

走进连续变量量子通信的世界

曹正文 陈欣蕾 柴 庚

(西北大学电子信息学院 710127)

一、引言：从“数字”到“模拟”的量子通信革命

如果说量子世界是一幕奇妙的交响乐，那么离散变量量子技术如同清脆的钢琴独奏，而连续变量量子技术则如同恢宏的管弦乐合奏。当我们谈论“量子”时，脑海里最先蹦出的往往是“0”和“1”的量子比特(qubit)，这种基于单个光子、原子等物理体系的离散变量范式，如同通信世界中的“摩尔斯电码”，信息被编码在分立的、可数的状态上，它优势明显，但同时也面临挑战：制备单个量子态困难、与现有光通信网络的融合难等。而连续变量量子通信则选择了一条截然不同的道路，它不再纠结于“计数”单个光子，而是转而“聆听”光波本身那连续变化的属性——即光的正则位置和正则动量。连续变量光的属性可以在一个连续区间内变化，它利用激光器作为光源，通过测量光场连续变化的物理量来编码和传递信息，这种光场的“连续属性”不仅让系统更简洁、成本更低，更重要的是，它与已遍布全球的经典光通信网络有着天然的亲和力，这为量子技术从实验室走向千家万户铺平了道路。

二、光场的秘密：正则位置和正则动量的双重世界

想象一束完美的激光，它并非死气沉沉，而是充满了生机勃勃的“量子涨落”，可以将这束光用一个在复平面上旋转的矢量来描述，如图1所示，矢量的长度代表光的振幅，旋转的角度代表光的相位。

在经典世界里，光被视为一种电磁波，具有振幅和相位，但在量子光学中，是用算符来描述光。根据经典电磁理论，光场的复振幅可分解为实部与虚部，分别对应其“位置”分量与“动量”分量，当光场进行量子化后，其电磁场强度可写成湮灭算符(\hat{a})和产生算符(\hat{a}^\dagger)的形式，这两个算符间不对易。光场态的正则位置算符(\hat{X}_A)与正则动量算符(\hat{P}_A)可用这两个算符表示：

$$\begin{aligned}\hat{X}_A &= \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} (\hat{a} + \hat{a}^\dagger) \\ \hat{P}_A &= -i \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2}} (\hat{a} - \hat{a}^\dagger)\end{aligned}\quad (1)$$

位置分量与动量分量既能用于信息编码，又受到著名的海森堡不确定性原理制约^[1]，对位置测量越精确，对动量的了解就越不准确，反之亦然，这看似是一种限制，却赋予连续变量量子通信一项独特优势——基于量子特性的天然“防窃听”能力。因此，即使是最理想的相干态激光，其测量结果也会围绕一个平均值随机涨落，形成一个以平均值为中心的“模糊云团”，如图1所示，这个云团的涨落就是量子噪声，它是量子世界赋予光的天然“指纹”，是无法被消除的物理极限，且这个云团在X轴(正则位

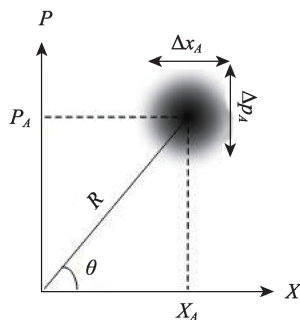


图1 光场的相空间表示

置)和 P 轴(正则动量)方向的宽度(不确定度)满足一个奇妙的关系: $\Delta x_A \Delta p_A \geq \hbar/2$,其中 \hbar 是约化普朗克常量^[1]。

三、相空间中的量子态: 高斯世界探秘

在量子光学与量子信息科学中,相空间提供了一种极为直观的工具,能够以近乎经典的方式可视化量子态。其中,高斯态构成了最重要的一类量子态,因其在相空间中的概率呈高斯分布而得名,高斯态不仅在实验上易制备和操控,更是连续变量量子通信的基石。

通常可以将光场的状态用一个二维相图表示:横轴为正则位置 X ,纵轴为正则动量 P ,如图1所示。一个量子态在此空间中的完整特征分布由其Wigner函数描述,它类似于一个联合概率分布。对于高斯态,其Wigner函数总是一个高斯分布,这意味着它们完全由平均值和协方差矩阵所刻画,所以量子通信协议的设计大多采用高斯态,下面介绍量子通信系统中涉及的几种高斯态,如图2所示。

真空态(Vacuum state):它是最基础的量子态。其在相空间中表现为一个位于原点($X_A=0, P_A=0$)的完美的圆形高斯云团,通常以 $|0\rangle$ 表示。这个云团的半径(不确定性)由海森堡不确定性原理规定,是任何测量所能达到的最小噪声极限,它代表了绝对的量子真空涨落。

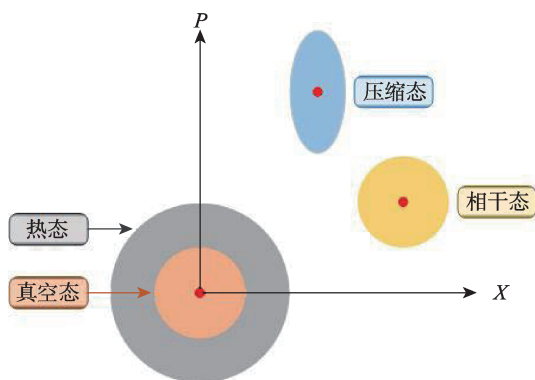


图2 相空间中的量子态

相干态(Coherent State):它可看作是一个“位移了的真空态”。它将真空态的整个高斯云团从原点平移到相空间中的另一个点(X_A, P_A),这个平移的距离和方向代表了光的振幅与相位。激光脉冲所产生的态极近似于相干态。

热态(Thermal state):它在相空间中同样表现为一个以原点为中心的高斯云团,但其半径(噪声)要比真空态大,平均光子数越多,这个云团就扩散得越大。一个有趣的事实是:当一组相干态的中心在相空间中随机分布满足二维高斯分布时,其整体效应就等价于一个热态。此外,当热态的平均光子数为0时退化为真空态。

压缩态(Squeezed state):通过特殊的光学器件(如光学参量振荡器)有选择地减小光在某个方向上的量子噪声,比如让位置的涨落变得更小,那么这种光就被称为压缩态光。它通过“压缩”不确定性云团,使其在某一方向(如 X)上变窄,同时为了遵守不确定性原理,在正交方向(如 P)上必然变宽。更进一步,如果能制备两束压缩态光,并将它们以特定方式混合,就能产生一对具有量子纠缠态的双模压缩态光(Two-mode squeezed state),两个模态的 X 和 P 测量结果可能高度关联或反关联,虽然其整体描述仍是高斯的,但这种关联使得对其中一个子系统的测量结果会瞬间决定另一个子系统的状态,无论它们相距多远。

高斯态以其数学上的简洁性和实验上的可行性构成了我们理解并应用量子世界连续变量的核心框架。从代表量子噪声基线的真空态,到描述经典光场的相干态,再到作为量子技术资源的压缩态和纠缠态,它们共同描绘了一幅丰富而有序的相空间量子图景。

四、高斯调制: 让信息藏在光里

在连续变量量子通信中,目前应用最广泛的一种信息调制手段是高斯调制(Gaussian Modulated, GM)^[2]。可以设想这样一个场景: Alice(发送方)希

望安全地传输信息给 Bob(接收方),与传统的数字调制方式不同,她并不直接发送代表“0”或“1”的固定光强或相位信号,而是对光场的两个正则分量——正则位置(X)与正则动量(P)分别进行连续的高斯随机调制。以相干态为例,Alice 首先制备初始相干态,随后引入两个相互独立且均服从高斯分布的随机数,将它们分别加载到该相干态的正则位置 X 和正则动量 P 上。这样一来,Alice 每次向 Bob 发送的光脉冲,其正则位置 X 和正则动量 P 的取值都是从一个高斯分布中随机抽取的样本,从而形成了一个在相空间中随机分布、但统计规律明确的相干态集合。最终,这些高斯调制的相干态的集合在相空间中表现为热态^[2],如图 3 所示。当这些光子经由量子信道传输时,不可避免地会受到信道损耗和噪声的影响,导致其高斯统计特性发生改变。Bob 在接收端通过高精度的零差探测或外差探测技术,对光场的正则位置 X 与正则动量 P 进行测量,并通过参数估计与后数据处理,从统计上重构出 Alice 所发送的原始信号。

该方案的安全性建立在以下基础上:任何窃听者(Eve)若要截获并测量这些量子态,都不可避免地会引入额外的扰动,从而破坏原始信号高斯分布统计特性。因此,Alice 和 Bob 只需通过对部分数据进行抽样检验,分析其统计偏差,就能够有效检测到是否存在潜在窃听行为,以确保通信的保密性。

五、零差探测:如何“听懂光的细语”

接下来介绍 Bob 端。他需要测出光场的正则位置 X 或正则动量 P ,这就要用到测量技术,离散变量量子信息处理主要依靠单光子探测器。连续变量与之不同,由于连续的信息是加载在正则分量上的,因此需要探测得到的也应该是连续的值。在连续高斯变量量子系统中,高斯测量由服从高斯分布的连续输入态以及相应的概率密度来描述,实际应用中的高斯测量可以采用零差探测(Homodyne detection)或外差探测(Heterodyne detection)完成。

零差探测的工作原理是:Bob 让接收到的信号光与一束强度已知的“本地振荡光”通过一个 50:50 的分束器进行干涉,之后两路输出光经过光电二极管去完成光电转换,在减法器的作用下得到输出电流差,如图 4(a)所示。通过相位调制器调节干涉相位,可以实现正则位置 X 或正则动量 P 的测量。

因为零差探测根据量子信号和本振光的相位差只能测量量子信号的正则分量中的一个分量,这种测量方式不适用于完成同时测量量子信号的两个正则分量的情况。为此,C. Weedbrook 等人提出了如图 4(b)所示的通过两个零差探测实现同时测量正则位置 X 和正则动量 P 的外差探测(Heterodyne detection)。

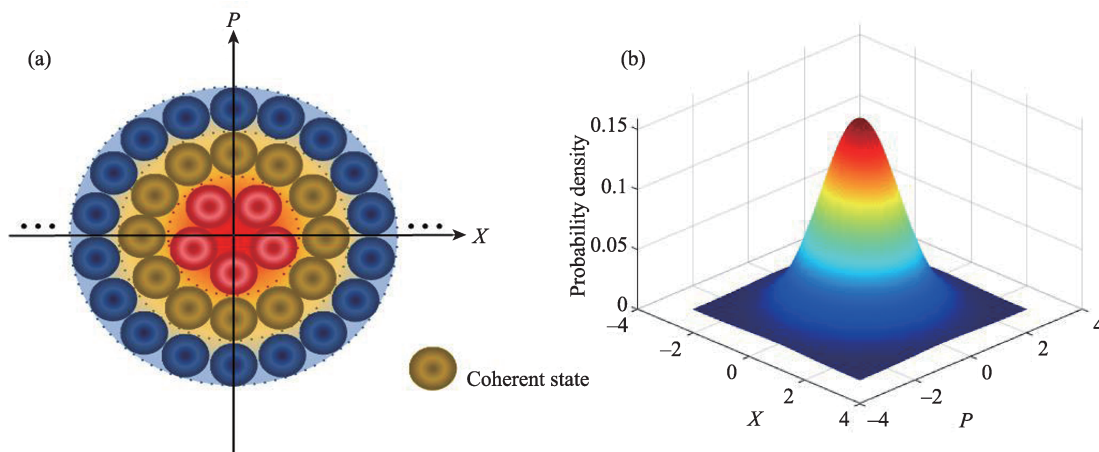


图3 分布在相空间上的高斯调制相干态

(a) 相空间中高斯调制相干态的集合为热态; (b) 高斯调制相干态集合的概率分布

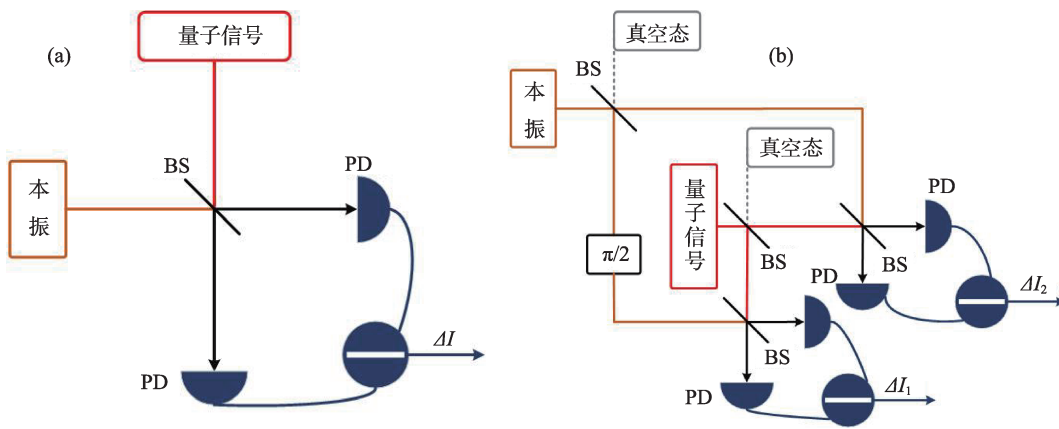


图4 连续变量量子系统中的零差探测与外差探测
(a) 零差探测; (b) 外差探测

六、关键技术与应用：从理论到实践

在连续变量量子通信的蓝图中,光不仅是信息的载体,也是安全的守护者。基于前述核心原理,研究者们将理论一步步转化为现实系统,孕育出三类极具代表性的应用方向:连续变量量子密钥分发、连续变量量子安全直接通信以及连续变量量子隐形传态。它们共同构成了从安全加密到量子网络互联的技术谱系,展示了连续变量量子体系的巨大潜能。

1. 连续变量量子密钥分发:用连续变量构筑量子密钥

连续变量量子密钥分发(Continuous variable quantum key distribution, CVQKD)是连续变量量子通信技术体系中最具代表性且最接近实用化的应用方向。与基于单光子探测的离散变量 QKD 相比,CVQKD 虽然概念提出相对较晚,其理论雏形直至 1999 年才由 T.C. Ralph 等人首次系统建立^[3],但因其的实现结构和成本控制方面的显著优势,逐渐发展成为量子密码领域的重要分支。

在 CVQKD 系统中,可用于编码的量子信源包括相干态、压缩态、热态以及连续变量纠缠态等多种形式。从实际工程角度,压缩态和纠缠态的制备都较为困难,并且光源部分体积较大,不利于系统

化集成,因此现有绝大多数系统选择采用相干态激光光源,其制备简单、易于调制,且与经典光通信设备高度兼容。在接收端通常采用平衡零差探测,直接测量光场的正则分量。在 CVQKD 中的高斯调制相干态(Gaussian modulated coherent state, GMCS)协议由 F. Grosshans 和 P. Grangier 于 2002 年提出,是兼顾理论安全性与实用化的核心方案,被称为 GG02 协议^[4]。其量子密钥分发过程如下所述:

- Alice 首先制备一个初始相干态,随后将两个均值为 0、方差为 V_A 且相互独立的高斯随机数,分别加载到该相干态的正则位置 X 和正则动量 P 上,从而生成一个高斯调制相干态 $|X_A + iP_A\rangle$ 。

- Alice 将她制备的携带调制信息的相干态通过量子信道(光纤或者自由空间)发送给接收方 Bob。量子信道通常用透射率和信道过噪声表征。

- Bob 接收到量子态后,将根据一组二进制随机数,选择性地对其中一个正则分量(正则位置 X 或正则动量 P)进行零差探测,从而获得 X_B 或 P_B 的测量结果;或采用外差探测方案,同时测量两个正则分量,获得 X_B 和 P_B 结果。

- Bob 完成测量后,通过经典公开信道告知 Alice 其所选择的测量基。Alice 据此将保留与 Bob 测量基一致的正则分量数据,并舍弃不一致的数据。随后,双方以匹配的测量结果为基础,执行信息协商、纠错与保密增强等后处理步骤,最终生成

双方完全相同一组安全密钥。

该方案采用相干态光源并对光场的正则分量进行高斯调制,其系统架构易于实现且与现有光通信设施兼容,已成为当前 CVQKD 实验研究中应用最广泛的协议。

经过二十余年的持续探索与技术迭代, CVQKD 取得了长足发展。随着点对点 CVQKD 系统的日益成熟,研究重点逐渐扩展至点对多点的保密通信组网方面^[5]。近年来国内外多个团队陆续开展了城域 CVQKD 网络的外场实验,具体如表 1 所示。这些实践成果表明, CVQKD 技术正逐步从科研验证迈向工程化与产业化应用的新阶段。

与此同时,新一代信息技术也在不断发展:高速数字信号处理芯片可提升信号重构效率^[10];集成光子芯片技术则可小型化系统^[11],等等。这些技术的发展共同推动着 CVQKD 向着“可部署、可扩展、可商用”的目标稳步前进,有望成为城域量子通信网络的核心组成部分。

2. 连续变量量子安全直接通信:让消息直接“穿越量子隧道”

量子安全直接通信(Quantum secure direct communication, CVQSDC)是一种以量子态作为信息载体实现安全传输的通信方式。其核心在于直接用量子态编码秘密信息,能够在噪声和窃听信道中实现可靠通信^[12]。如果说 CVQKD 是“先造锁再传信”,那么 CVQSDC 就是“信件本身就是锁”, CVQSDC 中信息不再经历加密和解密经典过程,而是以连续

变量的形式嵌入光场的正则位置与正则动量中,随着量子态一起穿越信道到达接收端。由于 CVQSDC 直接传输消息,一旦噪声、损耗或探测误差积累过大,就会导致信息不可恢复。因此,系统的噪声抑制、误差校正和信息重构等非常关键^[13]。

早在 2008 年,意大利物理学家 Pirandola 等人就提出了第一个 CVQSDC 协议。简单来说,就是让光的量子态在一个“相空间晶格”中有序地排列,并用这些点来代表要传输的消息^[14]。通信双方可以在不预先生成密钥的情况下直接传递信息,这就像是光本身成了信使,既传递内容,又确保安全。这些早期的研究为 CVQSDC 的发展奠定了基础。

在单模压缩态 CVQSDC 方案中,通过光开关将传输的量子态划分为“控制模式”和“消息模式”两部分,只有当控制模式确认信道安全后,消息才被真正发送^[15],这种机制类似“量子门禁系统”,能有效防止窃听。在双模纠缠态 CVQSDC 方案中,利用高斯映射技术,可解决消息在量子态调制过程中出现的统计偏移问题,使通信更加稳定可靠^[12]。为了提高信息容量,提出了基于轨道角动量复用的 CVQSDC 方案,让光的“旋转维度”也参与信息承载^[16],该方案同时考虑了自由空间信道下的噪声干扰问题,为后续大气信道下的系统构建提供了理论基础。为了减轻系统对高速随机数的需求量,研究者还提出了离散调制方案,以提升通信效率与距离性能^[17]。除了在物理层和调制技术上不断创新,在编码与纠错层面同样涌现了提升 CVQSDC 性能的关键方案。例如,近期的一种基于 GKP 码与量子低

表 1 近年城域 CVQKD 系统外场实验进展

网络名称/地点	协议	网络结构 (节点数)	安全码率	时间
中国青岛 ^[6]	GG02	Mesh 城域网 (3 节点)	12.4 kbps 70.0 km	2019
西班牙马德里 ^[7]	No-switching	环形城域网 (3 节点)	20.0 kbps 26.4 km	2019
西班牙马德里 ^[8]	No-switching	Mesh 城域网 (7 节点)	0.09 kbps 20.5 km	2023
美国橡树岭 国家实验室 ^[9]	No-switching	城域网点对点 (2 节点)	1.6 kbps 10 km	2024

密度奇偶校验码的级联纠错方案,构建了高可靠性的量子安全直接通信协议,并通过窃听信道理论分析证实其能实现高保密容量^[18]。

如今 CVQSDC 正在走向实验验证阶段,这些实验方案将光场量子态的正则分量作为消息的载体,能够在单次传输中提供更高的通信效率。西北大学曹正文课题组在 5 公里光纤信道中成功演示了基于纠缠态的 CVQSDC 实验,实现了每秒约 4.08×10^5 bps 的通信速率^[19]。利用光的轨道角动量进一步提升速率,在 10 公里光纤中达到了 6.319×10^6 bps 的传输水平^[20]。这些实验虽然仍属于“桌面级演示”,但证明了 CVQSDC 有望成为未来量子网络中的高速、安全通信的重要组成部分。

3. 连续变量量子隐形传态:让信息实现“量子瞬移”

量子隐形传态(Quantum teleportation, QT)像科幻中的瞬移技术,在量子通信领域,它能够在不直接传递量子比特载体的情况下,将未知量子态从发送端“瞬间”传送到接收端,而传输过程本身并不违反相对论中“光速不可超越”原则。隐形传态的奇妙之处在于,它将量子纠缠与经典通信相结合,实现了量子信息的“异地重建”。

在理论方面,Vaidman 等人在 1994 年将量子隐形传态推广到连续变量量子系统中,开创了连续变量量子隐形传态(Continuous variable quantum teleportation, CVQT)研究的先河^[21]。1998 年, Braunstein 和 Kimble 提出将信息编码在相干态上,以双模压缩真空场进行量子态传送的 CVQT 协议,称为 BK 协议^[22],该协议使用了 Wigner 函数的形式来描述输入的未知量子态,使得输入的量子态可以是任意量子态。

连续变量量子隐形传态 CVQT 的实现主要包括连续变量量子纠缠态制备、纠缠分发、联合测量、经典信息传输和量子变换几个过程。

● 纠缠制备:系统制备用作量子纠缠信道的纠缠源,一般为连续变量的 EPR 纠缠对态。

● 纠缠分发:系统将 EPR 态的两个模分别分配至 Alice 和 Bob 通信双方,建立量子隐形传态的纠缠信道。

● 联合测量:发送方 Alice 将待传送的未知量子态与一个纠缠模进行联合测量,得到测量量子态的经典信息,并使另一个纠缠模与待传送量子态发生关联。

● 经典信息传输:Alice 将测量得到的经典信息通过经典信道传输至接收方 Bob,供 Bob 选择合适的变换操作重现未知量子态。

● 量子变换:Bob 根据 Alice 传输的经典信息,对手中的纠缠模进行相应的幺正变换,使得纠缠模与待传送的量子态一致。

实验方面,1998 年日本东京大学的 Furusawa 小组率先实现了基于压缩态的 CVQT 实验,将一个未知的量子态从发送端成功传送到接收端,传输保真度超过了经典极限^[23],这一成果被认为是量子通信实验的重要里程碑,也标志着量子隐形传态从理论走向了现实。此后,研究者们不断改进 CVQT 系统的性能,在保真度提升方面,2021 年山西大学郑耀辉课题组在压缩态光场的基础上,通过平衡损耗和相位波动,实现了保真度达到 0.905^[24]。除了相干态,相关学者也研究了压缩态、纠缠态和薛定谔猫态等非高斯态的量子态 CVQT^[25]。CVQT 应用于量子网络互联,可在量子节点之间实现态的传送,用于构建大规模量子互联网^[28]。随着光子学、精密测量和量子纠错技术的不断进步,CVQT 将不仅仅是实验室中的“量子魔术”,也将成为未来量子互联网的核心基础设施,让量子信息真正实现“无形传送”的梦想。

七、结语:光,正在学会“说话”

过去,光只是照亮世界的工具,今天,光可成为传递秘密的信使。连续变量量子通信,就像赋予了光一种新的语言,正以其与经典通信技术的天然亲和性、高通信容量和强大的实用性,开辟出一条通

往未来量子信息时代的康庄大道。可见,量子技术的未来不必总是拘泥于“计数”一个个光子,也可以优雅地“聆听”并“驾驭”那看似嘈杂的量子涨落,它隐藏着下一代信息安全密码,并将服务于未来量子网络。

基金项目:国家自然科学基金(62571432, 62071381)

参考文献

- [1] Busch P, Heinson T, Lahti P. Heisenberg's uncertainty principle[J]. *Physics reports*, 2007, 452(6): 155-176.
- [2] Pan Z, Djordjevic I B. An overview of geometrical optics restricted quantum key distribution[J]. *Entropy*, 2021, 23(8): 1003.
- [3] Ralph T C. Continuous variable quantum cryptography[J]. *Physical Review A*, 1999, 61(1): 010303.
- [4] Grosshans F, Grangier P. Continuous variable quantum cryptography using coherent states[J]. *Physical review letters*, 2002, 88(5): 057902.
- [5] Moreolo M S, Iqbal M, Villegas A, et al. Continuous-variable quantum key distribution for enabling sustainable secure 6G networks [C]//2024 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM). IEEE, 2024: 1-3
- [6] Zhang Y, Chen Z, Chu B, et al. Continuous-variable qkd network in qingdao[J]. *Bulletin of the American Physical Society*, 2020, 65.
- [7] Aguado A, Lopez V, Lopez D, et al. The engineering of software-defined quantum key distribution networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(7): 20-26.
- [8] Brunner H H, Fung C H F, Peev M, et al. Demonstration of a switched CV-QKD network[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2023, 10(1): 38.
- [9] Williams B P, Qi B, Alshowkan M, et al. Field test of continuous-variable quantum key distribution with a true local oscillator[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 21(1): 014056.
- [10] Chen Z, Wang X, Yu S, et al. Continuous-mode quantum key distribution with digital signal processing[J]. *NPJ Quantum Information*, 2023, 9(1): 28.
- [11] Chai G, Yuan Y, Cao Z, et al. FPGA-based microsystematic design of Gaussian modulation for continuous-variable quantum communication[J]. *Physical Review Applied*, 2023, 20(5): 054037.
- [12] Pan D, Song X T, Long G L. Free-space quantum secure direct communication: Basics, progress, and outlook[J]. *Advanced Devices & Instrumentation*, 2023, 4: 0004.
- [13] Cao Z, Wang L, Liang K, et al. Continuous-variable quantum secure direct communication based on Gaussian mapping[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16(2): 024012.
- [14] Pirandola S, Braunstein S L, Mancini S, et al. Quantum direct communication with continuous variables[J]. *Europhysics Letters*, 2008, 84(2): 548-551.
- [15] Srikara S, Thapliyal K, Pathak A. Continuous variable direct secure quantum communication using Gaussian states[J]. *Quantum Information Processing*, 2020, 19(4): 132.
- [16] Cao Z, Liang Z, Zhang Y, et al. Atmospheric continuous-variable quantum secure direct communication with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2024, 41(10): 2328-2339.
- [17] Cao Z W, Zhang Y J, Chai G, et al. Continuous-variable quantum secure direct communication based on N-APSK with Boltzmann-Maxwell distribution[J]. *Chinese Physics B*, 2025, 34(3): 030303.
- [18] Wang Lei, Chai Geng, Cao Zheng-Wen, et al. Highly reliable quantum secure direct communication based on concatenated GKP-QLDPC codes[J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2025, 2025-09-26.
- [19] Cao Z, Lu Y, Chai G, et al. Realization of quantum secure direct communication with continuous variable[J]. *Research*, 2023, 6: 0193.
- [20] Cao Z, Wang Y, Chai G, et al. Mask-coding-assisted continuous-variable quantum direct communication with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Chinese Physics B*, 2025, 34(2): 020308.
- [21] Vaidman L. Teleportation of quantum states[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(2): 1473.
- [22] Braunstein S L, Kimble H J. Teleportation of continuous quantum variables[J]. *Physical review letters*, 1998, 80(4): 869.
- [23] Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L, et al. Unconditional quantum teleportation[J]. *science*, 1998, 282(5389): 706-709.
- [24] Wang Q, Tian Y, Li W, et al. High-fidelity quantum teleportation toward cubic phase gates beyond the no-cloning limit[J]. *Physical Review A*, 2021, 103(6): 062421.
- [25] Yonezawa H, Braunstein S L, Furusawa A. Experimental demonstration of quantum teleportation of broadband squeezing[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(11): 110503.
- [26] Jia X, Su X, Pan Q, et al. Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(25): 250503.
- [27] Lee N, Benichi H, Takeno Y, et al. Teleportation of nonclassical wave packets of light[J]. *Science*, 2011, 332(6027): 330-333.
- [28] Shi S, Wang Y, Tian L, et al. Continuous variable quantum teleportation network[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(2): 2200508.