据光强计算光束偏差,再通过无线局域网将图像数据实时反馈给飞机进行调整。

其次,为了补偿飞行中可能出现的发射端的指向误差,飞机跟踪控制环调整音圈镜,使地面站发来的信标光聚焦在四象限光电探测器一个点上,该点的横纵坐标分别表示四象限光电探测器最上处和最下处、最左处和最右处的电压差,它们与光斑在探测器上的聚焦形状有关,可从带误差的信号中减去而得到正确光斑信息。该探测方法会在飞机接收器的方向中人为地引入误差,但由于接收视场很大,因此对系统的跟踪效果影响不大,其好处是整个 QKD 跟踪瞄准组件的精确控制可以用软件来实现,且不用对现有的、已经证实有效的硬件设置作任何改变。

造成光束偏移的原因主要有三个:受激光子在谐振腔内往返时,激光源温度变化或者材料不均匀使得反射镜的相对位置发生变化,从而造成出射光束的偏移;大气湍流、温度梯度等环境因素造成光束偏移;发射端存在机械振荡使得光束偏移。

针对这些光束偏移原因,研究人员提出了多种解决思路及相应的方案,如单模光纤法^[34]、干涉/衍射法^[35]、共路激光光线漂移补偿法^[36]、反馈控制法^[37]和均值滤波法^[38],这些方法从光源优化、光源到探测器之间的光路设计、数据处理等角度出发,针对不同的影响因素而提出,有各自的适用场景。

2014 年,赵浩等^[39]提出了一种新型的光子晶体准直法,发现只要使得光子晶体带隙边缘附近的光束的有效折射率接近于零,就能实现光束的小角度准直传播。光子晶体自准直效应是指特定频率的光波在光子晶体内传播时,受光子晶体的周期结构调制,光束宽度不变而沿直线传播。光子晶体准直出射有优良的特性,无需引入其他光学器件即能实现光束的准直传输,为光的传输控制提供了一种新的思路。

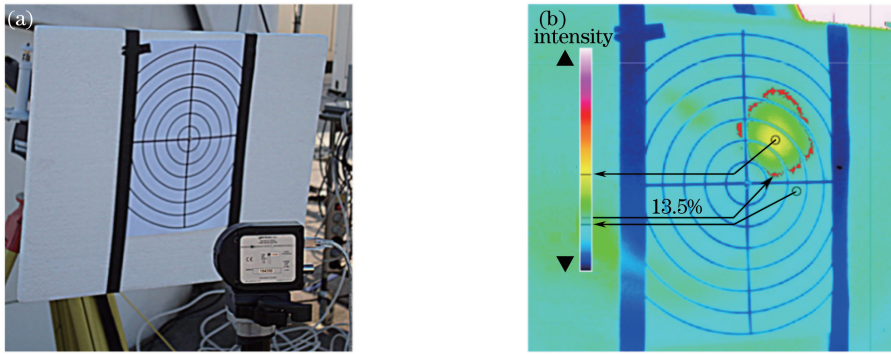


图3 光束准直装置。(a)实物图;(b)准直光束在相机上的成像

Fig. 3 Laser beam alignment device. (a) Physical map; (b) aligned beam imaged on camera

3.4 偏振补偿

量子信号在大气信道中传输时,受气体分子、悬浮微粒、大气湍流和地磁场法拉第效应的影响,用于编码信息的量子偏振度会发生旋转,致使信号检测时误码率上升。作为自由空间 QKD 关键技术之一的偏振补偿,其目的就是保持发射端和接收端共同的偏振基准,这也是实现无条件安全的基础之一。

一般在固定发射端和接收端之间进行 QKD 实验时,通信位置不变,通信时间短暂,大气信道变化不大,对量子信号偏振态的影响较为稳定,可多次进行偏振度测试,统计测量结果,以固定角度的偏振片补偿接收端收到的量子信号。

基于移动目标的 QKD 系统的偏振补偿则有所不同。以德国机载实验为例,该实验中有两种备选的偏振管理方案。方案一是每隔一定时间,飞机发射两个瞬时非正交量子态信号作为校准光束,以测量实际到达接收端的偏振角度。这种方案有两个问题,首先发射光束时必要的校准间隔取决于飞机飞行轨迹,然而飞机进行圆环飞行时,重新校准前精确的时间间隔需要在飞行中确定,不能实时快速改变;其次,这个方案需要在地面站安装高动态范围的偏振计,但指引信号进入偏振计的回转镜又会使光束产生相移,在计算偏振角度时引入额外误差。

基于以上原因,该研究小组最终选择方案二,即开环偏振补偿法。这一方案的好处是不需要考虑校准间隔,量子信号传输也不会被打断。量子信道中引起偏振旋转的因素有:1) 飞行终端内部的静态双折射效应;2) 光束入射角变化导致移动跟踪瞄准产生误差,从而引起相移;3) 信号光从飞机机身下吊舱发出,穿过透明玻璃罩时会产生相移,可能与穿过时在玻璃罩上的位置有关;4) 飞机绕自身与地面站间的光轴作空间旋转;5) 地面站光学器件引起的静态双折射效应(与地面站的天线指向方位无关)。这些因素主要由三种情况造成:飞机内的偏振旋转度[因素 1), 2), 3)],空间偏振旋转度[因素 4)],地面站偏振旋转度[因素 5)]。分别给出各自的表示函数 $R_{\text{FELT}}(\vartheta, \varphi)$ 、 $R_{\text{spatial}}(\delta)$ 和 R_{OGS} ,则总偏振旋转度可表示为

$$R(\vartheta, \varphi, \delta) = R_{\text{OGS}} R_{\text{spatial}}(\delta) R_{\text{FELT}}(\vartheta, \varphi), \quad (1)$$

式中 ϑ 为飞机与地面站间的高度差, φ 为天顶角, δ 为飞机机身绕光轴旋转时旋转的角度。处理单元每隔 200 ms 计算一次偏振旋转度,并将结果送至接收端的偏振控制器,其中的核心器件是两个四分之一波片和一个半波片。通过控制波片的角度,可将任意偏振旋转角补偿到与光束初发射时相同。

1997 年, Mecherle^[40] 针对星地 QKD 实验,首次提出了偏振补偿的概念,用通信两端发射的信标光定义光束的偏振零方向,并在地面站使用一个半波片来校正偏振方向。之后 Toyoshima 等^[41] 提出另一种补偿方案,采用调制波形的 1500 nm 激光作为 800 nm 信号光的同步光,根据接收端检测到的 1500 nm 激光的输出信号确定偏振旋转器的旋转度。

根据是否需要中断量子信号的传输过程,偏振补偿方案大致可分为两种:需要中断的方案,如采用电子偏振控制器实现在线光纤 QKD 中的偏振态控制^[42],利用可编程偏振控制器实现量子网络中的偏振恢复和自动补偿^[43];无需中断的实时控制方案,如利用时分复用参考脉冲实现偏振态实时反馈控制^[44],依靠与量子信号复用的两路经典光传输偏振控制信息^[45]。对比这两种方案,第一种方案进行偏振度探测和补偿时会

中断量子信号的传输,故会明显降低系统的效率,第二种方案则不存在这种问题。但实时控制方案利用时分复用光子发射间隙发送偏振参考信号,有可能与发送速率越来越快的 QKD 系统不兼容,减慢信号的传输,而利用波分复用技术发送参考信号和量子信号时,信号间的偏振退相干效应可能会限制系统最远传输距离。除此之外,大部分实时控制方案会引入额外的器件,如光子探测器、光电二极管等,这无疑增加了系统的复杂度,增加了因光学器件的不完美而引入误码率的可能性,相比之下,中断方案更简单、稳定。

4 研究难点与展望

与光纤量子通信相比,量子密钥在自由空间中分发时,不可避免地受到背景光噪声等环境因素的影响。QKD 系统以单个光子为信息载体,极易淹没在强烈的信道背景光中,与此同时,如果背景光光子和通信光光子同时进入接收端检测通道,探测器的额外响应会明显导致误码率上升,这也是室外空间 QKD 实验大多在夜晚开展的原因。针对这一普遍难点的解决方案大致可分为三类^[46]:1) 时间滤波,主要利用提高系统时间同步精度来准确控制探测器探测信号的时刻;2) 频率滤波,通常背景光是一系列波长连续的、与实验通信光频率不同的光,可借助干涉滤波器等滤除;3) 空间滤波,通过减小光学天线的口径和探测器探测面积来减少杂散光的进入。除以上三种方法外,分析背景光光子和信号光光子在偏振特性上的不同,可考虑采用偏振滤波的方法滤除杂散光^[47]。为进一步降低自由空间 QKD 系统的误码率,提升通信距离,同时还要能在各种天气条件和场地环境下进行稳定通信,抑制甚至消除背景光的影响是 QKD 研究下一步急需解决的难题之一,中国科学院大学等单位已对此展开深入研究。

将 QKD 系统装载在卫星、飞机、汽车等移动平台上可以有效拓宽量子通信在实际工程上的应用,其中的研究重点之一是如何在不增加过多器件的情况下,将 QKD 系统整合进现有的光通信系统,同时提升跟踪瞄准精度等。量子通信作为光通信的延伸,可采用经典光通信中的波分复用、时分复用等技术提高其传输效率。国外的研究机构,如意大利帕多瓦大学,已将 10 MHz 的强脉冲光作为卫星测距光周期性地插到一系列 100 MHz 的弱量子信号脉冲中,并同步发送到低轨卫星上^[48]。

5 结束语

基于移动平台的空间 QKD 系统是量子通信在实用化方面的重点研究方向之一,目前还存在 ATP 系统跟踪瞄准精度不高、背景光抑制难等关键性问题亟待解决。与光纤量子通信相比,QKD 系统能够整合到卫星、飞机、舰艇等运动载体上,实现更大范围的点对点通信,其中空中骨干网络建设是其最大的应用优势。除单光子制备、ATP 系统、光束准直、偏振补偿外,系统中电学控制部件、时间同步模块等也是影响实验最终效果的重要因素,这会是各个研究小组下一步重点关注的方向。

参 考 文 献

- [1] Rosenberg D, Peterson C G, Harrington J W, *et al.* Practical long-distance quantum key distribution system using decoy levels[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(4): 045009.
- [2] Yin H L, Chen T Y, Yu Z W, *et al.* Measurement device independent quantum key distribution over 404 km optical fibre[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [3] Wang J Y, Yang B, Liao S K, *et al.* Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2012, 7(5): 387-393.
- [4] Nauwerth S, Moll F, Rau M, *et al.* Air to ground quantum key distribution[C]. *SPIE*, 2012, 8518: 85180D.
- [5] Bourgoin J P, Higgins B L, Gigov N, *et al.* Free-space quantum key distribution to a moving receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33437-33447.
- [6] Raska M. China's quantum satellite experiments: strategic and military implications [EB/OL]. (2016-09-05) [2017-03-20]. <http://www.rsis.edu.sg/rsis-publication/rsis/co16223-chinas-quantum-satellite-experiments-strategic-and-military-implications/>
- [7] Yin J, Cao Y, Li Y H, *et al.* Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140-1144.
- [8] Zhou Qiang, Liu Jinlu, Gu Yuanhui, *et al.* Gain-switched semiconductor pulsed laser for quantum secure

- communication[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502005.
- 周强, 刘金璐, 谷远辉, 等. 量子保密通信增益开关半导体脉冲激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502005.
- [9] Beveratos A, Brouri R, Gacoin T, *et al.* Single photon quantum cryptography[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(18): 187901.
- [10] Liu Y, Siyushev P, Rong Y, *et al.* Investigation of the silicon vacancy color center for quantum key distribution[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 32961-32967.
- [11] Lounis B, Moerner W E. Single photons on demand from a single molecule at room temperature[J]. Nature, 2000, 407(6803): 491-493.
- [12] Zhu S E, Kuang Y M, Geng F, *et al.* Self-decoupled porphyrin with a tripodal anchor for molecular-scale electroluminescence[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(42): 15794-15800.
- [13] Michler P, Imamoglu A, Mason M D, *et al.* Quantum correlation among photons from a single quantum dot at room temperature[J]. Nature, 2000, 406(6799): 968-970.
- [14] Stevenson R M, Young R J, Atkinson P, *et al.* A semiconductor source of triggered entangled photon pairs[J]. Nature, 2006, 439(7073): 179-182.
- [15] He Y M, He Y, Wei Y J, *et al.* On-demand semiconductor single-photon source with near-unity indistinguishability [J]. Nature Nanotechnology, 2013, 8(3): 213-217.
- [16] Li Ting, Ma Xiaolong, Li Fu, *et al.* Stray light analysis and test of Cassegrain optical antenna[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0806002.
李婷, 马小龙, 李福, 等. 卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0806002.
- [17] Hu Xiaodong, Ding Xiaokun, Wang Weike, *et al.* Stray radiation suppression of horseshoe Cassegrain reflecting optical system for star sensor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(2): 175-179.
胡晓东, 丁小昆, 王维科, 等. 用于星敏感器的马蹄形卡塞格伦反射式光学系统杂散光抑制方法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(2): 175-179.
- [18] Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F -number[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 092202.
闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏感器光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 092202.
- [19] Xue Qingsheng. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptric star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0222001.
薛庆生. 折反式大口径星敏感器光学设计及杂散光分析[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222001..
- [20] Townes S A, Edwards B L, Biswas A, *et al.* The mars laser communication demonstration[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 2: 1180-1195.
- [21] Jono T, Takayama Y, Kura N, *et al.* OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. SPIE, 2006, 6105: 610503.
- [22] Fields R, Lunde C, Wong R, *et al.* NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance[C]. SPIE, 2009, 7330: 73300Q.
- [23] Zhang Hui, Chen Yunshan, Geng Tianwen, *et al.* Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1217002.
张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1217002.
- [24] Zhang Junqiang, Xie Fei, Xue Qingsheng, *et al.* Laser guided lens based on four-quadrant detector[J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 471-479.
张军强, 谢飞, 薛庆生, 等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 471-479.
- [25] Tan Liying, Wu Shichen, Han Qiqi, *et al.* Coarse tracking of periscope-type satellite optical communication terminals[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 270-276.
谭立英, 吴世臣, 韩琦琦, 等. 潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 270-276.
- [26] Liu Yanfei, Dai Yonghong, Shan Xin, *et al.* Analysis of the impact of high frame frequency CMOS camera on optical communication fine tracking system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1319-1325.
刘彦飞, 代永红, 单欣, 等. 高帧频 CMOS 相机对光通信精跟踪系统影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):

- 1319-1325.
- [27] Cheng Zhi, Dong Dengfeng, Zhou Weihu, *et al.* High precision laser position detecting system based on position sensitive device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081202.
程智, 董登峰, 周维虎, 等. 基于位置敏感器件的高精度激光位置检测系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081202.
- [28] Wang Xiajing, Zheng Peixiang, Li Chao, *et al.* A vibration measuring method based on phase detection by position sensitive detector[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(9): 1765-1770.
王夏菁, 郑佩祥, 李超, 等. 一种基于位置敏感器相位检测的振动测量方法[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(9): 1765-1770.
- [29] Cao Hongrui, Liu Yongkai, Zhang Shumei. Adaptive control algorithm research based on fast steering mirror[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(1): 16-19.
曹洪瑞, 刘永凯, 张淑梅. 基于快速反射镜的自适应控制算法研究[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(1): 16-19.
- [30] Cui Ning, Chen Xinglin, Cao Kairui, *et al.* Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1394-1400.
崔宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1394-1400.
- [31] Hu Zhen, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Improvement of ATP system tracking performance of laser communication using sliding mode control[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(5): 522-525.
胡贞, 姜会林, 佟首峰. 滑模控制对激光通信 ATP 系统跟踪性能的改善[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(5): 522-525.
- [32] Wei Qiang, Zhang Chengjin, Zhang Dong, *et al.* Neural network control for piezo-actuator using sliding-mode technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1055-1063.
魏强, 张承进, 张栋, 等. 压电陶瓷驱动器的滑模神经网络控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1055-1063.
- [33] Liang Jie, Chen Li. Dynamics modeling for free-floating space-based robot during satellite capture and RBF neural network control for compound body stable movement[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2013, 34(4): 970-978.
梁捷, 陈力. 漂浮基空间机器人捕获卫星过程动力学模拟及捕获后混合体运动的 RBF 神经网络控制[J]. *航空学报*, 2013, 34(4): 970-978.
- [34] Kuang C, Feng Q, Zhang B, *et al.* A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 125(1): 100-108.
- [35] Luo D, Kuang C, Hao X, *et al.* High-precision laser alignment technique based on spiral phase plate[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 944-949.
- [36] Huang Xiangdong, Yu Wenbo, Tan Jiubin. Study on real-time compensation method for laser drift in 2D displacement measurement[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(2): 299-304.
黄向东, 于文波, 谭久彬. 二维位移测量中激光漂移实时补偿方法研究[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(2): 299-304.
- [37] Zhang L, Wang R, Lin W, *et al.* Compensation method for random drifts of laser beams based on moving average feedback control[C]. *SPIE*, 2012, 8417: 84170Q.
- [38] Li Jiean, Tan Jiubin, Cui Jiwen. Study on method of feedback compensation drift of collimation beam based on filter [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(2): 336-342.
李结安, 谭久彬, 崔继文. 基于滤波的准直光束漂移反馈补偿方法研究[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(2): 336-342.
- [39] Zhao Hao, Shen Yifeng, Zhang Zhongjie. Collimating emission from photonic crystals based on the quasi-zero-effective-index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 174204.
赵浩, 沈义峰, 张中杰. 光子晶体中基于有效折射率接近零的光束准直出射[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 174204.
- [40] Buttler W T, Hughes R J, Kwiat P G, *et al.* Free-space quantum-key distribution[J]. *Physical Review A*, 1998, 57(4): 2379.
- [41] Toyoshima M, Takayama Y, Kunimori H, *et al.* Development of the polarization tracking scheme for free-space quantum cryptography[C]. *SPIE*, 2008, 6951: 69510I.
- [42] Chen J, Wu G, Li Y, *et al.* Active polarization stabilization in optical fibers suitable for quantum key distribution[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17928-17936.

- [43] Ma L, Tang X. Polarization recovery and auto-compensation in quantum key distribution network[C]. SPIE, 2006, 6305: 630513.
- [44] Chen J, Wu G, Xu L, *et al.* Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(6): 065004.
- [45] Xavier G B, Walenta N, De Faria G V, *et al.* Experimental polarization encoded quantum key distribution over optical fibers with real-time continuous birefringence compensation[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(4): 045015.
- [46] Miao E L, Han Z F, Gong S S, *et al.* Background noise of satellite-to-ground quantum key distribution[J]. New Journal of Physics, 2005, 7(1): 215.
- [47] Feng Bin, Shi Zelin, Xu Baoshu, *et al.* Performance characterization and design of wire grid polarizer applied to airlight rejection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1201003.
冯斌, 史泽林, 徐保树, 等. 面向大气背景光抑制的金属光栅偏振片效能表征及设计[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1201003.
- [48] Vallone G, Bacco D, Dequal D, *et al.* Experimental satellite quantum communications[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(4): 040502.