

# 自由空间量子密钥分配的背景光抑制

朱秋立, 石磊, 魏家华, 朱宇, 杨汝, 赵顾颢

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 提高通信速率、实现全天候的空间量子通信是当前亟待解决的问题。概述了量子保密通信的发展历程及趋势,总结了自由空间量子密钥分配(QKD)的发展现状和研究意义。分析了自由空间 QKD 所存在的问题及其误码来源,讨论了背景光抑制的重要性,对抑制方法进行了分析介绍和对比研究,并对背景光抑制的下一步发展方向进行了简要探讨。

**关键词** 量子光学; 量子密钥分配; 背景光; 通信波长; 时间同步; 滤波器

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060004

## Background Light Suppression in Free Space Quantum Key Distribution

Zhu Qiuli, Shi Lei, Wei Jiahua, Zhu Yu, Yang Ru, Zhao Guhao

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

**Abstract** It is urgent at present to realize an all-weather space quantum communication and enhance its communication speed. The development history and the trend of quantum secure communication are summarized, and the development status and the research significance of the free space quantum key distribution (QKD) are also concluded. The source of bit errors and some existing problems of free space QKD are analyzed and the importance of background light suppression is discussed. The suppression methods are introduced and compared, and the next development direction of background light suppression is briefly discussed.

**Key words** quantum optics; quantum key distribution; background light; communication wavelength; time synchronization; filter

**OCIS codes** 270.2500; 270.5565; 010.3310

## 1 引言

量子通信将量子力学的基本原理与通信技术相结合,基于海森堡不确定性和量子态不可克隆性等原理,被证明为无条件安全的一种全新的通信技术。自 Bennett 等<sup>[1]</sup>在 1984 年提出第一个量子密钥分配(QKD)协议——BB84 协议以来,关于 QKD 的理论研究和实验论证迅猛发展<sup>[2-6]</sup>,引起了各国研究者的高度关注。

QKD 的第一个演示性实验亦由 Bennett 等<sup>[7]</sup>完成,光子在空气中传播了 32 cm。在之后的研究与发展中,量子保密通信主要以单光子作为载体,其

与光纤通信的结合表现出巨大的应用前景。Muller 等<sup>[8]</sup>利用光纤信道首次完成了单光子偏振编码的 QKD 实验,通信传输距离达到了 1 km。Yin 等<sup>[9]</sup>利用超低损耗光纤,将 QKD 在光纤中的传输距离提高到了 404 km,这是目前量子保密通信在光纤中传输的最远距离。同时,由中国科学技术大学牵头承建的量子保密通信干线——“京沪干线”,在突破了可中继传输<sup>[10]</sup>、高速单光子探测<sup>[11]</sup>等技术后,于 2017 年 9 月正式开通,为构建全球量子保密通信网络打下了坚实的基础。

由于光纤信道自身的偏振效应和色散效应,量子保密通信在光纤信道中的安全传输距离理论上被

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2017-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(61601497)

作者简介: 朱秋立(1994—),男,硕士研究生,主要从事量子通信方面的研究。E-mail: 312411498@qq.com

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

E-mail: slfly2012@163.com(通信联系人)

限制在百公里级内<sup>[12]</sup>,即使研究者们通过量子诱骗态<sup>[13]</sup>、超低损耗光纤<sup>[9]</sup>等技术可以增大安全通信的上限距离,但考虑到地形限制、铺设成本等因素,量子光纤通信仍有着很多的发展瓶颈。事实上,量子保密通信可以在自由空间中实现。大气信道相较于光纤信道,具有退相干效应弱,不受双折射效应影响等特点。在大气窗口波段内,通信波长信号光的传输性好、传输损耗低,因此,自由空间信道为量子保密通信提供了新的发展方向。以偏振编码的自由空间 QKD 为切入点,深入剖析了造成自由空间 QKD 误码的主要原因,结合理论模型,总结了自由空间 QKD 背景光的抑制技术。从波长选择、频域滤波、时域滤波三个方面对相关主流技术进行了详细的对比分析,阐明了背景光抑制技术的发展现状及趋势。

## 2 自由空间 QKD 的发展现状

目前,自由空间 QKD 是量子保密通信的主要发展方向之一,各国科学家们很早就开始了在自由空间 QKD 领域的角逐,如美国 Los Alamos 国家实验室的 Hughes 小组、奥地利维也纳大学的 Zeilinger 小组、德国慕尼黑大学的 Weinfuter 小组以及中国科学技术大学的潘建伟小组等。

美国 Los Alamos 国家实验室的 Hughes 小组在自由空间 QKD 领域实现了许多突破性进展。Bennett<sup>[14]</sup>采用 B92 协议首次在室外完成了自由空间 QKD 实验,传输距离为 950 m,误码率为 1.5%,密钥率为 50 bit/s<sup>[15]</sup>。Buttler 等<sup>[16]</sup>首次在白天完成了距离为 1.6 km 的自由空间 QKD 实验,误码率为 4%。Hughes 等<sup>[17]</sup>又将日光下自由空间 QKD 的传输距离提高到了 10 km,该实验中误码率为 5%,密钥率为 651 bit/s。

奥地利维也纳大学的 Zeilinger 小组创造了自由空间 QKD 在近地面传输距离最远的记录,Ursin 等<sup>[18-19]</sup>采用 BB84 系统在太平洋的两个海岛上完成了距离为 144 km 的自由空间 QKD 实验,误码率为 6.48%,密钥率为 12.8 bit/s。

德国慕尼黑大学的 Weinfuter 小组首次将自由空间 QKD 整合进飞行平台,Moll 等<sup>[20-21]</sup>使飞机绕光学地面站沿固定轨道飞行,完成了距离为 20 km 的基于 BB84 协议的自由空间 QKD 实验,误码率为 4.8%,密钥率达到了 145 bit/s。

中国科学技术大学的潘建伟小组在自由空间 QKD 领域的研究成果丰硕,完成了热气球实验<sup>[22]</sup>、车载 QKD 实验<sup>[23]</sup>等。Liao 等<sup>[24]</sup>采用诱骗态协议,

完成了日光条件下 53 km 的自由空间 QKD 实验,其在日光下的误码率为 3.19%,密钥率最高达到了 400 bit/s。

自由空间 QKD 使用的是单光子级的弱光信号,受信道中大气湍流等因素影响,目前信号光在大气层内的信道中传输的最远距离也只是一百多公里<sup>[17]</sup>,不足以构建全球量子保密通信网络。为了弥补这一不足,Rarity 等<sup>[25]</sup>提出了一个通过高空中转平台进行转发的方案。由于大气层的有效厚度只有 10 km,单光子在大气层以外传播时几乎是零衰减,因此以星地量子保密通信作为中转链路,就可以实现全球范围内的量子保密通信。2016 年 8 月,我国发射了世界上首颗量子科学实验卫星“墨子号”<sup>[26]</sup>。2017 年 9 月,利用“墨子号”卫星,“京沪干线”上的北京节点首次与加拿大实现了洲际量子保密通信,验证了以星地量子保密通信为桥梁构建全球量子保密通信网络的可行性。

然而,目前自由空间 QKD 的发展还存在不足,密钥率依然较低。造成其密钥率低的原因除了固有的信道干扰、接收效率低等因素外,主要还包括通信协议的高弃码率。QKD 的安全性是通过严格把控误码率来保证的,如果误码率高于某一阈值,就可能存在窃听者,必须弃用。但如果系统本身的误码率偏高,超过阈值,即使没有窃听的存在,这段密钥也会被丢弃。因此,降低系统通信过程中的误码率不仅可以提高通信的安全性,还可以减少无窃听条件下因误码率偏高而弃码的情况,从而提高密钥率。

## 3 背景光引起系统误码的机理分析

QKD 系统的误码率是将探测到的量子比特与发送的量子比特进行比对时,其中错误的比特数占发送比特数的比率。对于偏振编码的自由空间 QKD 系统,其误码主要由背景光、暗计数、偏振劣化以及矢基对准偏角造成。

以 BB84 系统中单个量子比特的发送接收过程为例,图 1 简单给出了其中产生误码的部分,过程如下。

1) 随机选中水平垂直基( $H, V$ ),制备量子态为  $|V\rangle$  的信号光子并发射给接收端,信号光子在大气信道中的传输受湍流的影响,偏振幅度以及偏振态会发生改变,即偏振劣化,这将直接导致误码。

2) 当信号光子到达接收端时,选中水平垂直基( $H, V$ )进行测量,能准确测出信号光子的量子态;但如果偏振测量矢基( $H', V'$ )与偏振制备矢基( $H, V$ )存在对准偏角  $\alpha$ ,与偏振劣化的效果相似,会出现

测量的不准确性,从而产生误码。

3) 接收端接收信号光子的同时,也会吸收大气中的背景杂散光,无论选择哪组基进行测量,四路探测器都有可能被混入的背景光子触发,造成误码。当然,背景光子带来正码的概率与造成误码的概率

同为  $1/2$ 。

4) 探测器被接收到的信号光子触发,计数开始。然而,探测器在没有光子触发的情况下,自身振动或热能等原因也会激发出暗电流,此时的计数称为暗计数,其引起正码和误码的概率也均为  $1/2$ 。

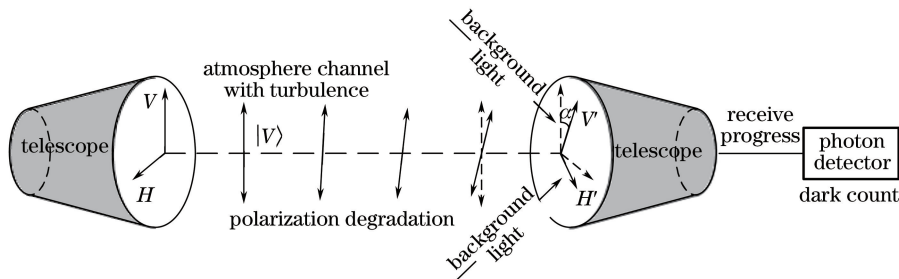


图 1 BB84 系统误码来源的示意图

Fig. 1 Schematic of bit error sources in BB84 system

以上这些因素均能造成系统误码,但它们对误码率的贡献却不相同,其中有些因素甚至是可以改善和避免的。比如,坐标系无关的 QKD 系统<sup>[27-28]</sup>中不存在矢基对准偏角的问题,可以很好地抑制偏振劣化。目前,单光子探测器的性能不断提高,较好的硅基单光子探测器的暗计数可低于 25/s,对误码率的贡献只有 0.2%<sup>[29]</sup>,几乎可以忽略不计。事实上,背景光对自由空间 QKD 系统误码率的贡献最大。因此,白天的自由空间 QKD 实验多选择在背景光强度较弱的时间段进行,如何有效地抑制背景光是提高自由空间 QKD 系统性能的关键措施之一。

对于自由空间 QKD 系统,相比于发射端,接收端的天线面积更大,结构更复杂,故在目前研究较多的地空 QKD 链路中,一般采取飞行器承载发射端、接收端置于地面下行链路的方法。在白天,下行链路中接收端收到的背景光主要来自太阳光以及由高层大气电离所产生的光,经地球大气分子、气溶胶及云雾等的散射,会对自由空间 QKD 产生严重的干扰。

张光宇等<sup>[30]</sup>分析计算出自由空间 QKD 中由背景光引起的误码率的表达式为

$$Q_{\text{bac}} = \frac{R_{\text{bac}}}{R_{\text{sift}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_{\text{sift}} \cdot R_{\text{rep}} \cdot P_{\text{bac}} \cdot t \cdot n}{R_{\text{sift}}}, \quad (1)$$

式中  $R_{\text{sift}}$  为经筛选的量子比特率,  $R_{\text{bac}}$  为背景光率,  $F_{\text{sift}}$  为通信协议的筛选率,  $R_{\text{rep}}$  为脉冲重复速率,  $t$  为时间窗口,  $n$  为探测器的数目,  $P_{\text{bac}}$  为背景光功率。对于非直射情况,可将天空看成一种扩展光源,光接收机所接收的背景光功率可表示为

$$P_{\text{bac}} = W \cdot \theta \cdot S \cdot \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中  $W$  为背景光源的光谱辐射强度,  $\theta$ 、 $S$  和  $\Delta\lambda$  分别为接收光学天线的视场角、接收面积和滤光带宽。借助直观准确的理论模型可以更好地分析出背景光引起系统误码的机理,从而找到抑制背景光的方法。

## 4 背景光抑制技术

由以上分析可以看出,通过降低背景光功率  $P_{\text{bac}}$  和时间窗口  $t$ ,可以减少由背景光引起的误码率  $Q_{\text{bac}}$ ,故抑制背景光辐射可以通过:1) 波长选择,在考虑大气透过率和探测效率的基础上,从背景辐射强度  $W$  较小的波段选取通信波长;2) 时域滤波,缩短接收信号的采样时间  $t$ ,在同样的背景光功率下,缩短采样时间  $t$  可降低接收的噪声能量,即减小噪声光子数,这对时间同步有较高要求;3) 频域滤波,压窄接收光带宽  $\Delta\lambda$ ,以滤除更多的背景光。

原则上,接收系统的数值孔径  $\theta$  越小,杂散光的干扰就越小。但是,数值孔径越小,越难接收到信号光,对系统的跟瞄精度要求就越高;另外,大气和天气情况也对接收光到达角有影响,从而对孔径大小有限制。同样,减小接收光学天线接收面积  $S$  的同时,也会对信号光的接收产生影响,因此并不能有效降低信噪比,抑制背景光的效果有限。

### 4.1 波长选择

在选择自由空间 QKD 的通信波长时,需要考虑其在大气中的透过率、该波段是否拥有高效的单光子探测器、背景光在此波段处的辐射强度等。目前,发展较成熟的硅基单光子探测器在 800 nm 波长附近的探测效率较高,可以达到 65% 左右<sup>[31]</sup>。因此,800 nm 左右的波长常被用作自由空间 QKD 的通信波段,如

文献[16]、[20]中分别采用了 773 nm、850 nm 的通信波长。值得一提的是, Liao 等<sup>[24]</sup>将常在光纤中使用的 1550 nm 通信波长用于自由空间 QKD 中。在探测方面,若使用适于 1550 nm 波长的钢镓砷单光子探测器,探测效率只有 10% 左右。Ma 等<sup>[32]</sup>采用上转换单光子探测器,将探测效率提高到了 38%。上转换单光子探测器通过上转换单光子技术,将 1550 nm 的单光子转换到 800 nm 波长附近,再利用硅基单光子探测器进行探测。虽然探测效率减小了,但 Ma 等<sup>[32]</sup>研究发现,较 800 nm 波长的光,1550 nm 波长的光在大气中的背景光强更低,传输效果更好。红外辐射在大气传输过程中,会受到大气气体分子的吸收、散射以及气溶胶散射和气象条件的影响<sup>[33]</sup>,因此,红外辐射大气透过率的精确计算是非常复杂的。目前,在红外辐射大气透过率的计算上<sup>[34]</sup>,主要通过低分辨率大气透射比模型(LOWTRANL)或高分辨率光谱数据库(HITRAN)来完成。为简化计算,周康康等<sup>[35]</sup>利用大气气体分子引起的红外辐射的吸收衰减、大气散射衰减、天气条件等,建立了红外辐射大气透过率  $\tau$  的简易计算模型:

$$\tau = \exp[-(\mu_{\text{obso}} + \mu_{\text{scat}} + \mu_{\text{mete}}) \cdot x], \quad (3)$$

式中  $x$  为辐射路程,  $\mu_{\text{obso}}$ 、 $\mu_{\text{scat}}$  和  $\mu_{\text{mete}}$  分别为大气吸收、大气散射以及雨雪等天气影响的衰减系数。

图 2 所示为晴朗天气下天顶角等于  $0^\circ$  时的大气透射光谱,可以看出,810 nm 处的透射率为 76%,而 1550 nm 处的透射率接近 80%,这说明 1550 nm 的光在大气中的传输损耗将更低,优势将更为明显。图 3 所示为太阳背景辐射谱,可以看出,相对于 810 nm 处,太阳背景辐射光在 1550 nm 处的强度更小,更有利于降低背景辐射噪声。

表 1 800 nm 与 1550 nm 光波的参数比<sup>[37]</sup>

Table 1 Parameter ratio between 800 nm and 1550 nm lights<sup>[37]</sup>

Parameter	Atmosphere transmissivity	Solar radiation intensity	Mie scattering coefficient	Rayleigh scattering coefficient	Photon number in horizontal plane	Photon number in outer space
Ratio	0.82:1	4.75:1	1:1	1:0.07	2:1	2.4:1

综合分析可知,目前自由空间 QKD 通信波长的选择主要为 800 nm 和 1550 nm。相比于 800 nm,1550 nm 波长的光具有更好的传输效果以及更高的滤噪、抗噪能力。但上转换单光子探测器的探测效率比硅基单光子探测器的低,主要原因是 1550 nm 单光子在上转换的过程中会发生衰减,降低了整体的探测效率。但随着上转换单光子探测器探测效率的进一步提升,1550 nm 将会是自由空间 QKD 通信波长的较优选择。

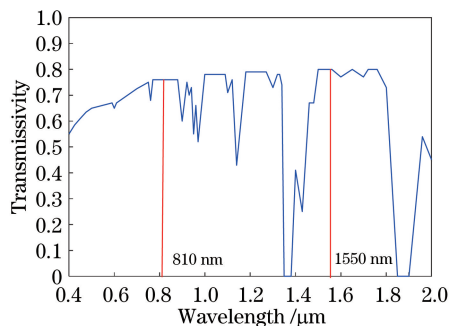


图 2 大气透射光谱

Fig. 2 Atmospheric transmittance spectra

同时,在大气信道的传输过程中,1550 nm 波长的光较 800 nm 的抗噪效果更好。当光在大气中传输时,其噪声主要来源于大气粒子的散射,大气散射又分为瑞利散射和米氏散射<sup>[36]</sup>。对于 1550 nm 和 800 nm 的光,其米氏散射率比接近 1:1,而瑞利散射系数与波长的四次方成反比,因而 1550 nm 光的瑞利散射率约是 800 nm 光的 7%,抗噪效果更佳。800 nm 与 1550 nm 光波的具体参数见表 1<sup>[37]</sup>。

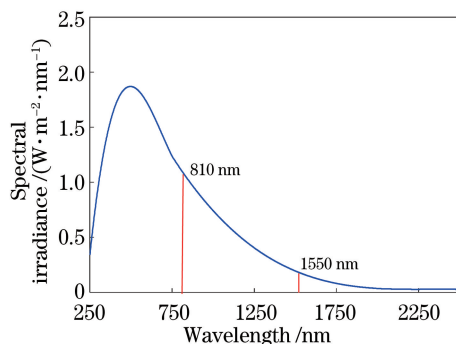


图 3 太阳光辐射谱

Fig. 3 Solar radiation spectrum

## 4.2 时域滤波

在自由空间 QKD 的接收过程中,信号光子没有到达接收端时,单光子探测器一直处于关闭状态,任何光子或暗电流都不会从探测器输出产生计数,信号光子到达后才打开单光子探测器进行计数,这种通过开关“盖革门”模式以滤除噪声的方式即是时间滤波。这种滤波方式的效果取决于开门的时间,开门时间越短,噪声进入的时间就越短,滤波效果越好。但同时需要保证信号光子在开门时间内进入探

测器,这就要求通信双方必须有高精度的时间同步。

Rarity 等<sup>[38]</sup>通过锁相环方式完成了时间同步,利用光子的到达时间驱动一个锁相环和一个本地的高频石英振子,同步精度达到了 1 ns 左右。同时,每发送几百毫秒的数据,都需要在发送数据前后进行时间锁定和数据接收确认,这种方式对电子器件精度的要求较高,同步过程也较为复杂。

目前普遍采用的是同步光方式,每发送一个信号光时先发射一个同步光脉冲,以此脉冲作为门信号触发单光子探测器,以探测随后到达的信号光子。

其实现过程如图 4 所示,用同一电脉冲触发同步光以及信号光,在信号光源之前加入一个延时电路,延迟时间小于电脉冲的触发周期。因此,在每个触发周期内先触发一个同步光脉冲,接着触发信号光脉冲,再通过波分复用器将同步光脉冲和信号光脉冲共轴传往接收端。事实上,自由空间 QKD 必须有辅助 ATP 系统进行跟踪捕获,利用 ATP 系统的信标光作为同步光,以避免给系统增加额外的同步模块。由此可见,同步光方式更适合作为自由空间 QKD 系统的同步方式。

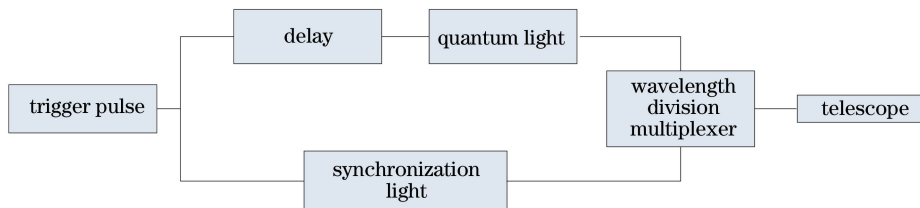


图 4 同步光方式的发射端

Fig. 4 Transmitting terminal in synchronization light method

任继刚等<sup>[39]</sup>提出了一种改进的同步光方案,该方案采用与量子信号光共光路的同步光脉冲,通过增加同步光脉冲中的平均光子数来区分子信号光与同步光。因为同步光脉冲中光子数较多,会引起四个单光子探测器的同时响应,而量子信号光只会引起某个单光子探测器的响应,利用基于时间标记型的高精度时间测量插件对信号事例和同步事例进行精确的时间测量,同步精度可达到 1.023 ns。Yin 等<sup>[40]</sup>又对该方案进行了改进,通过每秒加入一个由全球定位系统(GPS)控制的脉冲来同步起始时间,将同步精度提高到了 788 ps。

### 4.3 频域滤波

由于自然光一般都是连续谱,无论探测器何时

开门,自然光仍然可以进入探测器产生背景计数。因此,在进入单光子探测器之前,还需要通过窄带滤光器滤除通信波段以外的背景干扰,窄带滤光器的带宽越小,越能充分地抑制背景光。

目前,用于自由空间 QKD 窄带滤波的光学元件包括干涉滤波器(IF)、体布拉格光栅(VBG)和原子滤光器等。使用较为广泛的是 IF,图 5 所示为基于 BB84 协议的经典自由空间 QKD 收发结构,其中  $LD_H$ 、 $LD_V$ 、 $LD_+$ 、 $LD_-$  为偏振编码 QKD 的四态激光光源,文献[16]、[20]、[22]中均采用基于此结构的自由空间 QKD 系统。IF 利用反射波的相长或相消提供选择性滤波,其带宽的半峰全宽(FWHM)在 0.2~10 nm 之间,透过率在 40%~70%之间<sup>[41]</sup>。

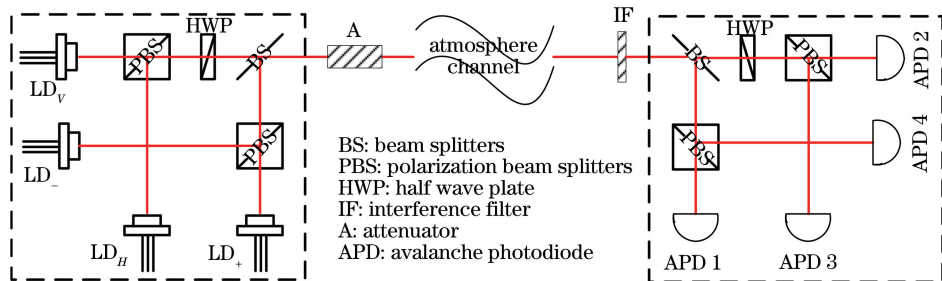
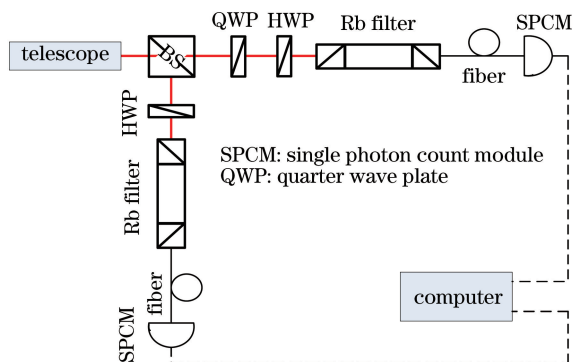


图 5 经典 BB84 系统的收发结构图

Fig. 5 Structural diagram of sender and receiver in classical BB84 system

原子滤波器在自由空间 QKD 系统中的应用较少,Shan 等<sup>[42]</sup>利用法拉第反常色散原子滤波器(FADOF),设计了基于 B92 协议的自由空间 QKD

系统,系统的接收端如图 6 所示。FADOF 是一种常用的原子滤光器,其结构如图 7 所示,其中 P1 和 P2 是起偏方向相互正交的两个偏振片,处于轴向磁

图6 基于Rb FADOF的B92系统接收端<sup>[42]</sup>Fig. 6 Receiving terminal of B92 system based on Rb FADOF<sup>[42]</sup>

场中的原子气泡在原子共振的波长附近会产生反常色散效应,偏振光进入原子气泡后,波长在共振区边缘频段的光因法拉第效应发生旋转,旋转了  $n'\pi + \pi/2$  ( $n'$  为整数) 角度的光就能透过 FADOF。FADOF 的 FWHM 带宽可达 0.01 nm 以下,透过率可达 90% 以上<sup>[43]</sup>。

VBG 也是一种常用的高性能滤光器件。申屠国樑等<sup>[37]</sup> 在上转换单光子探测器中,利用反射型 VBG 对上转换后的和频光进行了高效滤波。反射型 VBG 的光谱选择性高,角度选择在毫弧度范围内,其 FWHM 带宽最优可达 0.01 nm,反射率可高达 95%。采用不同光学滤波器的几个自由空间 QKD 实验系统参数见表 2。

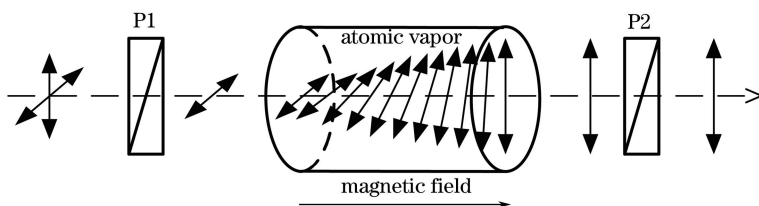


图7 FADOF 的工作原理

Fig. 7 Working principle of FADOF

表2 自由空间 QKD 实验系统的参数表

Table 2 Parameter table for experimental system of free-space QKD

Year	Wavelength / nm	Filter type	FWHM / nm	Transmissivity / %	Distance / km	Protocol	Key rate / (bit·s <sup>-1</sup> )	Bit error rate /%
2006	780	FADOF	0.01	60	0.23	B92	1930	4.77
2015	850	IF	5	-	20	BB84	145	4.5
2017	863	VBG	0.05	95	53	Decoy	400	3.19

IF 的性能稳定,不受温度、环境等因素的影响,且方便使用,不会对系统结构产生影响。但 IF 的滤波带宽相对较小,抑制背景光的能力有限,适用于简单、低成本的原理性验证实验。FADOF 在滤波带宽方面具有其他滤波器无可比拟的优势,但其性能受温度、磁场的影响,需辅之以恒温器,结构复杂。另外,由于 FADOF 两侧的偏振片会改变信号光子的偏振态,因此,如图 6 所示,FADOF 不能像 IF 和 VBG 一样置于光干路中进行整体滤波,只能置于偏振态已确定的支路中分别进行滤波,这无疑会提高成本,增加系统的复杂度。反射型 VBG 的滤光性能较好,滤波带宽以及反射率都有着一定的优势,且中心波长受温度的影响小;但其滤波方式受入射光角度的影响较大,这在一定程度上会影响系统的稳定性,适用于固定点的地面接收端。

## 5 结束语

实现空间量子通信是建成全球量子保密通信网络的重要一步,而背景光是限制空间量子通信全天候工作能力的主要因素,抑制背景光是降低空间量子通信系统的误码率、提高安全性和通信速率的关键措施之一。相较于离散变量 QKD,连续变量 QKD 能更好地抑制背景光,实现日光下的低轨星地 QKD。随着背景光抑制技术的进一步发展,全天候的空间量子通信能力将不断提高,量子信息时代的前景会更加美好。

## 参 考 文 献

- [1] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing[J]. Theoretical Computer Science, 2014, 560(1): 7-11.
- [2] Zukowski M, Zeilinger A, Horne M A, *et al.*

- "Event-ready-detectors" Bell experiment via entanglement swapping[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(26): 4287-4290.
- [3] Ribordy G, Brendel J, Gautier J D, *et al.* Long distance entanglement based quantum key distribution [J]. *Physical Review A*, 2000, 63(1): 5348-5353.
- [4] Li H W, Yin Z Q, Chen W, *et al.* Quantum key distribution based on quantum dimension and independent devices[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(3): 89-97.
- [5] Vallone G, Bacco D, Dequal D, *et al.* Experimental satellite quantum communications[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(4): 040502.
- [6] Guo J J, Guo B H, Chen G M, *et al.* Research progress on photon orbital angular momentum in quantum communication applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080003.  
郭建军, 郭邦红, 程广明, 等. 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080003.
- [7] Bennett C H, Brassard G. Experimental quantum cryptography: The dawn of a new era for quantum cryptography: The experimental prototype is working [J]. *Journal of Cryptology*, 1992, 5(1): 3-28.
- [8] Muller A, Breguet J, Gisin N. Experimental demonstration of quantum cryptography using polarized photons in optical fiber over more than 1 km [J]. *Europhysics Letter*, 1993, 23(6): 383-388.
- [9] Yin H W, Chen T Y, Liu H, *et al.* Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [10] Yin Z Q. Research on quantum cryptography and quantum relay[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 74-82.  
银振强. 量子密码与量子中继研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 74-82.
- [11] Ren M. High speed single photon detection and application research [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.  
任旻. 高速单光子探测及应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [12] Gisin N, Ribordy Q, Tittel W, *et al.* Quantum cryptography[J]. *Review of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145-195.
- [13] Hwang W Y. Quantum key distribution with high loss: Toward global secure communication[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(5): 057901.
- [14] Bennett C H. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states[J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(21): 3121-3124.
- [15] Buttler W T, Hughes R J, Kwiat P G, *et al.* Practical point-to-point free-space quantum key distribution over 5 km[C]. *SPIE*, 1999, 3749: 344-345.
- [16] Buttler W T, Hughes R J, Lamoreaux S K, *et al.* Daylight quantum key distribution over 1.6 km [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(24): 5652-5655.
- [17] Hughes R, Nordholt J E, Morgan G L, *et al.* Free space quantum key distribution over 10 km in daylight and at night [J]. *New Journal of Physics*, 2002, 4(1): 3283-3286.
- [18] Ursin R, Tiefenbacher F, Schmittmanderbach T, *et al.* Entanglement-based quantum communication over 144 km [J]. *Nature Physics*, 2007, 3(7): 481-486.
- [19] Schmitt-Manderbach T, Weier H, Fürst M, *et al.* Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(1): 010504.
- [20] Moll F, Fuchs C, Horwath J, *et al.* Communication system technology for demonstration of BB84 quantum key distribution in optical aircraft downlinks [C]. *SPIE*, 2012, 8517: 851703.
- [21] Moll F, Horwath J, Fuchs C, *et al.* Air to ground quantum key distribution [C]. *SPIE*, 2012, 8518: 85180D.
- [22] 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*, 2013, 7(5): 387-393.
- [23] Yang B. Free space experimental research of quantum communication technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012: 83-86.  
杨彬. 自由空间量子通信技术的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012: 83-86.
- [24] Liao S K, Yong H L, Liu C, *et al.* Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(8): 509-513.
- [25] Rarity J G, Tapster P R, Gorman P M, *et al.* Ground to satellite secure key exchange using quantum cryptography[J]. *New Journal of Physics*, 2002, 4(1): 82.
- [26] Guo X D. "Micius" let china lead the quantum era

- [J]. Physics Teaching Reference, 2016(17): 72.
- 郭晓丹. “墨子号”让中国引领量子时代[J]. 中学物理教学参考, 2016(17): 72.
- [27] Dong C, Zhao S H, Sun Y. Measurement-device-independent quantum key distribution with q-plate[J]. Quantum Information Processing, 2015, 14(12): 4575-4584.
- [28] Sun Y, Zhao S H, Dong C. Measurement device independent quantum key distribution network based on quantum memory and entangled photon sources[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0327001.
- 孙颖, 赵尚弘, 东晨. 基于量子存储和纠缠光源的测量设备无关量子密钥分配网络[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0327001.
- [29] 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.
- [30] Zhang G Y, Yu S Y, Ma J, *et al.* Influence of background light on quantum bit error rate in satellite-to-ground quantum key distribution[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(2): 126-129.
- 张光宇, 于思源, 马晶, 等. 背景光对星地量子密钥分配量子误码率的影响[J]. 光电工程, 2007, 34(2): 126-129.
- [31] Liao Y X, Zhang J Y, Yu K, *et al.* Simulation of SiGe/Si single photon avalanche photodiode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 052004.
- 廖雅香, 张均营, 余凯, 等. SiGe/Si 单光子雪崩光电二极管仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 052004.
- [32] Ma F, Zheng M Y, Yao Q, *et al.* 1.064- $\mu\text{m}$ -band up-conversion single-photon detector[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14558-14564.
- [33] Hu S, Gao T C, Li H, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601005.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601005.
- [34] Kou R K, Wang H Y, Wu X M, *et al.* Atmospheric transmittance at infrared band in low latitude areas[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010102.
- 寇人可, 王海晏, 吴学铭. 低纬度地区红外波段大气透射率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010102.
- [35] Zhou K K, Wang S Y, Song X M, *et al.* Establishment and analysis of calculation model for atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9): 1059-1063.
- 周康康, 王少一, 宋晓梅, 等. 红外辐射大气透射率求解模型的建立与分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1059-1063.
- [36] Zhao N. Research on the channel of space quantum communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 23-26.
- 赵楠. 自由空间量子通信信道的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 23-26.
- [37] Shentu G L. The up-conversion single-photon detector and its application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 49-51.
- 申屠国樑. 上转换单光子探测器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 49-51.
- [38] Rarity J G, Tapster P R, Gorman P M. Secure free-space key exchange to 1.9 km and beyond[J]. Journal of Modern Optics, 2001, 48(13): 1887-1901.
- [39] Ren J G, Yin J, Yang B, *et al.* Time synchronization for quantum key distribution from ground to satellite[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2011, 30(4): 381-384.
- 任继刚, 印娟, 杨彬, 等. 星地量子密钥分发中的时间同步研究[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(4): 381-384.
- [40] Yin J, Ren J G, Lu H, *et al.* Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels[J]. Nature, 2012, 488(7410): 185-188.
- [41] Zhao L J, Ling J H. Study and application of the thin film interference filter's monochromatic[J]. Optical Instruments, 2007, 29(4): 71-74.
- 赵丽娟, 凌洁华. 薄膜干涉滤光片单色性的研究与应用[J]. 光学仪器, 2007, 29(4): 71-74.
- [42] Shan X, Sun X P, Luo J, *et al.* Free-space quantum key distribution with Rb vapor filters[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(19): 191121.
- [43] Cheng X W, Li F Q, Lin Z X, *et al.* Properties and applications of Faraday anomalous dispersion optical filter[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2003, 1(1): 41-43.
- 程学武, 李发泉, 林兆祥, 等. 法拉第原子滤波器的特性及应用[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(1): 41-43.