

自由空间量子通信系统研究

阎毅^{1,2}, 裴昌幸¹, 师瑞娟¹, 韩宝彬¹, 张磊¹

(1. 西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 烟台大学物理系, 山东 烟台 264005)

摘要: 提出了一种用于自由空间的量子通信实验系统. 该系统由两个子系统组成, 分别使用衰减激光作为单光子源和纠缠光子对作为光源, 可以分别研究单光子脉冲系统与纠缠光子对系统的大气传输特性, 并进行了两种自由空间量子通信方式的性能对比分析. 结果表明, 低层大气对量子通信的影响较大, 单光子脉冲系统的量子密钥传输率较高.

关键词: 量子通信; 通信实验系统; 大气效应; 量子仿真

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)05-0708-04

Study of quantum communication systems used for free space

YAN Yi^{1,2}, PEI Chang-xing¹, SHI Rui-juan¹, HAN Bao-bin¹, ZHANG Lei¹

(1. State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. Dept. of Physics, Yantai Univ., Yantai 264005, China)

Abstract: An experimental system of quantum communication that operated for free space is presented. This system is composed of two subsystems, which use attenuated laser or entangled photon pairs as the photon source, respectively. It can be used for experimental investigation in atmospheric characteristics of the system using a single photon source or entangled photon pairs, respectively, along with a comparison of characteristics between the two systems. The results show that the atmosphere in the lower layer plays an important role in affecting the quantum communication, and that the efficiency of the quantum key distribution is higher in the system using a single photon source.

Key Words: quantum communication; communication experimental system; atmospheric effect; quantum simulation

量子通信具有通信容量大、传输速度快和绝对保密的优点, 可以完成经典通信所不能完成的任务. 利用量子通信可以建立无法破译的密钥系统, 实现真正意义上的保密通信. 因此量子通信已经成为当今世界研究的热点问题^[1,2]. 到目前为止, 已经实现了光纤信道的单光子传送实验、自由空间信道中基于单光子的量子密钥分发实验和自由空间信道中基于纠缠光子对的量子密钥分发实验^[3~5]. 量子通信实验可以为光空间通信系统提供更安全的传输方式和更广泛的应用范围.

由于在实验室中制备并保存量子态比较困难, 且对量子态的测量也非常复杂和昂贵, 只有一些标准的量子密钥分发协议得到了实验验证, 更多的量子密钥分发协议需要进行理论验证. 量子密钥分发协议的仿真为量子通信系统的研究提供了一种有效的手段. 可以通过设计不同的仿真算法验证各种量子密钥分发协议, 进而研究量子通信系统的可行性^[6]. 目前, 还不存在真正实用的量子计算机. 因此, 需要利用量子计算语言(QCL)在经典计算机上进行量子通信的仿真^[7].

为了研究自由空间信道中基于单光子的量子密钥分发量子通信系统和基于纠缠光子对的量子密钥分发系统的性能, 笔者提出了一种用于自由空间的量子通信实验系统. 该系统由两个子系统组成, 分别使用衰减

收稿日期: 2007-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60132030, 605721147)

作者简介: 阎毅(1958-), 男, 教授, 西安电子科技大学博士研究生.

激光作为单光子源和纠缠光子对作为光源,以自由空间为量子信道,可以分别研究单光子脉冲系统与纠缠光子对系统的大气传输特性,并进行性能对比分析.研究了大气信道对量子通信的影响,并利用量子计算语言对大气信道中量子密钥分发协议进行了仿真分析.研究表明,在自由空间量子通信中,低层大气对量子通信的影响较大,单光子脉冲系统的量子密钥传输率高于纠缠光子对系统.

1 自由空间量子通信实验系统

目前对量子通信的理论方案和实验研究,主要集中在利用光纤信道和点对点的陆地无线光信道.但光子在光纤和陆地无线信道中的传输距离只是局限性的,无法满足全球性的量子通信的需求,有必要研究自由空间量子通信技术^[8].

自由空间量子通信研究的主要方向是构建连接地面与卫星的全球量子通信网络.自由空间量子通信研究中使用的方案主要为单光子源和纠缠光子对两种^[9,10].

为了研究大气信道对自由空间量子通信系统的影响,笔者提出了一种新的用于自由空间量子通信研究的实验系统.该系统由两部分组成,一部分是使用单光子源的子系统,另一部分是使用纠缠光子对的子系统.其特点在于可以对比研究使用单光子源的量子通信系统和使用纠缠光子对的系统,验证大气对量子通信的影响,为构建将来的全球量子通信网络提供实验基础.

使用单光子源的自由空间量子通信实验子系统如图 1 所示.该系统执行 BB84 协议.图中, Alice 为发射端, Bob 为接收端.发射部分由激光源(polarized SPS)、半波片($\lambda/2$)、极化分束器(PBS)、分束器(BS)、雪崩二极管(APD)和电子光学调制器(EOM)组成.接收部分由滤波器(Filter)、分束器、HV 测量部分(垂直-水平极化)和+-测量部分(左-右旋极化)组成.每个测量部分由极化分束器和雪崩二极管组成.该系统使用自由空间作为量子信道,以因特网为经典信道.测量结果输入数据处理部分进行分析处理.

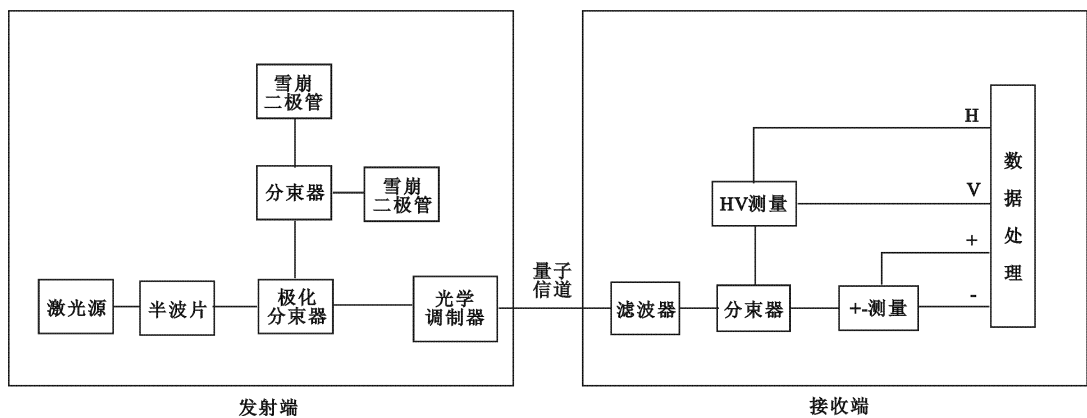


图 1 使用单光子源的自由空间量子通信实验子系统

图 2 为使用极化纠缠光子对的自由空间量子通信实验子系统.该系统需要两个接收端,分别接收来自极化纠缠光子对的一个光子.当两端采用同样的基矢进行测量时,两者的测量结果是相关的.当发射端制备的初态合适时,两端同样在 HV 基矢测量,将同样得到 H 或 V.当基矢不同时,无论甲端采用 HV 基矢测量得到什么结果,乙端都将各有 50% 的概率得到“+”或“-”,反之亦然.测量结果同样输入到数据处理部分进行分析处理.

2 大气对量子通信的影响

为了实现在自由空间中量子通信,必须研究量子信号的大气传输特性.在单光子脉冲子系统中,利用属于两组共轭基的 4 个不同光子极化态对信息进行编码.在大气信道中传输的是单光子,需要讨论单光子与大

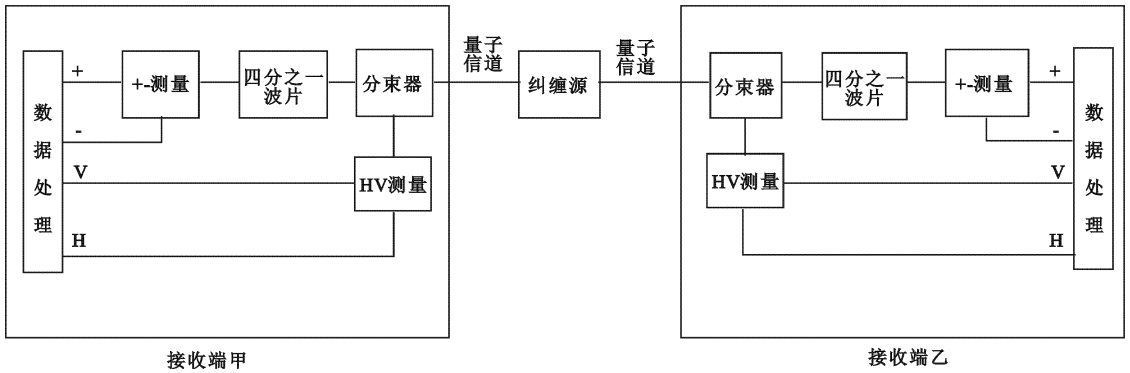


图 2 使用纠缠光子对的自由空间量子通信实验子系统

气分子的相互作用. 在极化纠缠光子对子系统中, 纠缠光子对用于建立通信双方之间的量子信道.

由于光子在大气中传播不存在双折射问题, 而且随着海拔高度的增加光子在传播过程中的损耗会大大地降低. 在近红外波段存在一个大气传输窗口. 自由空间量子通信通常选用该波段的光子或纠缠光子对作为信息载体.

假设大气在水平方向是均匀的, 对于水平光程有

$$T = \exp(-\beta L) \quad (1)$$

其中 T 是传输光程 L 上的透过率, β 是衰减系数, 它包含吸收和散射两种物理过程. 主要由分子吸收和散射、气溶胶的吸收和散射组成.

利用文献[11], 计算了常用近红外激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 在中纬度夏季晴朗和霾雾天气下, 分子和气溶胶吸收、散射以及总衰减系数, 如表 1 所示. 从表 1 中可以看出吸收系数很小, 可以忽略不计, 造成激光能量衰减的主要因素是粒子散射.

表 1 激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 的分子和气溶胶衰减

天气	分子吸收	分子散射	气溶胶吸收	气溶胶散射	总衰减系数
晴朗	0.000 0	0.006 72	0.022 7	0.079 2	0.108 6
霾雾	0.000 0	0.067 2	0.068 2	0.234 3	0.309 2

计算 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 激光斜程大气透过率的半经验公式为

$$T = \exp\{-\sec\theta \cdot (K/V_M)[1 - \exp(-0.835H)]\} \quad (2)$$

其中 θ 为天顶角, H 为传输高度, K 为散射系数, V_M 为能见度. 图 3 为晴空能见度 $V_M = 23 \text{ km}$ 下 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 激光在不同环境下从地面传输到 H 高度的大气透过率(天顶角 $\theta = 15^\circ$).

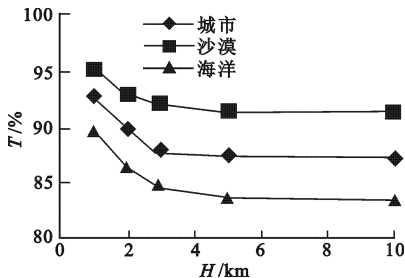


图 3 晴空能见度下 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 激光大气透过率

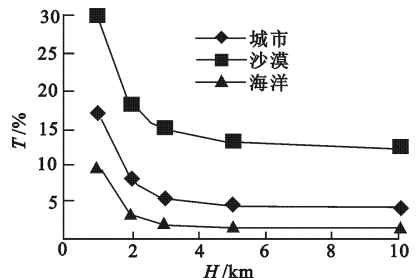


图 4 薄雾能见度下 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 激光大气透过率

图 4 为薄雾能见度 $V_M = 1 \text{ km}$ 下, $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 激光在不同环境(城市上空、沙漠上空、海洋上空)下, 从地面传输到 H 高度的大气透过率(天顶角 $\theta = 15^\circ$). 从图可以看出, 在晴空条件(能见度 $V_M = 23 \text{ km}$)下, 当从地面传输到 10 km 以下高度时, 激光的大气透过率在 80% 以上; 而在薄雾条件(能见度 $V_M = 1 \text{ km}$)下, 激光的大气透过率低于 30% . 另外, 大气湍流也会对激光大气传输产生影响. 因此, 自由空间量子通信实验的理想环境是晴朗天气下夜晚的沙漠上空.

3 用量子计算语言进行量子通信仿真

为了有效研究大气信道对量子通信的影响,采用量子计算语言(QCL),在经典计算机上分别对基于单光子源的 BB84 协议和基于纠缠光子对的 BB84 协议在晴空条件(能见度 $V_M = 23 \text{ km}$)下,当天顶角 $\theta = 15^\circ$ 时,对不同环境(城市上空、沙漠上空、海洋上空),量子密钥分发成功率 R 进行了仿真。

图 5 为在晴空大气、天顶角 $\theta = 15^\circ$ 的条件下,对基于单光子源的 BB84 协议的密钥分发成功率的仿真结果。从仿真结果曲线可以看出,随着发射高度 H 的增加(即,光子在大气中传输距离的增加),密钥分发成功率不断下降。这说明大气分子对光子的影响增加了,降低了密钥分发的成功率。这种下降在地面附近比较明显。当发射高度超过 5 km 后,密钥分发成功率的下降趋势变缓。这是因为上层大气比较稀薄,对量子密钥分发成功率的影响变小。海洋上空密钥分发成功率最低,这是因为海洋上空大气湿度较大,对光子的吸收和散射比较严重,因此对量子密钥分发的影响最大。

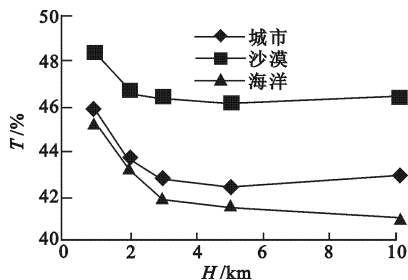


图 5 晴空条件下单光子源系统的量子密钥分发成功率

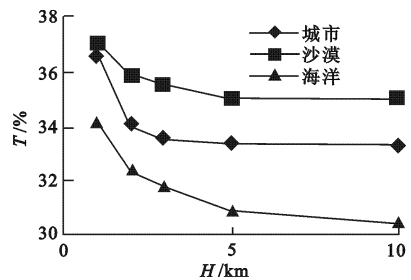


图 6 晴空条件下纠缠光子对系统的量子密钥分发成功率

图 6 为在晴空大气能见度 $V_M = 23 \text{ km}$ 、天顶角 $\theta = 15^\circ$ 的条件下,对基于纠缠光子对的 BB84 协议的密钥分发成功率的仿真结果。从仿真结果曲线可以看出,随着发射高度的增加,量子密钥分发成功率下降。这是因为,发射高度的增加,意味着光子传输距离的增加,因此,大气对光子的吸收与散射也增加了,导致量子密钥分发成功率下降。这种下降在地面附近比较明显。随着发射高度的增加,上层大气逐渐稀薄,对光子的作用减少,使得密钥分发成功率逐渐趋于稳定。从图中曲线可以看出,沙漠上空密钥分发成功率最高,海洋上空密钥分发成功率最低,城市上空居中。这是因为沙漠上空大气最为干燥,对光子的吸收与散射最小,所以量子密钥分发的成功率最大。

在其他因素不变的情况下,量子通信可靠性与量子密钥分发效率成正比。比较图 5 和图 6,可以看出,低层大气对量子通信的影响较大,随着海拔高度增加,大气逐渐稀薄,对量子通信的影响逐渐减弱。另外,在同样的气候与环境条件下,基于极化纠缠光子对的量子通信实验系统的量子密钥分发成功率小于单光子系统。这是因为对于单光子源来说,大气信道对量子密钥分配的影响主要取决于大气粒子对光子的吸收和散射;而对纠缠光子对来说,大气信道对系统的量子密钥分发成功率的影响,不仅仅取决于大气粒子对光子的吸收和散射,还取决于大气信道对纠缠光子对的退相干效应,即,由于大气信道与纠缠光子对的相互作用,使得纠缠光子对的纠缠度下降,最终导致量子信息传输失败。

4 结 论

提出了一种用于自由空间量子通信研究的实验系统,其特点在于可以对比研究单光子系统和纠缠光子对系统的大气传输特点。重点讨论了最坏情况的近地大气环境对量子通信的影响。对于使用单光子源的自由空间量子通信子系统和使用纠缠光子对作为信号源的量子通信子系统,分别用量子计算语言进行了仿真分析,研究了不同气象条件下和不同环境中量子通信的可靠性。

研究表明,在大气量子信道中,低层大气对量子通信的影响较大,单光子系统的密钥分发成功率优于纠缠光子对系统。另外,由于外层空间大气稀薄,因此在地面——卫星之间和卫星——卫星之间的自由空