



柯熙政 王 姣 著

# 涡旋光束的产生、传输、 检测及应用



科学出版社

# 涡旋光束的产生、传输、 检测及应用

柯熙政 王 姣 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要围绕轨道角动量复用通信的关键技术,对涡旋光束的产生、传输、检测及应用进行介绍,主要包括对一系列产生涡旋光束的方法进行详细的描述和对比;以拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束为例,介绍它们在大气湍流中的传输特性;利用涡旋光束的叠加态、干涉、衍射及光栅,实现涡旋光束拓扑荷数的检测;介绍涡旋光束在光通信中的应用。

本书可作为高等院校通信、光学等相关专业高年级本科生、研究生的参考用书,也可作为相关专业研究人员和工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

涡旋光束的产生、传输、检测及应用/柯熙政,王姣著. —北京:科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-059208-8

I. ①涡… II. ①柯… ②王… III. ①光通信系统—研究 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 242759 号

责任编辑:李 萍 赵微微/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年10月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年10月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:305 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 前 言

互联网产业的迅速发展对通信行业提出了更高的要求，高速率是未来通信行业发展的必然趋势。随着海量数据传输、云计算和人工智能等新兴领域的出现，传统的通信方式所提供的信道容量具有很大的局限性。为了提高通信系统的信道容量，携带轨道角动量的涡旋光束以一种新的复用方式出现，可从根源上解决复用通信中的速率和信道容量问题。为了实现轨道角动量复用通信，需要相应关键技术的突破：轨道角动量涡旋光束的产生、信道编码、自由空间传输特性以及接收端光束的分离和检测等。

本书内容共四部分。第一部分包括第 1~4 章，介绍携带轨道角动量涡旋光束的产生，对一系列产生涡旋光束的方法进行详细的描述。第 1 章对现有的产生涡旋光束的方法进行对比分析。第 2 章和第 3 章分别介绍涡旋光束的空间产生法和光纤产生法。第 4 章介绍高阶径向指数拉盖尔-高斯光束的叠加特性。第二部分包括第 5~7 章，对涡旋光束的传输特性进行介绍，主要以拉盖尔-高斯光束和贝塞尔-高斯光束为主，介绍它们在大气湍流中的传输特性。第 5 章分析大气湍流和光源参数对光束的光强分布及螺旋谱特性的影响。第 6 章利用自适应光学校正技术对涡旋光束的相位畸变进行研究。第 7 章介绍大气湍流环境下轨道角动量复用涡旋光束的串扰特性。第三部分包括第 8、9 章，介绍涡旋光束的检测方法。第 8 章利用涡旋光束的叠加态，实现涡旋光束拓扑荷数的检测。第 9 章从光栅、干涉以及衍射等方面介绍涡旋光束的检测特性。第四部分包括第 10、11 章，介绍涡旋光束在光通信中的应用。第 10 章介绍涡旋光束在信息的编码和解码中的应用。第 11 章介绍涡旋光束通过马卡天线之后的衍射特性，并研究是否提高发射效率问题。

本书是西安理工大学光电工程技术研究中心集体研究的成果，王姣、胥俊宇、薛璞、王超珍、葛甜、王夏尧、宁川、石欣雨、赵杰、谢炎辰、陈云等多位研究生参与了有关课题的研究及本书的整理工作。此外，在撰写本书的过程中，作者参阅了大量文献和资料，谨向这些文献和资料的作者致以崇高的敬意，他们的工作为作者带来了启迪和帮助，感谢他们为科学研究付出的青春与热情！

本书的出版工作得到陕西省重点产业创新链项目 (2017ZDCXL-GY-06-01) 的

资助，在此表示感谢。

本书是作者涡旋光束相关研究工作的总结，限于作者的学识水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018 年 6 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光学涡旋	1
1.2 轨道角动量复用通信系统	2
1.2.1 背景与意义	2
1.2.2 轨道角动量复用技术原理	4
1.2.3 轨道角动量复用通信系统模型	4
1.3 涡旋光束的产生	5
1.3.1 空间产生法	5
1.3.2 光纤产生法	7
1.3.3 涡旋光束产生方法的对比	7
1.4 涡旋光束的传输特性	8
1.4.1 大气湍流效应	8
1.4.2 光束传输特性研究方法	9
1.4.3 涡旋光束的传输特性研究进展	10
1.5 相位恢复	11
1.5.1 传统自适应光学校正技术	11
1.5.2 无波前传感器的自适应光学校正	12
1.5.3 涡旋光束相位畸变校正	13
1.6 涡旋光束的分离与检测	14
1.6.1 叉形光栅	14
1.6.2 干涉特性	14
1.6.3 衍射特性	16
1.6.4 重构波前	17
参考文献	18
第 2 章 涡旋光束的空间产生法	23
2.1 涡旋光束的基本原理	23
2.2 几种典型的涡旋光束	24
2.2.1 LG 光束	25
2.2.2 贝塞尔光束	27

2.2.3	HG 光束	27
2.3	常用的空间产生法	28
2.3.1	计算全息法	28
2.3.2	几何模式转换法	30
2.3.3	螺旋相位板法	31
2.3.4	空间光调制器法	33
2.3.5	光波导器件转化法	33
2.4	高阶径向 LG 光束	34
2.5	分数阶涡旋光束的产生	37
2.5.1	全息法制备 LG 光束的原理	37
2.5.2	分数阶 LG 光束轨道角动量的实验研究	39
	参考文献	42
<b>第 3 章</b>	<b>涡旋光束的光纤产生法</b>	<b>44</b>
3.1	引言	44
3.2	光纤模式理论	44
3.2.1	波动方程	44
3.2.2	光纤中的矢量模式	45
3.2.3	导模截止与远离截止	49
3.2.4	弱导近似下的标量模	52
3.2.5	利用光纤产生涡旋光原理分析	54
3.3	光纤产生涡旋光的影响因素分析	56
3.3.1	入射波长对涡旋光产生的影响	56
3.3.2	光纤内外折射率差对涡旋光产生的影响	57
3.3.3	光纤纤芯半径对涡旋光产生的影响	59
3.3.4	入射角度对涡旋光激发效率的影响	60
3.3.5	离轴入射光纤对涡旋光产生的影响	62
3.4	利用少模光纤产生涡旋光的实验	63
3.4.1	利用少模光纤产生涡旋光的原理	63
3.4.2	涡旋光的激发效率分析	64
3.4.3	实验研究	65
3.4.4	相位验证	68
3.5	改变光纤结构产生涡旋光	69
3.5.1	结构设计	69
3.5.2	低折射率层对 OAM 模式的影响	71
	参考文献	73

第 4 章 高阶径向指数拉盖尔-高斯光束的叠加特性	75
4.1 引言	75
4.2 径向指数和拓扑荷数对高阶径向 LG 光束叠加态的影响	75
4.2.1 拓扑荷数相同的 LG 光束干涉叠加	76
4.2.2 径向指数相同的 LG 光束干涉叠加	78
4.2.3 任意径向指数、拓扑荷数的 LG 光束干涉叠加	81
4.3 传输距离对高阶径向 LG 光束叠加态的影响	82
4.4 束腰半径对高阶径向 LG 光束叠加态的影响	83
4.5 离轴参数对高阶径向 LG 光束叠加态的影响	85
4.6 高阶径向 LG 光束叠加态的实验	87
4.6.1 实验装置	87
4.6.2 全息图的产生	87
4.6.3 实验结果分析	89
参考文献	93
第 5 章 涡旋光束的传输特性	94
5.1 引言	94
5.2 LG 光束在大气湍流中的传输	94
5.2.1 理论分析	94
5.2.2 LG 光束经大气湍流斜程信道时的传输特性	97
5.3 BG 光束在空间中的传输	104
5.3.1 BG 光束在湍流中传输理论	104
5.3.2 BG 光束经大气湍流信道时的特性	105
5.4 涡旋光束斜程传输时轨道角动量的稳定性研究	109
5.4.1 涡旋光束的光强分布对比	109
5.4.2 涡旋光束的各谐波分量对比	111
5.5 单模和多模复用涡旋光束在大气湍流中的传输	116
5.5.1 单模涡旋光束在大气湍流中的传输	116
5.5.2 多模复用涡旋光束在大气湍流中的传输	118
5.6 涡旋光束的轨道角动量	120
5.6.1 轨道角动量谱分解	120
5.6.2 拓扑荷数扩展	121
5.6.3 轨道角动量模式纯度	123
参考文献	124
第 6 章 自适应光学校正技术	126
6.1 引言	126



6.2	自适应光学基本原理	126
6.2.1	自适应光学校正技术	126
6.2.2	SH 算法	128
6.2.3	相位恢复算法	129
6.2.4	随机并行梯度下降算法	131
6.3	OAM 光束通过大气湍流后的波前校正	133
6.3.1	相位恢复算法	133
6.3.2	随机并行梯度下降算法	136
6.4	实验研究	138
6.4.1	相位恢复算法	138
6.4.2	随机并行梯度下降算法	140
	参考文献	144
<b>第 7 章</b>	<b>大气湍流下轨道角动量复用系统串扰分析</b>	<b>145</b>
7.1	引言	145
7.2	轨道角动量光束在大气湍流中的传输理论	147
7.2.1	多相位屏传输法	147
7.2.2	随机相位屏的产生	147
7.2.3	大气湍流下轨道角动量复用光束串扰的产生	148
7.3	大气湍流中轨道角动量复用光束光强相位分析	149
7.3.1	轨道角动量复用光束的形成	149
7.3.2	不同传输条件下的光强和相位影响	151
7.4	大气湍流下轨道角动量复用光束螺旋谱特性	152
7.4.1	轨道角动量复用光束螺旋谱理论	153
7.4.2	不同传输条件下的螺旋谱分析	153
7.5	大气湍流下轨道角动量复用光束误码率分析	156
7.5.1	轨道角动量复用光束误码率理论	156
7.5.2	不同传输条件下的误码率分析	157
7.6	大气湍流对轨道角动量复用光束影响的实验	158
7.6.1	实验原理	159
7.6.2	实验结果分析	160
	参考文献	161
<b>第 8 章</b>	<b>涡旋光束叠加态的特性</b>	<b>163</b>
8.1	引言	163
8.2	光栅法制备涡旋光束叠加态	164
8.2.1	理论分析	164

8.2.2	光栅叠加	164
8.3	相位法叠加制备双 OAM 光	166
8.3.1	理论分析	166
8.3.2	不同拓扑荷数的叠加涡旋光束特性分析	168
8.4	涡旋光束叠加干涉实验	170
8.4.1	实验设计	170
8.4.2	光栅法叠加的实验	171
8.4.3	光栅法叠加的结果分析	174
8.4.4	相位法叠加的实验	174
8.4.5	相位法叠加的结果与分析	177
	参考文献	178
第 9 章	涡旋光束的检测	179
9.1	引言	179
9.2	利用坐标转换法分离检测 OAM 态	180
9.2.1	理论基础	180
9.2.2	不同拓扑荷数的叠加光场分布	182
9.2.3	基于坐标转换法的 OAM 复用系统	183
9.3	利用光栅检测涡旋光轨道角动量	184
9.3.1	光栅的传输函数及其表示	184
9.3.2	涡旋光光场及其衍射	185
9.3.3	相位校正与 fan-out 技术	186
9.3.4	周期渐变光栅	188
9.4	干涉法检测涡旋光相位	191
9.4.1	涡旋光自身干涉检测法	191
9.4.2	双缝干涉检测法	192
9.5	衍射法检测涡旋光相位	194
9.5.1	三角形衍射检测法	194
9.5.2	方孔衍射检测法	195
9.5.3	单缝衍射检测法	196
9.5.4	圆孔衍射检测法	198
	参考文献	199
第 10 章	涡旋光束轨道角动量信息编解码	201
10.1	引言	201
10.2	涡旋光束轨道角动量相位信息编码	202
10.2.1	四台阶 QSS 相位信息编码和解码原理	202

10.2.2	八台阶 QSS 相位信息编码和解码原理	207
10.3	混合涡旋光场轨道角动量编解码	211
10.3.1	HzG 光轨道角动量	211
10.3.2	单光束动态全息图轨道角动量编码	212
10.3.3	多光束静态全息图轨道角动量编解码	213
10.3.4	改进的单涡旋光束轨道角动量数据编解码	214
10.4	光轨道角动量量子通信编码	217
	参考文献	220
<b>第 11 章</b>	<b>涡旋光束经马卡天线的衍射特性</b>	<b>222</b>
11.1	引言	222
11.2	马卡天线衍射模型	222
11.3	LG 光束经马卡天线的衍射特性	224
11.3.1	衍射场分析	225
11.3.2	螺旋谱分析	228
11.4	马卡天线性能分析	230
	参考文献	231

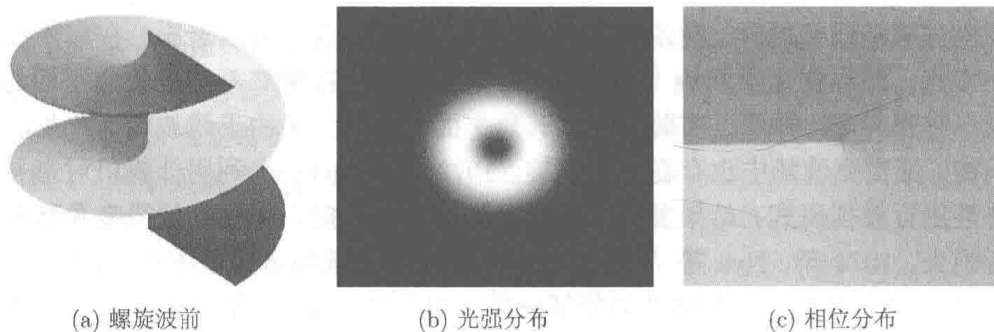
# 第1章 绪 论

## 1.1 光学涡旋

涡旋是自然界最常见的现象之一,它普遍存在于水、云和气旋等经典宏观系统中,也存在于超流体、超导体和玻色-爱因斯坦凝聚等量子微观系统中,被认为是波的一种固有形态特征<sup>[1]</sup>。

人们在研究潮汐运动时,发现在潮汐的漩涡(图 1.1)中存在一种特殊的点。当潮汐与等潮线接触时,潮汐峰就会消失。通过这一现象可以看出,在潮汐波中存在奇点,即存在光学涡旋<sup>[2]</sup>。文献 [3] 和 [4] 发现在消球差透镜的焦平面处会形成一种奇异环,并通过实验发现在其焦平面处存在一个由于线旋转而产生的光学涡旋,证实光波场中也存在光学涡旋。1973 年, Carter<sup>[5]</sup> 利用计算机对奇异环的特性进行模拟研究,结果发现当光束受到轻微扰动时,就可以使得奇异环产生或者消失。1974 年, Nye 等<sup>[6]</sup> 在散斑场的研究中发现海水声波中存在相位奇点,并将奇点的概念推广到电磁波的领域。1981 年, Baranova 等<sup>[7,8]</sup> 发现在激光光斑上存在随机分布的光学涡旋,并通过实验发现在一定条件下,散斑光场中产生光学涡旋的概率是可以测定的,但是不会产生高阶拓扑荷数的光学涡旋场。1992 年, Swartzlander 等<sup>[9]</sup> 通过理论和实验研究发现,在自聚焦介质中存在光学涡旋孤子,且光学涡旋孤子在传输过程中与非线性介质会产生相互作用,这一发现对光学涡旋的传播具有很大的贡献。1998 年, Voitsekhovich 等<sup>[10]</sup> 在一定起伏条件下,详细研究了相位奇点数目密度的特性,结果表明相位奇点数目密度具有一定的统计分布,并不是一个特定的值,并且该统计分布与振幅空间导数的概率分布有关。

到了 21 世纪,由于光学涡旋所涉及的研究领域进一步拓展,人们对光学涡旋的认识达到了新的高度。涡旋光作为波动的一种形式,不仅具有自旋角动量,而且具有由于螺旋形的相位结构而产生的轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM)。这种携带 OAM 的光束被称为“光学涡旋”。光学涡旋是一种独特的光场,它的特殊性主要表现在其特殊的波前结构和确定的光子 OAM 上。图 1.2 为光学涡旋场的螺旋波前、光强分布和相位分布图。通过光学涡旋场中光子 OAM 对原子、分子、胶体颗粒等物质的传递,可实现对微观粒子的亚接触、无损伤的操纵;同时,涡旋光束因其具有的拓扑荷数,在射频以及量子保密通信等领域也具有潜在的潜在应用价值<sup>[12]</sup>。

图 1.1 潮汐中的漩涡现象<sup>[11]</sup>

(a) 螺旋波前

(b) 光强分布

(c) 相位分布

图 1.2 光学涡旋场

## 1.2 轨道角动量复用通信系统

与传统光通信相比,携带 OAM 的光束具有新的自由度,使得 OAM 复用技术在提高系统的信道容量和频谱利用率方面具有独特的优势,通过对 OAM 光束复用特性的研究,可以更加直观地了解 OAM 复用光束。

### 1.2.1 背景与意义

无线光通信,即自由空间光 (free-space optical, FSO) 通信是一种以激光为载体,可进行数据、语音及图像等信息传递的技术。由于大气对光信号的吸收和散射,而对空间中传输的光束产生衰减,大气湍流效应引起激光光斑漂移、闪烁及扩展,造成较大的误码率甚至通信中断<sup>[13]</sup>。传统的信道编码方式虽然可以抑制湍流,但是在强湍流和浓雾等情况下,传统的通信方式并不能满足复用通信的需求。人们需要一种新技术以提高信道容量和频谱利用率。在现有的复用技术中,频率、时间、码型、空间等资源的利用都已被发挥到了极致,受波在自由空间和光纤中信息调

制格式的限制,信息在自由空间和多模光纤网络间不能互操作,因此难以完全满足网络容量和通信安全。为了增加信息传输容量,提高频谱效率,并建立一个可靠性高、安全性好的通信网络,OAM 复用技术被广泛关注。

基于 OAM 的复用通信具有以下优点<sup>[14]</sup>。

(1) 安全性: 归因于 OAM 的拓扑荷数  $l$  和方位角  $\theta$  之间的不确定关系。只有正对完全接收 OAM 光束,才能准确检测其 OAM 态,角度倾斜和部分接收都会导致发送模态的功率扩散到其他模态上,降低对发送 OAM 态的正确检测概率,因此基于 OAM 的复用通信可有效地防止窃听。

(2) 正交性: 不同 OAM 模式的涡旋光束具有固有的正交性,为在不同涡旋光束上调制信息提供了可能,且不同 OAM 信道上传输的信息互不干扰,提高了信息传输的可靠性。

(3) 多维性: 携带 OAM 涡旋光束本征态数目的无穷性可以实现多路信息在同一空间路径上传输,从而提高复用通信的维度。

(4) 频谱利用率高: 涡旋光束复用通信由于采用 OAM 进行复用信息的传输,频谱利用率远远高于长期演进(long term evolution, LTE)、802.11n 和地面数字视频广播(digital video broadcasting-terrestrial, DVB-T)。

(5) 传输速率高: OAM 复用通信的传输速率高于 LTE、802.11n 和 DVB-T,实验研究表明可以达到太比特数量级。

随着对 OAM 研究的不断深入,携带 OAM 的涡旋光束复用技术作为新的复用维度,在信息传输领域引起了人们的广泛关注。为了提高信息传输速率,满足信息传输的安全性,携带 OAM 的涡旋光束复用技术就是解决途径之一。这种复用技术采用 OAM 量子数(或模式数)取值的无穷性进行信息的多信道传输,采用不同 OAM 模式间的正交性实现信息的调制,最后将信息加载到携带 OAM 的两种或两种以上的涡旋光束实现信息的复用传输。

OAM 无线光通信发展十分迅速。2012 年,Wang 等<sup>[15]</sup>提出并演示了利用空间光调制器实现 OAM 复用新型高速通信模型,使自由空间光通信系统传输速率达到 1369.6Gbit/s。该研究突破了利用光子的空间状态来增加传输的频谱效率,极大地提升了系统的传输速率。同年,Tamburini 等<sup>[16]</sup>在威尼斯市利用无线光链路 OAM 模式复用进行了 442m 的传输实验。2014 年,Krenn 等<sup>[17]</sup>在维也纳市中心具有强大气干扰环境下利用 OAM 光束实现了 3km 的无线光通信。2014 年,Xu 等<sup>[18]</sup>利用多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)自适应均衡方法降低大气湍流导致的 OAM 复用系统信号间的串扰。Huang 等<sup>[19,20]</sup>利用 4×4 MIMO 技术和外差检测实现了自由空间 4 路 OAM 模式复用技术,其中每路 OAM 光束携带 20Gbit/s 速率的信息,有效地降低了系统的误码率。2016 年,Ren 等<sup>[21]</sup>通过实验研究了 MIMO 技术在 OAM 复用系统中的应用,发现利用空间分

集和 MIMO 均衡可以有效地减缓大气湍流对 OAM 光通信的影响。2017 年, Shi 等<sup>[22]</sup>提出了一种基于有源换能器阵列的声学 OAM 通信技术。其原理是通过一个由 64 个声源辐射出用复合涡旋态编码的信号组成的相控阵产生含 8 个拓扑荷数的声涡旋场,并在接收端用另一个声学相控阵进行接收和解调。

### 1.2.2 轨道角动量复用技术原理

现有的复用技术包括频分复用、时分复用、码分复用和空分复用等多种复用技术。这些复用技术在其研究领域均取得了突破性的发展。1G 技术的发展与频分复用密不可分;2G 技术引用了时分复用技术和码分复用技术,进而开启了数字通信时代;3G 技术应用了空分复用技术,使得同一载频能够在不同方向上得到重复利用;4G 技术结合了正交频分复用技术和 MIMO 等技术,在通信系统容量和频谱利用率等方面有了极大的改观。

OAM 复用技术本质上是利用 OAM 光束之间的正交特性,将多路需要传输的信号加载到具有不同拓扑荷数的 OAM 光束上进行传输。在接收端利用拓扑荷数的不同来区分不同的传输信道,这种复用方式可以实现在相同载频上同时得到多个相互独立的 OAM 光束信道。人们研究发现,携带 OAM 的涡旋光束能够张成无穷维的希尔伯特空间,因此在同一载频上采用 OAM 复用技术可使得系统获得更好的传输性能<sup>[23]</sup>。这项特性为频谱的高效利用提供了一个新的自由度。

表 1.1 表示常用通信类型 LTE、802.11n、DVB-T 和 OAM 复用的传输速率和频谱利用率。由表 1.1 可以明显看出,OAM 复用技术的频谱利用率和系统传输速率要明显优于其他三种通信类型。OAM 复用技术具备如此高的传输速率和频谱利用率的原因在于,与以前常规的复用技术相比,OAM 复用技术在复用过程中是将载波所携带的 OAM 模式作为调制参数来进行复用的。

表 1.1 传输速率与频谱利用率比较

通信类型	OAM	LTE	802.11n	DVB-T
频谱利用率	95.5(bit/s)/Hz	16.32(bit/s)/Hz	2.4(bit/s)/Hz	0.55(bit/s)/Hz
传输速率	2.56Tbit/s	326.4Mbit/s	144.4Mbit/s	31.668Mbit/s

### 1.2.3 轨道角动量复用通信系统模型

大气湍流传输中 OAM 光束复用通信系统模型如图 1.3 所示。这里以四路复用为例,首先,对输入原始比特流进行正交相移键控 (quadrature phase shift keyin, QPSK) 调制,在固体激光器产生的高斯光束上通过光调制技术加载上调制好的传输信号,此时电信号转换为了光信号。将携带调制信息的高斯光束利用空间相位掩模转换成对应拓扑荷数的 OAM 光束,将产生的四路不同拓扑荷数的涡旋光束进行复用,产生的 OAM 复用态经过大气湍流传输后,在接收端对 OAM 复用态光束

进行解复用得到四路 OAM 光束，然后将涡旋转换为高斯光束。最后，提取出高斯光束上加载的 QPSK 信号进行解调恢复原始比特流，即将光信号转换为原始电信号。

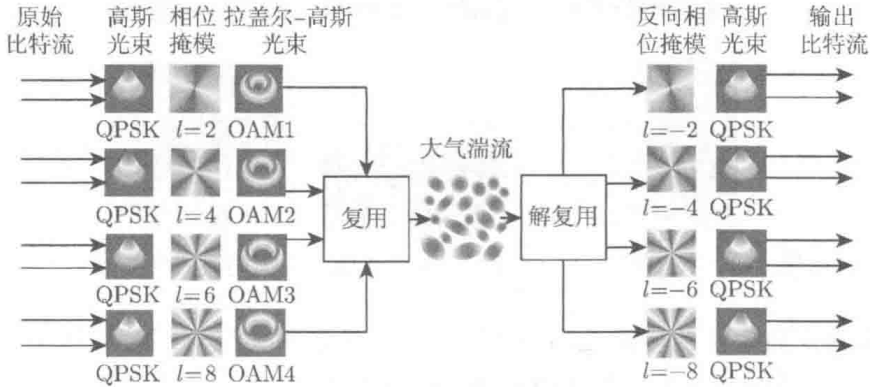


图 1.3 OAM 光束复用通信系统模型

## 1.3 涡旋光束的产生

为了实现 OAM 复用通信，面临的首要问题是产生携带 OAM 的涡旋光束。最常见的产生涡旋光束的方法有：空间产生法和光纤产生法。

### 1.3.1 空间产生法

利用空间结构产生涡旋光束的方法主要包括直接产生法、几何模式转换法、螺旋相位板法和计算全息法。

#### 1) 直接产生法

通过激光谐振腔可直接产生涡旋光束<sup>[24]</sup>。在实验中，该方法对谐振腔的轴对称性具有严格的要求，较难得到稳定的光束输出。

#### 2) 几何模式转换法

由柱面镜构成非轴对称光学系统，输入不含 OAM 的厄米-高斯 (Hermite-Gauss, HG) 光束，通过两个柱面透镜构成的模式转换器，就可以将其转化为拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gauss, LG) 光束，如图 1.4 所示。该方法最早是 Allen 等在 1993 年提出的。同理，将 LG 光束转换成 HG 光束也是成立的<sup>[25]</sup>。从 HG 光束到 LG 光束的转换，只需要在 HG 光束基础上引入一个随方位角变化的相位因子  $\exp(i l \theta)$ ，就可以将 HG 光束变成具有轨道角动量的涡旋光束<sup>[26]</sup>。



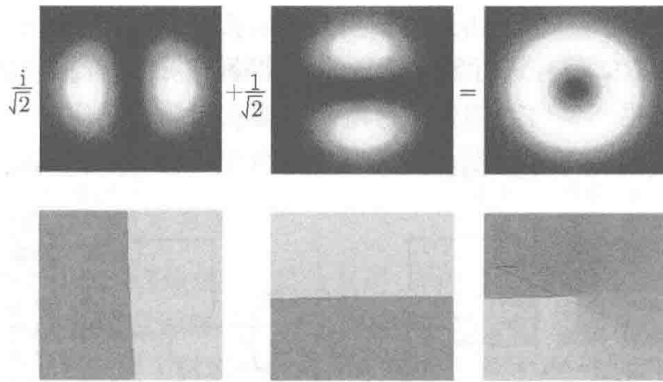


图 1.4 HG( $HG_{01}$  和  $HG_{10}$ ) 光束与  $LG_{01}$  光束的模式转换<sup>[26]</sup>

利用模式转换法的转换效率高，但是转换过程中的光学系统结构相对比较复杂，系统中用到的关键光学器件加工制备比较困难，而且也不易控制所产生的涡旋光束种类和参数，这使得其应用场合受到了限制。

### 3) 螺旋相位板法

螺旋相位板<sup>[27]</sup>是一种厚度与相对于板中心的旋转方位角成一次函数关系的透明板，表面结构类似于一个旋转台。当光束通过螺旋相位板时，相位板的螺旋形表面使透射光束光程的改变量不同，透射光束相位的改变量也不同，继而能够产生一个具有螺旋特征的相位因子。

螺旋相位板法产生涡旋光束的转换效率较高，但该方法产生的光学涡旋的拓扑荷数并不唯一，而且对于某一相位板，使用特定模式的激光只能是特定的输出，不能灵活控制涡旋光束的种类和具体参数，而且高质量的相位板制备也比较困难。

### 4) 计算全息法

计算全息法是依据光的干涉和衍射原理，利用计算机编程实现目标光与参考光的干涉图样，得到涡旋光束。利用计算全息法产生涡旋光束是一种快速灵活、应用范围广泛的方法。该方法主要可以利用计算全息图和空间光调制器来实现。计算全息图是将叉形光栅制成底片，直接让高斯平面波通过此叉形光栅即可。1991年，由 Heckenberg 等提出采用计算机生成全息图 (computer generating hologram, CGH) 的方法生成需要的衍射光栅图样，实现涡旋光束的生成<sup>[28]</sup>。空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 法是将叉形光栅加载到 SLM 上，让高斯平面波直接入射到 SLM 上即可。薄斌等<sup>[29]</sup>利用反射式 SLM 产生某种光束，并将产生的光束与平面光等进行干涉实验研究，结果验证了产生的是拓扑荷数存在差异的涡旋光束，并且涡旋光束产生的能量转换效率较高。

利用 SLM 法只需通过计算机控制显示在 SLM 上的全息图，就能够控制产生光学涡旋的位置、大小以及拓扑荷数，还能够动态实时地调整光学涡旋位置。