

# 光子轨道角动量在量子通信中应用的研究进展

郭建军 郭邦红 程广明 谢良文 廖常俊 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子科技学院 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要** 轨道角动量是光子的量子态,具有轨道角动量的光束在光通信等领域中得到了广泛的应用,是目前国内外研究的热点方向之一,特别是轨道角动量可作为自由空间量子信息物理载体的重要选择,这将对量子通信领域带来重要的影响。介绍了光子轨道角动量的定义、产生,简要列举当前的相位、偏振编码经典的两类量子密码通信方案以作对照,以提出的光子轨道角动量密码通信方案为例,着重介绍了光子轨道角动量在量子通信中的应用研究及展望。

**关键词** 量子光学;量子通信;量子态;轨道角动量;拉盖尔-高斯模;厄米-高斯模

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.080003

## Research Progress on Photon Orbital Angular Momentum in Quantum Communication Applications

Guo Jianjun Guo Banghong Cheng Guangming Xie Liangwen  
Liao Changjun Liu Songhao

(School of Information and Optoelectronic Science and Engineering,  
Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University,  
Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** Orbital angular momentum is a quantum state of the photon. The beam with orbital angular momentum has a wide application in optical communication and other fields and has become a hot spot of research at home and abroad. Orbital angular momentum became an important option of physics of quantum information carriers in free space, which will bring important influence in quantum communication field. This paper introduces what orbital angular momentum is and how to produce it. Two kinds of classical quantum cryptography communication solution based on phase and polarization coding are listed briefly in order to compare them with the proposed communication solution, which is the photon orbital angular momentum cryptography communication scheme. We put forward to it for example, and mainly represent its application and prospect.

**Key words** quantum optics; quantum communication; quantum state; orbital angular momentum; Laguerre-Gaussian mode; Hermite-Gaussian mode

**OCIS codes** 270.5568; 270.5565; 060.5565

## 1 引言

1831年,George观察到在透镜焦平面处有“反常光环”形成<sup>[1]</sup>。1919年,Ignatovskii检测到这个“反常光环”附近的能流在自由空间沿与初始方向相反的方向传播<sup>[2]</sup>,他对这“反常光环”的研究分析加深了光子角动量产生的认识。1959年,Richards和Wolf通过计算消球差透镜系统焦平面处的坡印廷矢量分布来分析上述“反常光环”附近的能流<sup>[3]</sup>,1967年,人们发现在这个能流中绕焦平面附近存在一条线旋转的涡旋<sup>[2,4,5]</sup>,

**收稿日期**: 2012-01-06; **收到修改稿日期**: 2012-02-29; **网络出版日期**: 2012-05-21

**基金项目**: 广东省自然科学基金重点项目(10251063101000001)、武汉光电国家实验室(筹)委托项目(0231187073)和广州市科技支撑计划(2008Z1-D501)资助课题。

**作者简介**: 郭建军(1982—),男,硕士研究生,主要从事量子保密通信方面的研究。E-mail: glgxbaobao@163.com

**导师简介**: 郭邦红(1975—),男,博士,副教授,主要从事量子密钥分发通信系统、光纤传感与信息智能感知和光学学科交叉应用等方面的研究。E-mail: guobangh@163.com(通信联系人)

这有趣的发现表明了光波场中存在轨道角动量(OAM),且轨道角动量的产生点处光束呈现暗斑。1981年,Baranova在散斑场中发现了光束轨道角动量<sup>[6]</sup>,在散斑场强度为零的地方具有相位奇点。所谓“相位奇点”是指光场中相位不确定的空间,该空间区域光波振幅为零,围绕相位奇点显示出暗点(也称“暗光束”),光束呈现出螺旋的波前特性<sup>[7,8]</sup>。

1992年,具有轨道角动量的光束被Swartzlander等<sup>[9,10]</sup>在自聚焦的非线性介质中观察到,此非线性介质称为Kerr介质,这一工作理论奠定了具有轨道角动量的光束在Kerr介质中的传播规律,当前该方向的研究焦点是多维具有轨道角动量的光束在光致光子晶格中的产生及其相互作用<sup>[11,12]</sup>。采用轨道角动量作为信息的载体,在量子光学、自由空间光通信等诸多领域有着广泛的应用,能够大大增加传输的信息容量<sup>[13~15]</sup>。Gibson等<sup>[16]</sup>的研究表明涡旋光束带有轨道角动量,利用涡旋轨道角动量进行编码具有更高的保密性。

具有轨道角动量的光子在光通信与量子信息处理以及远程传感等领域越来越多得到关注<sup>[17]</sup>。2004年,Optics Express上就刊登了关于轨道角动量态能用于编码信息的报道<sup>[18,19]</sup>。最近,Deng等<sup>[20]</sup>利用同时携带自旋角动量和轨道角动量信息的光子实现了双光逻辑非门。

光束轨道角动量可以实现高密度数据存储,对存储区域进行相位编码;通过探测透射光束轨道角动量谱的特征可以区分由相位编码形成的不同数据态。当合适的模式和物质相互作用时,轨道角动量会产生机械效应<sup>[9]</sup>。光轨道角动量编码能够有效地提高数据传送密度和速率<sup>[21]</sup>。

随着对角动量的认知不断深入,普遍认为角动量有两种:1)自旋角动量;2)轨道角动量。轨道角动量是光子的量子态<sup>[22,23]</sup>,常用于加载量子信息的物理量有光子的偏振态、相位、频率等。近年来光子的另一个自由度轨道角动量,备受人们的关注。本文主要介绍光子轨道角动量的定义、产生,着重介绍了光子轨道角动量在量子通信中的应用研究及展望。

## 2 光子轨道角动量的定义、产生

### 2.1 光子轨道角动量的定义

研究表明,光束具有两种角动量:1)由于光束的偏振特性产生的角动量,偏振与光矢量的方向相关,称为自旋角动量(SAM)。当一束光是偏振光时,这束光中的每个光子具有 $\sigma\hbar$ 的自旋角动量,其中 $\sigma=0,-1,+1$ ,分别对应线偏振光、左旋偏振光和右旋偏振光,这3个态都是自旋角动量的本征态。

2)由于光束具有螺旋形相位结构而产生的角动量,称为轨道角动量。轨道角动量的本征态具有方位角相位 $\exp(i\phi)$ , $l$ 为任意整数,表示绕光束闭合环路一周线积分为 $2\pi$ 整数倍的个数。拉盖尔-高斯光束(LG)<sup>[24]</sup>是一类应用最为广泛的暗中空光束,并且LG模是光子的轨道角动量的本征态,因此其具有固有的光轨道角动量。LG光束的电场表达式为<sup>[25]</sup>

$$\mathbf{E} = i\omega \left[ (\alpha\hat{x} + \beta\hat{y})u - \frac{i}{k} \left( \alpha \frac{\partial u}{\partial x} + \beta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{z} \right] \exp(-ikz), \quad (1)$$

式中

$$u = \frac{c z_R}{(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}} \left[ \frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^l L_p^l \left[ \frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[ \frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \exp \left[ \frac{-ikr^2 z}{2(z^2 + z_R^2)} \right] \times \exp(-i\phi) \exp \left[ i(2p + l + 1) \arctan \left( \frac{z}{z_R} \right) \right],$$

$\alpha, \beta$ 为系数, $z_R = kw_0^2/2$ 为Rayleigh长度, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, $w_0$ 为束腰半径, $w(z) = [2(z^2 + z_R^2)/(kz_R)]^{1/2}$ 为距离束腰为 $z$ 处的光束宽度, $l, p$ 是整数变量,也是标定LG模式的特征量子数, $c = \sqrt{2p!/[ \pi(|l| + p)!]}$ 为归一化因子, $L_p^l$ 是缔合拉盖尔多项式。由上式可以看出,LG光束存在一个相位因子 $\exp(i\phi)$ ,标明此模式的光束具有螺旋相位波前,其中的每个光子具有 $l\hbar$ 的轨道角动量,是一个涡旋结构的光束。因为 $l$ 为任意整数,所以轨道角动量有无限个本征态。轨道角动量的本征态成为自由空间量子信息物理载体的重要选择。

### 2.2 光子轨道角动量的产生

产生具有轨道角动量(具有扭转相位)的光束一般有以下几种方法:1)可选择性地直接从具有相位转换装置<sup>[26,27]</sup>的激光谐振腔中产生,该方法因在实验中需要谐振腔具有严格的轴对称性,故较难获得稳定的激

光输出。2)利用柱面镜构成的非轴对称光学系统将厄米-高斯(HG)光束变换为扭转对称光束<sup>[28]</sup>,这种方法实现了将  $HG_n^m$  转换成相应的  $LG_p^{l1}$  [ $l = n - m, p = \min(n, m)$ ], 其优点是可使用柱面镜等常规光学元件,简单方便,当所使用的柱面镜表面镀对入射光的增透膜后可忽略柱面镜的反射损耗,转换效率高。3)采用螺旋波带板或全息光学转换板将高斯光束变换为 LG 光束<sup>[29]</sup>,在这里螺旋波带板或全息光学转换板需要特殊加工,且光束经过这些光学元件变换损耗也较大。4)模式变换法,该法采用一个包含球形透镜和柱透镜的模式转换器,由高阶 HG 模获得 LG 模。1993年,Beijerbergen 等<sup>[30]</sup>提出一束本无角动量的 HG 光束经过一对柱面透镜变换后可以转为具有轨道角动量的 LG 光束。

### 2.3 轨道角动量本征态 HG 模和 LG 模的相互转换

LG 模具有固有光轨道角动量。激光器里发射出的光主要是 HG 模,而 LG 模在实际的激光光束中很少见,虽然也能由激光器产生,但是通常是简并的,同时会有  $\exp(i\phi)$  成分存在,并且随时会有涨落,所以轨道角动量的平均值为零<sup>[31,32]</sup>。LG 模和 HG 模在通过两个柱透镜构成的模式转换器就可以相互转换,下面介绍两种转换方法:1) $\pi/2$  模式转换器:通过两个柱透镜构成的  $\pi/2$  模式转换器,可以使 HG 模和 LG 模相互转换,得到一个纯的 LG 模式<sup>[33]</sup>。如图 1 所示<sup>[34]</sup>,模式转换器是由两个柱透镜构成;如图 1(a), $\pi/2$  模式转换器是两个柱透镜隔

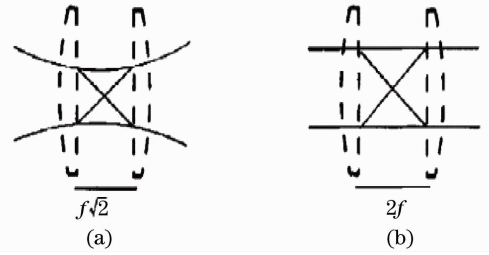


图 1 模式转换器示意图。(a)  $\pi/2$  模式转换器;  
(b)  $\pi$  模式转换器

Fig. 1 Sketch of the mode converters. (a)  $\pi/2$  converter; (b)  $\pi$  converter

$f\sqrt{2}$  放置,入射一束聚焦的光;它将 HG 模转化为系数  $l = n - m, p = \min(n, m)$  的 LG 模。转换器只有当 HG 模横向分布的对称轴相对柱透镜的横向对称轴旋转  $45^\circ$  时才有效。2)  $\pi$  模式转换器:通过两个柱透镜构成的  $\pi$  模式转换器,如图 1(b) 所示,是在准直光束中相距  $2f$  的位置放置两个柱透镜,与  $\pi/2$  模式转换器不同的是,对初始没有任何轨道角动量的光束不会产生轨道角动量。在这里,只有当输入光束属于 HG 或 LG 光束的某个子集且  $n \neq m$  时,这些转换器才能产生携带轨道角动量的 LG 光束。

## 3 基于光子轨道角动量的密码通信方案

常用于加载量子信息的物理量有光子的偏振态、相位、频率等,近年来光子的另一个自由度轨道角动量,受到了人们的关注,提出了在光通信信息编码和量子通信中的应用方案。下面简要介绍当前两类利用偏振、相位编码经典的量子密码通信方案以作对照,着重介绍本课题组提出的基于轨道角动量的量子密码通信方案。

### 3.1 当前的基于光子偏振态、相位编码的量子密码通信方案

量子密码通信是近年发展起来的一种绝对安全的密钥分配技术。在实际的量子密钥分配(QKD)系统中,根据编码和解码方式的不同,可分为两大类:相位调制/干涉强度检测;偏振调制/偏振检测。采用相位调制/干涉强度检测系统有:利用两个马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪实现量子密钥分配的 QKD 系统<sup>[35~39]</sup>;利用类似 Michelson 干涉仪实现量子密钥分配的“即插即用”系统<sup>[40]</sup>;利用类似 Sagnac 环实现量子密钥分配系统<sup>[40]</sup>。在此基础上也发展了相位调制/偏振编码/偏振检测的量子密码通信方式<sup>[41]</sup>。目前,量子保密通信系统多采用 BB84<sup>[42]</sup> 和 B92<sup>[43]</sup> 两种协议。

#### 3.1.1 基于光子偏振态的密码通信方案

偏振编码系统<sup>[44~46]</sup>具有结构简单、易于控制的优点。图 2 是用偏振编码的通信系统示意图。在发射装置中 4 个激光二极管(LD)分别发出偏振为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  的偏振光,经过光混合器(LM)合成一路输出  $0^\circ$  与  $90^\circ, 45^\circ$  与  $135^\circ$  分别组成一组正交归一基。 $0^\circ$  和  $45^\circ$  的偏振态代表二进制数“0”, $90^\circ$  和  $135^\circ$  的偏振态代表二进制数“1”。发送方随机地在 4 个激光器中选择一个来发射激光脉冲,激光脉冲经过强衰减后,进入量子通道。当到达接收装置后,随机调制偏振控制器(PC),使各个光子的偏振状态相对于检测装置来说仍然为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  的正交态。经分束器(BS)后,光子经偏振分束器(PBS)随机入射到  $0^\circ$  和  $90^\circ$  偏振的光子检测

器(或者随机入射到  $45^\circ$  和  $135^\circ$  偏振的光子探测器)。

大气的双折射很小,光子偏振状态在大气中传输受到的影响很小,对于自由空间的量子密码系统来说,偏振编码是一种理想的选择。因此,目前自由空间量子密钥分发系统普遍采用偏振编码方式。由于单模光纤中存在双折射及其引起的偏振模色散效应,长距离传输会导致光子偏振态的随机变化,引起系统的工作不稳定,因而,对于光纤量子密码系统采用偏振编码方式并非是一个很好的选择,普遍采用相位编码的密码通信方案。

### 3.1.2 基于相位编码的密码通信方案

目前,传输距离最长的量子密码通信方案是相位调制编码方案<sup>[47]</sup>,原理如图3所示,采用双不等臂 M-Z 干涉仪实现相位编码的量子通信系统示意图。Alice 和 Bob 分别采用几乎完全一样的不等臂的 M-Z 干涉仪。从 Alice 发出的光子可以有四种可能的路径到达上下探测器,分别用  $D_1$ 、 $D_2$  表示。路径分别是:长臂+短臂、短臂+短臂、短臂+长臂、长臂+长臂。其中,经过短臂+短臂的光子最早到达探测器,而经过长臂+长臂的光子最后到达探测器,这两种情形都没有干涉现象。而经过长臂+短臂和短臂+长臂两个不同路径的光子同时到达探测器,是不可分辨的,因此会发生干涉现象,光子随机到达探测器  $D_1$  和  $D_2$ ,取决于这两个长短臂的光程之差。调制 Alice 和 Bob 端的相位调制器 PM,调节 M-Z 干涉仪臂的光程实现对光子编码的任务。

实际工作中,单光子源采用脉冲序列,探测器采用同步门控,从而相位编码具有抗干扰能力强、极限传输距离远的优点,适合于光纤型密码通信系统。相位漂移是相位编码系统误码的主要影响因素,相位的实时补偿是实现长距离稳定传输,提高安全性<sup>[48]</sup>的有效措施之一。

### 3.2 基于光子轨道角动量的密码通信方案

光子轨道角动量态可作为量子保密通信的信息载体<sup>[49]</sup>,是当前量子通信研究领域的又一热点。由于目前量子保密通信系统多采用 BB84 和 B92 两种协议,而这两种协议在对比发送基和测量基的时候,不可避免地遇到丢掉一半信息的问题,因而降低了密钥生成率。

为了提高密钥生成率,本课题组在正交态编码协议的基础上,设计了一个利用光子轨道角动量态进行保密通信的实验方案<sup>[50]</sup>。该实验方案中,Alice 使用的激光器<sup>[51]</sup>能直接产生具有确定轨道角动量的光子;Bob 采用光束旋转器对光子轨道角动量态进行测量。

图4是基于轨道角动量的量子保密通信系统的结构示意图,它的原型是一个 M-Z 干涉仪。分束器  $BS_1$ 、 $BS_2$  的分束比都是 50:50,脉冲激光器  $LD_1$ 、 $LD_2$  能分别直接输出轨道角动量为  $\hbar$ 、 $2\hbar$  的光子<sup>[52]</sup>,激光脉冲经过光混合器 LM 混合、衰减器 A 衰减后进入量子通道。由达夫棱镜  $DP_1$ 、 $DP_2$  组成的光束旋转器的旋转角  $\alpha = \pi$ 。延时器  $Delay_1$ 、 $Delay_2$  分别位于干涉仪的两臂,其作用是防止窃听器 Eve 同时截获干涉仪两臂的小脉冲,这是正交编码方案的最核心内容<sup>[53]</sup>。 $t_s$ 、 $t_r$  分别是 Alice 发送光子和 Bob 接收到光子的瞬时时刻, $\tau$  是延时器延时的时间, $t_1$  是光子在量子通道中传输的时间,使  $\tau > t_1$ 。

在图4 Alice 控制的区域中,Alice 随机发送轨道角动量为  $\hbar$  或  $2\hbar$  的光子。输入态  $|\Phi_{in}\rangle_{BS_1} = |0\rangle|1\rangle$  经

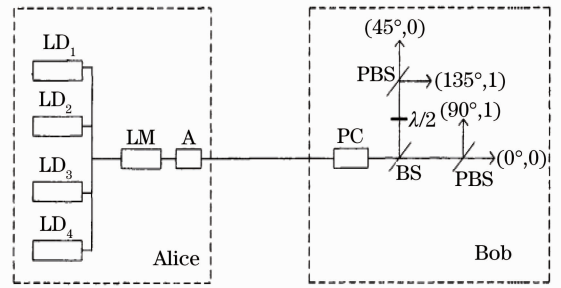


图2 偏振编码通信系统示意图

Fig. 2 Communication system employing polarization coding

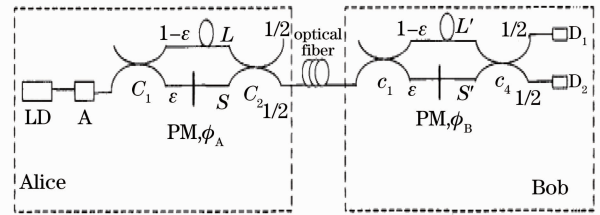


图3 相位编码通信系统示意图

Fig. 3 Communication system employing phase coding

从 Alice 发出的光子可以有四种可能的路径到达上下探测器,分别用  $D_1$ 、 $D_2$  表示。路径分别是:长臂+短臂、短臂+短臂、短臂+长臂、长臂+长臂。其中,经过短臂+短臂的光子最早到达探测器,而经过长臂+长臂的光子最后到达探测器,这两种情形都没有干涉现象。而经过长臂+短臂和短臂+长臂两个不同路径的光子同时到达探测器,是不可分辨的,因此会发生干涉现象,光子随机到达探测器  $D_1$  和  $D_2$ ,取决于这两个长短臂的光程之差。调制 Alice 和 Bob 端的相位调制器 PM,调节 M-Z 干涉仪臂的光程实现对光子编码的任务。

实际工作中,单光子源采用脉冲序列,探测器采用同步门控,从而相位编码具有抗干扰能力强、极限传输距离远的优点,适合于光纤型密码通信系统。相位漂移是相位编码系统误码的主要影响因素,相位的实时补偿是实现长距离稳定传输,提高安全性<sup>[48]</sup>的有效措施之一。

光子轨道角动量态可作为量子保密通信的信息载体<sup>[49]</sup>,是当前量子通信研究领域的又一热点。由于目前量子保密通信系统多采用 BB84 和 B92 两种协议,而这两种协议在对比发送基和测量基的时候,不可避免地遇到丢掉一半信息的问题,因而降低了密钥生成率。

为了提高密钥生成率,本课题组在正交态编码协议的基础上,设计了一个利用光子轨道角动量态进行保密通信的实验方案<sup>[50]</sup>。该实验方案中,Alice 使用的激光器<sup>[51]</sup>能直接产生具有确定轨道角动量的光子;Bob 采用光束旋转器对光子轨道角动量态进行测量。

图4是基于轨道角动量的量子保密通信系统的结构示意图,它的原型是一个 M-Z 干涉仪。分束器  $BS_1$ 、 $BS_2$  的分束比都是 50:50,脉冲激光器  $LD_1$ 、 $LD_2$  能分别直接输出轨道角动量为  $\hbar$ 、 $2\hbar$  的光子<sup>[52]</sup>,激光脉冲经过光混合器 LM 混合、衰减器 A 衰减后进入量子通道。由达夫棱镜  $DP_1$ 、 $DP_2$  组成的光束旋转器的旋转角  $\alpha = \pi$ 。延时器  $Delay_1$ 、 $Delay_2$  分别位于干涉仪的两臂,其作用是防止窃听器 Eve 同时截获干涉仪两臂的小脉冲,这是正交编码方案的最核心内容<sup>[53]</sup>。 $t_s$ 、 $t_r$  分别是 Alice 发送光子和 Bob 接收到光子的瞬时时刻, $\tau$  是延时器延时的时间, $t_1$  是光子在量子通道中传输的时间,使  $\tau > t_1$ 。

在图4 Alice 控制的区域中,Alice 随机发送轨道角动量为  $\hbar$  或  $2\hbar$  的光子。输入态  $|\Phi_{in}\rangle_{BS_1} = |0\rangle|1\rangle$  经

图4 轨道角动量保密通信系统

Fig. 4 Secure communication system based on OAM states

分束器  $BS_1$  作用后,输出态为

$$|\Phi_{\text{out}}\rangle_{BS_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|1\rangle + i|1\rangle|0\rangle). \quad (2)$$

(2)式表明光子从分束器透射端和反射端输出的概率都是 50%,但从反射端输出时附加了  $\pi/2$  的相位跃变,其中  $|0\rangle, |1\rangle$  分别表示真空态和单光子态,以下相同。光子离开量子通道,进入 Bob 控制的区域,经过达夫棱镜  $DP_1, DP_2$  作用后,两臂产生了  $\delta = \pi$  或  $2\pi$  相位差,则分束器  $BS_2$  的输入态为

$$|\Phi_{\text{in}}\rangle_{BS_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}[|0\rangle|1\rangle + i\exp(i\delta)|1\rangle|0\rangle]. \quad (3)$$

分束器  $BS_2$  有转换形式  $|0\rangle|0\rangle \xrightarrow{BS_2} \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle|1\rangle + i|1\rangle|0\rangle)$  和  $|1\rangle|0\rangle \xrightarrow{BS_2} \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle|0\rangle + i|0\rangle|1\rangle)$ ,其中直积态的第一、二个态分别表示光子向着探测器  $D_1, D_2$  传播的态。那么,  $|\Phi_{\text{in}}\rangle_{BS_2}$  经过分束器  $BS_2$  后变为

$$|\Phi_{\text{out}}\rangle_{BS_2} = \frac{1}{2}[1 - \exp(i\delta)]|0\rangle|1\rangle + \frac{i}{2}[1 + \exp(i\delta)]|1\rangle|0\rangle. \quad (4)$$

对(4)式做如下讨论: 1) 当  $\delta = \pi$ , 即  $l = 1$  时,有  $\frac{1}{2}[1 - \exp(i\delta)]|0\rangle|1\rangle + \frac{i}{2}[1 + \exp(i\delta)]|1\rangle|0\rangle \xrightarrow{BS_2} |0\rangle|1\rangle$ ,这表明当入射光子的轨道角动量为  $\hbar$  时,探测器  $D_1$  没有响应,探测器  $D_2$  有响应; 2) 当  $\delta = 2\pi$ , 即  $l = 2$  时,有  $\frac{1}{2}[\exp(i\delta) + 1]|1\rangle|0\rangle + \frac{i}{2}[\exp(i\delta) - 1]|0\rangle|1\rangle \xrightarrow{BS_2} i|1\rangle|0\rangle$ ,这表明当入射光子的轨道角动量为  $2\hbar$  时,探测器  $D_1$  有响应,探测器  $D_2$  无响应。

根据以上分析,量子密钥分配过程为:首先,根据轨道角动量为  $\hbar, 2\hbar$  的光子态分别代表二进制的“0”和“1”的规则, Alice 随机地发送这两种光子态,并记录发送光子的瞬时刻  $t_s$ ; 然后, Bob 记录下探测器响应的时刻  $t_r$ , 和哪个探测器有响应; 最后, Alice 和 Bob 公开一部分二进制位用于对比瞬时刻和位值。

对系统安全性的讨论表明, Eve 采取截获重发、攻击单臂等攻击手段,都会给系统引入不小于 50% 的误码率,因而其窃听行为不可避免会被发现。经典的量子通信方案多采用 BB84 协议和改进的 B92 协议,编码和解码采用的是正交态的光子对和正交态的比对基,由于比对基的不一致和实际器件的不完备性会丢弃一半以上的光子对,从通信协议角度,理论上该方案与以往的密码通信方案相比,具有两个优点: 1) 不需要通信双方实时监测、调整参考系; 2) 避免了非正交态系统因发送基和测量基不一致而丢弃一半信息的问题,从而在某种程度上提高了密钥生成率。不足之处就是延迟线增加了信道损耗。

## 4 结束语

具有角动量的光束的操控及测量技术是一项有意义的研究工作,应用前景愈来愈广泛。基于轨道角动量的量子通信应用中有待进一步提高安全性、容量以及信息传输速率,减少损耗和噪声,开发更实用的编码方案以实现自由空间光通信、光纤通信的长距离稳定传输。另外,光子角动量在光子纠缠、光消相干等研究领域亦将有广泛的应用前景。

本文介绍了光子轨道角动量的定义、产生,及其在量子通信中的应用研究及展望。研究进展表明具有轨道角动量的光束的应用前景越来越广泛,轨道角动量的产生、控制和精确测量是很有挑战和实验价值的工作;目前光旋涡已在自由空间传输中得到应用,在光纤中传输是值得尝试的探索工作;多模光纤中的非子午模,是角动量量子化的结果,用多模光纤产生光旋涡或传输光旋涡等的研究也具有十分重要的科学意义。

## 参 考 文 献

- 1 Wei Haiqing, Xue Xin, Jonathan Leach *et al.*. Simplified measurement of the orbital angular momentum of single photons [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**(1-3): 117~122
- 2 N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen *et al.*. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 52~54
- 3 Dong Yiming, Xu Yunfei, Zhang Zhang *et al.*. The experimental investigation of orbital angular momentum of complex

- astigmatic elliptical beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5755~5759
- 董一鸣, 徐云飞, 张璋等. 复杂像散椭圆光束的轨道角动量的实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5755~5759
- 4 Anna T. O'Neil, Miles J. Padgett. Three-dimensional optical confinement of micron-sized metal particles and the decoupling of the spin and orbital angular momentum within an optical spanner[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **185**(1-3): 139~143
- 5 Lei Ming, Yao Baoli. Experimental and theoretical studies of optically driven rotation of calcium carbonate particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 816~819
- 雷铭, 姚保利. 碳酸钙微粒光致旋转的实验和理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 816~819
- 6 Gao Fuhai, Chen Baosuan, Pu Jixiong *et al.*. Intensity distribution and spiral spectra of Laguerre-Gaussian beam passing through a single-slit[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 090501
- 高福海, 陈宝算, 蒲继雄等. 拉盖尔-高斯光束经单缝后的光强分布和螺旋谱[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 090501
- 7 Chen Ziyang, Zhang Guowen, Rao Lianzhou *et al.*. Determining the orbital angular momentum of vortex beam by Young's double-slit interference experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **35**(7): 1063~1067
- 陈子阳, 张国文, 饶连周等. 杨氏双缝干涉实验测量涡旋光束的轨道角动量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1063~1067
- 8 Liu Yongxin, Tao Hua, Pu Jixiong. Measurement of orbital angular momentum of an optical vortex beam by using a rhombus aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s102010
- 刘永欣, 陶华, 蒲继雄. 菱形光阑衍射探测涡旋光束的轨道角动量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s102010
- 9 G. A. Swartzlander, Jr., C. T. Law. Optical vortex solitons observed in Kerr nonlinear media[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(17): 2503~2506
- 10 Jason W. Fleischer, Mordechai Segev, Nikos K. Efremidis *et al.*. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically-induced nonlinear photonic lattices[C]. Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2003, **5**(10): 147~150
- 11 D. N. Neshev, T. J. Alexander, E. A. Ostrovskaya *et al.*. Observation of discrete vortex solitons in optically induced photonic lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(12): 123903~123906
- 12 L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. Spreeuw *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys. Rev.*, 1992, **45**(7): 8185~8189
- 13 Daniel F. V. James. Change of polarization of light beams on propagation in free space[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(5): 1641~1643
- 14 Li Chunfang, He Ying, Yang Yanfang. Representation theory and physical properties of finite electromagnetic beams[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(7): 072601
- 李春芳, 何英, 杨艳芳. 有限光束的表示方法及物理性质[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(7): 072601
- 15 Liu Yidong, Gao Chunqing, Li Feng *et al.*. Study on orbital angular momentum and its spectrum of partially coherent light beam[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(4): 462~467
- 刘义东, 高春清, 李丰等. 部分相干光的轨道角动量及其谱的分析研究[J]. *应用光学*, 2007, **28**(4): 462~467
- 16 Franco Gori. Matrix treatment for partially polarized, partially coherent beams[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 241~243
- 17 Anna T. O'Neil, Miles J. Padgett. Axial and lateral trapping efficiency of Laguerre-Gaussian modes in inverted optical tweezers[J]. *Opt. Commun.*, 2000(1-6): 45~50
- 18 Graham Gibson, Johannes Courtial, Miles Padgett Gibson. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5448~5456
- 19 Lü Hong, Ke Xizheng. Research on the beam with orbital angular momentum used in encoding and decoding of optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 331~335
- 吕宏, 柯熙政. 具轨道角动量光束用于光通信编码及解码研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 331~335
- 20 Deng Liping, Wang Haibo, Wang Kaige. Quantum CNOT gates with orbital angular momentum and polarization of single-photon quantum logic[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(9): 2517~2520
- 21 Alois Mair, Alipasha Vaziri, Gregor Weihs *et al.*. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons [J]. *Nature*, 2001, **412**(6844): 313~316
- 22 Darryl J. Sanchez, Denis W. Oesch. Orbital angular momentum in optical waves propagating through distributed atmospheric turbulence[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 24596~24608
- 23 Changjun Liao, Zhengjun Wei, Jindong Wang *et al.*. Photon emitting, absorption, and reconstruction of photons [C]. *SPIE*, 2007, **6279**: 627920

- 24 Gao Mingwei, Gao Chunqing, He Xiaoyan. Rotation of particles by using the beam with orbital angular momentum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 413~417  
高明伟, 高春清, 何晓燕. 利用具有轨道角动量的光束实现微粒的旋转[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 413~417
- 25 L. Allen, V. E. Lembessis, M. Babiker. Spin-orbit coupling in free-space Laguerre-Gaussian light beams[J]. *Phys. Rev. A.*, 1996, **53**(5): R2937~R2939
- 26 E. Abramochkin, N. Losevsky, V. Volostnikov. Generation of spiral-type laser beams [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(1-2): 59~64
- 27 Xue Junwen, Su Binghua, Pei Xuedan *et al.*. Analysis and design of laser resonator and beam transformation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081402  
薛峻文, 苏秉华, 裴雪丹 等. 激光谐振腔和光束传输的分析与设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 081402
- 28 J. Courtial, M. J. Padgett. Performance of a cylindrical lens made converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(1-3): 13~18
- 29 G. A. Turubule, D. A. Robert sov, G. M. Smith *et al.*. The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimet re-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **127**(4-6): 183~188
- 30 M. W. Beijersbergen, L. Allen, H. E. L. O. van der Veen *et al.*. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **96**(1-3): 123~132
- 31 M. Brambilla, L. A. Lugiato, V. Penna *et al.*. Transverse laser patterns. I. phase singularity crystals[J]. *Phys. Rev. A.*, 1991, **43**(9): 5090~5113
- 32 M. Brambilla, L. A. Lugiato, V. Penna *et al.*. Transverse laser patterns. II. variational principle for pattern selection, spatial multistability, and laser hydrodynamics [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **43**(9): 5114~5120
- 33 P. Culet, L. Gil, F. Rocca. Optical vortices[J]. *Opt. Commun.*, 1989, **73**(5): 403~408
- 34 Wu Jingzhi. Encoding Information as Light's Orbital Angular Momentum for Optical Communications[D]. Shanxi: North University of China, 2007  
武京治. 光束轨道角动量用于光通信信息编码研究[D]. 山西: 中北大学, 2007
- 35 P. D. Townsend, J. G. Rarity, P. R. Tapster *et al.*. Single photon interference in 10 km long optical fiber interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(7): 634~635
- 36 P. D. Townsend, J. G. Rarity, P. R. Tapster *et al.*. Enhanced single photon fringe visibility in a 10 km-long prototype quantum cryptography channel[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(14): 1291~1293
- 37 C. Marand, P. D. Tawnsend. Quantum key distribution over distances as long as 30 km[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(16): 1695~1697
- 38 G. Bonfrate, M. Harlow, C. Ford *et al.*. Asymmetric Mach-Zehnder germano-silicate channel waveguide interferometers for quantum cryptography systems[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(13): 846~847
- 39 Liang Chuang, Fu Donghao, Liang Bing *et al.*. Quantum key distribution over 1.1 km in an 850 nm experimental all-fiber system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(8): 1429~1433  
梁 创, 符东浩, 梁 冰 等. 850 nm 光纤中 1.1 km 量子密钥分发实验[J]. *物理学报*, 2001, **50**(8): 1429~1433
- 40 A. Muller, T. Herzog, B. Huttner *et al.*. "Plug and play" systems for quantum cryptography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(7): 793~796
- 41 Tang Zhilie, Li Ming, Wei Zhengjun *et al.*. The quantum key distribution system based on polarization states produced by phase modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2534~2539  
唐志列, 李 铭, 魏正军 等. 相位-偏振编码的量子保密通信系统的研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2534~2539
- 42 C. H. Bennett, G. Brassard,. Quantum cryptography; public-key distribution and coin tossing [C]. IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India, 1984, 175~179
- 43 C. H. Bennett. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(21): 3121~3124
- 44 Charles Bennett, Gilles Brassard, Louis Salvail *et al.*. Experimental quantum cryptography[C]. Eurocrypt'90 Proceedings of the Workshop on the Theory and Application of Cryptographic Techniques on Advances in Cryptology, New York, USA, 1991
- 45 A. Muller, J. Breguet, N. Gisin. Experimental demonstration of quantum cryptography using polarized photons in optical fibre over more than 1 km[J]. *Europhys. Lett.*, 1993, **23**(6): 383~388
- 46 A. Muller, H. Zbinden, N. Gisin. Quantum cryptography over 23 km in installed under-lake telecom fibre[J]. *Europhys. Lett.*, 1996, **33**(5): 335~339

- 47 Paul D. Townsends, I. Thompson. A quantum key distribution channel based on optical fiber[J]. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(12): 2425~2433
- 48 Guo Banghong, Lu Yiqun, Wang Faqiang *et al.*. Real-time low-frequency vibration phase drift tracking and auto-compensation in phase-coded quantum key distribution system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 3695~3702  
郭邦红, 路轶群, 王发强 等. 相位调制量子密钥分配系统中低频振动相移的实时跟踪补偿[J]. *物理学报*, 2007, **56**(7): 3695~3702
- 49 Federico M. Spedalieri. Quantum key distribution without reference frame alignment: exploiting photon orbital angular momentum[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 340~346
- 50 Su Zhikun, Wang Faqiang, Lu Yiqun *et al.*. Study on quantum cryptography using orbital angular momentum states of photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3017~3021  
苏志馄, 王发强, 路轶群 等. 基于光子轨道角动量的密码通信方案研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3017~3021
- 51 Chen Hao, Li Jianfeng, Ou Zhonghua *et al.*. Progress of mid-Infrared fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 111402  
陈昊, 李剑峰, 欧中华 等. 中红外光纤激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 111402
- 52 Ram Oron, Nir Davidson, Asher A. Friesem *et al.*. Efficient formation of pure helical laser beams[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **182**(1-3): 205~208
- 53 Lior Goldenberg, Lev Vaidman. Quantum cryptography based on orthogonal states[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(7): 1239~1243