

研究论文

城域高速多载波连续变量量子密钥分发系统

王恒¹, 盘艳¹, 叶挺¹, 邵云¹, 马荔¹, 吴明泽², 皮晓迪¹, 孙奥¹, 李扬¹, 黄伟¹, 张一辰², 徐兵杰^{1*}

摘要 连续变量量子密钥分发(continuous variable quantum key distribution, CV-QKD)技术因兼具与传统光通信兼容性好和城域范围内码率高等优势被广泛研究,但其安全码率仍不足以支撑城域“一次一密”实际应用需求。本研究将正交频分复用技术融合于 CV-QKD 技术,首次实验展示了 10 GHz 重复频率的多载波 CV-QKD 系统,并通过设计高精度的双级相位噪声补偿算法、建立过噪声理论模型和设计高吞吐量的数据后处理方案,在 5、10、25、50、75 km 光纤信道的安全码率分别可达 1819.32、1078.48、374.19、112.96、34.63 Mbps,首次实现 10 km 城域距离内 Gbps 量级和 50 km 城域距离内 100 Mbps 量级的安全码率。最后,与同等实验条件下 10 GHz 重复频率的单载波 CV-QKD 系统安全码率相比,不同传输距离下多载波系统安全码率增益分别可达 1.09@5 km、1.10@10 km、1.13@25 km、1.54@50 km 和 5.55@75 km,表明多载波 CV-QKD 系统方案能够显著提升量子密钥分发性能,可为未来宽带、长距离量子保密通信提供有效解决方案。

关键词 连续变量量子密钥分发;正交频分复用;多载波技术;安全码率;过噪声

近 20 年来,量子信息技术的迅猛发展极有可能在密码攻防领域引发革命性变革,尤其是实用化通用量子计算机的突破,将对传统密码体系构成严重威胁,促使全球范围内加速研发量子保密通信技术以应对这一挑战。在这一背景下,量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)作为目前最成熟且应用最广泛的量子通信技术,凭借其基于量子物理基本原理的信息论安全性,结合“一次一密”加密技术,成为保障“后量子”时代信息安全的核心手段之一^[1-3]。经过 40 余年发展, QKD 技术已从基础研究逐步走向实际应用,

并形成了离散变量(discrete variable, DV)和连续变量(continuous variable, CV)2 大技术体系。其中, CV-QKD 通过将量子密钥信息编码在光场正则分量上,并利用零/外差相干探测技术解码信息,具有与经典相干光通信系统兼容、中短距离密钥速率高、器件成熟、易集成化等显著优势^[4-6]。这些特点使其在量子城域/接入网等高速应用场景中展现出广阔的应用前景,成为推动量子保密通信技术实用化的重要方向。

目前主流的 CV-QKD 系统主要依靠单个光载波进行量子密钥分发,为此提升 CV-QKD 系统安全码率和传输距离的主要技术途径是提升系统重复频率和抑制系统过噪声^[7-12]。但随着 CV-QKD 系统对安全传输性能需求的急剧增长,系统重复频率的提升和过噪声的抑制面临严峻的技术挑战。一方面,随着

1. 西南通信研究所保密通信全国重点实验室,成都 610041
2. 北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室,北京 100876

收稿日期:2025-04-28;修回日期:2025-12-03

基金项目:国家密码科学基金面上项目(2025NCSF02052, 2025NCSF02053);国家自然科学基金联合基金重点项目(U24B20135, U25B2014);国家自然科学基金面上项目(62471446);四川省自然科学基金面上项目(2024NSFSC0470, 2024NSFSC0454);保密通信全国重点实验室稳定支持基金项目(WD202503, WD202501, WD202502)

作者简介:王恒,正高级工程师,研究方向为量子保密通信技术,电子信箱:wanghg1991@163.com;徐兵杰(通信作者),研究员,研究方向为量子密码技术、量子保密通信技术,电子信箱:xbjku@163.com

引用格式:王恒,盘艳,叶挺,等.城域高速多载波连续变量量子密钥分发系统[J].科技导报,2026,44(11):87-95;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.04.00141

CV-QKD 系统重复频率的提升, 宽带量子态在光电调控时将引入大量的量子态制备、传输和探测噪声, 特别是宽带量子态在长距离传输时引入的累积色散噪声, 严重限制宽带 CV-QKD 系统的传输距离^[13-15]。另一方面, 宽带 CV-QKD 系统的量子态传输速率高且信噪比极低, 导致高速量子密钥的数字信号处理精度和数据后处理纠错效率、速率不足, 难以满足高速安全码率实时输出的需求^[16-19]。为解决上述问题, 国内外已逐步开展了多载波 CV-QKD 技术方案研究, 将高速单载波 QKD 系统转换为多路低速并行多载波 QKD 系统, 以增强光纤信道色散效应对抗能力和降低数据处理能力需求, 显著提升 CV-QKD 系统的传输距离和安全码率。当前, 多载波 CV-QKD 方案大多采用多套收发装置, 并利用波分复用技术实现多路高速量子密钥分发, 以成倍增加 CV-QKD 系统的安全传输性能^[20]。但该方案部署复杂、研制成本高, 难以满足高速量子保密通信系统实用化需求。

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术已广泛应用于相干光通信系统, 其采用一套收发装置即可实现多路正交频分复用光信号并行传输, 能够有效提升系统的频谱利用率且具有高鲁棒的光纤色散对抗能力^[21-22]。因此, 本研究将 OFDM 技术和 CV-QKD 技术相融合, 首次实验展示了 10 GHz 重复频率的多载波 CV-QKD 系统。具体为, 在传统单载波 CV-QKD 协议的基础上, 系统设计了基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 协议, 构建出多载波 CV-QKD 安全码率评估理论模型。同时, 实验展示了子载波数 $N=5$ 的多载波 CV-QKD 系统, 并通过设计出双级相位噪声补偿算法和理论分析多载波 CV-QKD 系统过噪声, 实现了一个超低过噪声的多载波 CV-QKD 系统。此外, 本研究采用基于多个图形处理器(graphics processing unit, GPU)的并行处理方法, 实现了吞吐量可达 1.6 Gbps 的数据后处理方案。最终, 提出的基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统在渐近条件下可实现 1819.32 Mbps@5 km、1078.48 Mbps@10 km、374.19 Mbps@25 km、112.96 Mbps@50 km 和 34.63 Mbps@75 km 的安全码率, 首次在城域范围内实现了 10 km 传输距离内 Gbps 量级和 50 km 传输距离内 100 Mbps 量级的安全码率。更为有趣的是, 相比于同等实验条件下 10 GHz 重复频率

单载波 CV-QKD 系统的安全码率, 不同传输距离下的多载波系统安全码率增益分别可达 1.09@5 km、1.10@10 km、1.13@25 km、1.54@50 km 和 5.55@75 km, 表明提出的多载波 CV-QKD 方案在无须增加额外硬件装置条件下最高能提升 4 倍的量子密钥分发速率。

1 多载波 CV-QKD 协议理论

本研究提出的多载波 CV-QKD 协议是在传统 CV-QKD 协议基础上, 通过深度融合 OFDM 技术, 在光频域上实现多路量子正交子载波的并行传输, 有效增强宽带量子态在长距离传输时的光纤色散对抗能力, 解决宽带 CV-QKD 系统安全传输性能提升受限的难题。所设计的多载波 CV-QKD 协议具体流程如下。

1) 多载波量子态制备: Alice 在数字域完成 N 组独立、多路量子随机数列任意离散/高斯调制分布映射和 OFDM 处理, 表示为

$$S(t) = \sum_{k=1}^N [I_k(t) + jQ_k(t) e^{i2\pi f_k t}] \quad (1)$$

式中, $I_k(t)$ 和 $Q_k(t)$ 为第 k 个子载波的 2 个正交分量, f_k 为相邻正交子载波的频率间隔, N 为子载波数, t 为时间。随后, 结合 IQ 调制将光载波调制为 N 路量子正交子载波, 最后将 N 路并行传输的量子正交子载波通过光纤信道发送给 Bob 端。

2) 多载波量子态测量: Bob 将接收到的 N 路量子正交子载波进行外差相干探测, 然后将探测结果进行 N 路量子正交子载波的多效应量子密钥数字解调, 得到测量结果 $\vec{y} = \{y_k | k = 1, 2, \dots, N\}$, y_k 为 Bob 端第 k 个子载波的测量结果。

3) 数据后处理: Bob 端将测量结果中的 N 路子载波的初始量子密钥分别进行参数估计、数据协商、译码纠错和私钥放大获得 N 路量子密钥。最终多载波 CV-QKD 系统在渐近条件下的安全码率可表示为

$$R = \frac{f_{\text{rep}}}{N} \left[\sum_{k=1}^N R(k) \right] \quad (2)$$

$$R(k) = (1 - a_k) (1 - FER_k) \beta_k I[A(k) : B(k)] - \chi[B(k) : E(k)] \quad (3)$$

式中, f_{rep} 为多载波 CV-QKD 系统重复频率, $R(k)$ 为

第 k 个子载波的安全码率, β_k 为第 k 个子载波的协商效率, a_k 和 FER_k 分别为第 k 个子载波的训练序列比例和误帧率。 $I[A(k):B(k)]$ 为第 k 个子载波 Alice 和 Bob 之间的香农互信息, 表示为^[23-24]

$$I[A(k):B(k)] = \frac{1}{2} \log_2 \frac{V(k) + \chi_{\text{tot}}(k)}{1 + \chi_{\text{tot}}(k)} \quad (4)$$

式中, $V(k) = V_A(k) + 1$, $V_A(k)$ 为第 k 个子载波的调制方差。 $\chi_{\text{tot}}(k)$ 表示第 k 个子载波的整体信道噪声, 可表示为 $\chi_{\text{tot}}(k) = \chi_{\text{line}}(k) + \chi_{\text{het}}(k)/T_k$, 而信道噪声 $\chi_{\text{line}}(k) = 1/T_k - 1 + \varepsilon_k$ 和探测端噪声 $\chi_{\text{het}}(k) = [(2 - \eta_k) + 2v_{\text{cl-}k}]/\eta_k$, 其中 T_k , ε_k , η_k 和 $v_{\text{cl-}k}$ 分别为第 k 个子载波的信道透射率、过噪声、探测效率和电噪声。 $\chi[B(k):E(k)]$ 为第 k 个子载波 Bob 和 Eve 之间的 Holevo 边界, 可表示为

$$\chi[B(k):E(k)] = \sum_{i=1}^2 G\left(\frac{\lambda_i(k) - 1}{2}\right) - \sum_{i=3}^5 G\left(\frac{\lambda_i(k) - 1}{2}\right) \quad (5)$$

式中, $G(x) = (x+1)\log_2(x+1) - x\log_2 x$ 。 辛特征值 $\lambda_i(k)$ 由第 k 个子载波的协方差矩阵推导计算为

$$\lambda_{1,2}(k) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[A(k) \pm \sqrt{A^2(k) - 4B(k)} \right]} \quad (6)$$

$$\lambda_{3,4}(k) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[C(k) \pm \sqrt{C^2(k) - 4D(k)} \right]} \quad (7)$$

$$\lambda_5(k) = 1 \quad (8)$$

式中,

$$A(k) = V^2(k)(1 - 2T_k) + 2T_k + T_k^2[V(k) + \chi_{\text{line}}(k)]^2 \quad (9)$$

$$B(k) = T_k^2[V(k)\chi_{\text{line}}(k) + 1]^2 \quad (10)$$

$$C(k) = \frac{1}{T_k^2[V(k) + \chi_{\text{tot}}(k)]^2} \left\{ \begin{aligned} &A(k)\chi_{\text{het}}^2(k) + B(k) + 1 \\ &+ 2\chi_{\text{het}}(k)\{V(k)\sqrt{B(k)}\} \\ &+ T_k[V(k) + \chi_{\text{line}}(k)] \\ &+ 2T_k[V^2(k) - 1] \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$D(k) = \frac{[V(k) + \sqrt{B(k)}\chi_{\text{het}}(k)]^2}{T_k^2[V(k) + \chi_{\text{tot}}(k)]^2} \quad (12)$$

2 实验过程

如图 1 所示, 实验展示了基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统。在 Alice 端, Alice 激光器输出频率为 f_A 的连续光载波由偏振分束器分为 2 路。一路光载波进入 IQ 调制器中进行调制, 其中 IQ 调制器上加载由任意波形发生器(arbitrary waveform generator, AWG)生成重复频率为 $f_{\text{rep}} = 10$ GHz 的 OFDM 量子密钥电信号(I_s 和 Q_s)。IQ 调制器输出的 OFDM 光信号由光衰减器衰减为所需的 OFDM 量子信号光 (N 路独立并行传输的量子正交子载波)。Alice 端产生 OFDM 量子密钥电信号的具体流程为: (1) 一组高速量子随机序列串并转换为 $N=5$ 路平行的低速量子随机序列, 接着每路低速量子随机序列进行高斯映射并插入比例 $a=1/5$ 的训练序列, 其中训练序列主要用于 Bob 端量子信号的相位补偿; (2) $N=5$ 路高斯映射的量子随机序列经逆快速傅里叶变换和并串变换形成所需的 OFDM 量子密钥数字信号; (3) 形成的

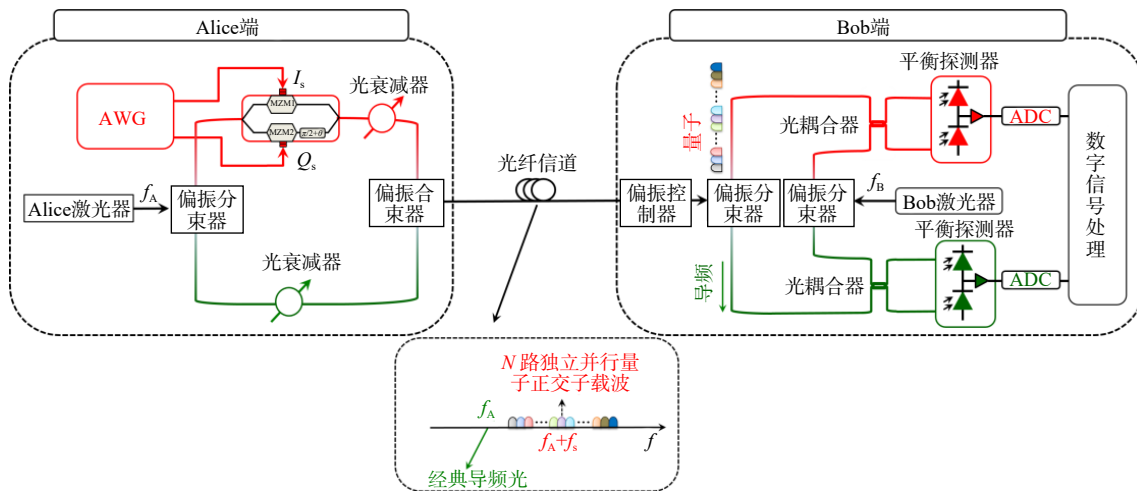


图 1 基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统示意

OFDM 量子密钥数字信号经滚降因子为 0.3 的根升余弦(root raised cosine, RRC)滤波并上采样为 30 GSa/s,接着为在 Bob 端实现中频探测,将上采样的 OFDM 量子密钥数字信号进行频率为 $f_s=8.5$ GHz 的移频处理;(4) 最后,提取 OFDM 量子密钥数字信号的实部和虚部分别由 AWG 的两路 DAC 转换为 IQ 调制器所需的 OFDM 量子密钥电信号(I_s 和 Q_s)。另一路光载波直接由光衰减器衰减为所需的经典导频光。最后,Alice 端形成的 OFDM 量子信号光和经典导频光以偏振和宽带频分复用方式进入光纤信道进行共纤传输。值得注意的是,在实验中将 OFDM 量子信号光和经典导频光之间频率间隔尽可能设置大些,不仅可以避免经典导频光的同频带光子泄露噪声串扰,而且可以避免强经典导频光引起的散射谱(如布里渊散射)影响^[12]。

到达 Bob 端的 OFDM 量子信号光和经典导频光由偏振控制器进行纠偏处理,并将正交偏振复用的 OFDM 量子信号光和经典导频光进行分离。同时,Bob 激光器输出频率为 f_b 的本振光由偏振分束器分为两路,并分别与同偏振的 OFDM 量子信号光和经典导频光在 2 个不同平衡探测器中进行相干探测,得到的一路频谱图如图 2 所示。

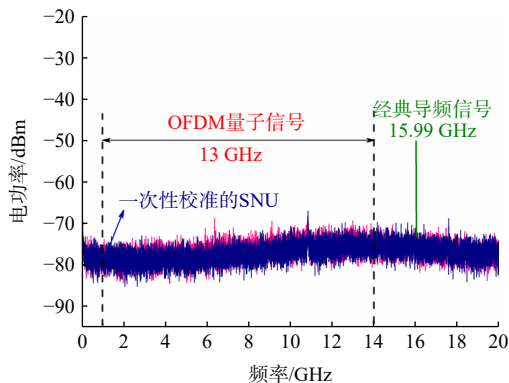


图2 在 50 km 传输距离下实验测得的 OFDM 量子信号和经典导频信号的频谱图

值得注意的是,2 个独立激光器输出光信号的频差 Δf_{AB} 设置在 16 GHz 左右。2 个平衡探测器输出的探测结果分别输入数字存储示波器(digital storage oscilloscope, DSO)的 2 个通道进行采集,DSO 的采样率设置为 40 GSa/s。实验中,Alice 端的 AWG 与 Bob 端的 DSO 由同一个 100 MHz 的时钟信号作为同步基准,从根本上消除了 Alice 和 Bob 两端采样时钟之间

的频率偏差,从而增强了相位跟踪能力,有效抑制了相位漂移,保障了 10 GHz CV-QKD 系统的稳定运行。将 DSO 采样的量子信号和导频信号进行数字信号处理,实现 OFDM 量子密钥信号的数字解调,具体的数字解调流程如下:(1) 通过峰值搜索算法搜索经典导频信号的频谱峰值,得到 2 个激光器的实时频差 $\Delta f_{AB}=15.99$ GHz,则在已知 $f_s=8.5$ GHz 下 OFDM 量子信号的中心频率 $\Delta f_{AB}-f_s$ 可以计算为 7.49 GHz;(2) 通过获得的中心频率 $\Delta f_{AB}-f_s$ 和 Δf_{AB} ,将 OFDM 量子信号和经典导频信号分别进行带通滤波、正交下变频和 RRC 匹配滤波分别获得 OFDM 量子信号的正交分量 I_q+jQ_q 和经典导频信号的正交分量 I_p+jQ_p ;(3) 设计了一种双级相位噪声补偿算法,首先利用经典导频信号的正交分量 I_p+jQ_p 中共享相位信息对 OFDM 量子信号的正交分量 I_q+jQ_q 进行快速相位补偿,主要消除 2 个独立激光器和光纤信道的快速变化相位,然后利用 OFDM 量子信号中内嵌入 1/5 比例的训练序列按一定的时间段对 OFDM 量子信号中的残余相位噪声进行精细补偿;(4) 经相位补偿的 OFDM 量子信号通过串并转换和快速傅里叶变换最终形成 5 路量子密钥序列。实验中,为实现每路 1.6 Gbps 速率的量子密钥后处理,采用 6 个 GPU 并行处理方法设计了吞吐量大于 1.6 Gbps 的数据后处理方案,且单个 GPU 最低可实现 279.2 Mbps 的密钥纠错速率。

3 结果与分析

为实现每个子载波最优安全成码率,本研究开展了不同传输距离下调制方差 V_A 、协调效率 β 和误帧率 FER 的全局优化^[25]。具体的优化过程如下:(1) 针对第 k 个子载波,首先估计出与调制方差 $V_A(k)$ 无关的信道透射率 T_k 、过噪声 e_k 和探测效率 η_k ;(2) 在调制方差为 0~10 SNU 的范围内,通过对应的信噪比 SNR_k 和纠错矩阵 H_k 计算出码率 CR_k ,然后利用公式 $CR_k/(0.5\log_2(1+SNR_k))$ 计算出 β_k 与 $V_A(k)$ 之间的关系式;(3) 在特定数据协调和纠错性能下,通过实验拟合数据获得第 k 个子载波分别在 5、10、25、50 和 75 km 传输距离下 FER_k 与 $V_A(k)$ 之间关系式;(4) 基于获得的 $\beta_k-V_A(k)$ 和 $FER_k-V_A(k)$ 2 个关系式,可以得到第 k 个子载波的安全码率 $R(k)$ 与调制方差 $V_A(k)$ 之间的

关系式, 如此可获得最优调制方差下的最大安全码率。依据上述全局优化方法, 获得 5 个子载波的最优

调制方差 V_A 、协调效率 β 和误帧率 FER 的全局优化结果, 并总结在表 1 中。

表 1 不同传输距离下 5 个子载波的调制方差 V_A 、协调效率 β 和误帧率 FER 全局优化结果

传输距离/ km	SC1			SC2			SC3			SC4			SC5		
	β_1	FER_1	$V_A(1)$	β_2	FER_2	$V_A(2)$	β_3	FER_3	$V_A(3)$	β_4	FER_4	$V_A(4)$	β_5	FER_5	$V_A(5)$
5	0.8389	0.0019	3.5	0.8389	0.0019	3.3	0.0025	0.8391	3.5	0.8392	0.0028	3.7	0.8391	0.0025	3.7
10	0.8396	0.0048	4.2	0.8396	0.0048	4.1	0.8399	0.0064	4.2	0.8399	0.0064	4.5	0.8399	0.0064	4.5
25	0.9054	0.0136	4.1	0.9054	0.0136	4.0	0.9061	0.0190	4.1	0.9062	0.0200	4.4	0.9063	0.0210	4.4
50	0.9296	0.0209	3.8	0.9299	0.0234	3.6	0.9301	0.0252	3.8	0.9311	0.0362	4.1	0.9305	0.0292	4.1
75	0.9219	0.0974	4.1	0.9200	0.0707	3.9	0.9224	0.1056	4.1	0.9226	0.1090	4.4	0.9227	0.1108	4.4

依据系统重复频率 $f_{rep}=10$ GHz, 表 1 中的最优调制方差、协调效率 β 和误帧率 FER , 探测效率 $\eta=0.45$ (5 个子载波探测效率实测近似相等), 在数据量为 1.3×10^7 下估计得到 5 个子载波在 5、10、25、50 和 75 km 传输距离下的过噪声值, 如图 3 所示, 验证了一个超低过噪声的多载波 CV-QKD 实验系统。值得注意的是, 本研究的散粒噪声单位 (shot noise unit, SNU) 采用一次性校准方法, 即散粒噪声和电噪声之和作为 SNU, 显著提升了系统稳定性^[26]。在本文的多载波 CV-QKD 系统实验中, 单个子载波的过噪声主要包括激光器强度噪声、DAC/ADC 量化噪声、调制噪声、光纤信道的光子泄漏噪声、探测噪声及相位噪声^[27]。其中, ADC 量化噪声和探测器噪声作为接收端可信器件噪声, 在安全码率评估时可作为可信噪声。激光器强度噪声主要由所采用的激光器性能决定, 本实验采用了相对强度噪声为 -135 dBc@10 MHz 的窄线宽激光器, 在调制方差为 4 SNU 情况下仅引入了 7.11×10^{-4} SNU 的过噪声。DAC 量化噪声主要由 DAC 的量化位数决定, 在调制方差为 4 SNU 情况下将引入 4.1×10^{-3} SNU 的过噪声。本研究中的光纤信道光子泄漏噪声非常小, 主要是由于采用了宽带频分与偏振复用技术, 在频域和偏振域将 OFDM 量子信号光与经典导频光进行有效隔离, 且通过设置 2 GHz 的宽带频率间隔有效地避免了经典导频光引起的散射谱对 OFDM 量子信号光的串扰。多载波 CV-QKD 系统的调制噪声在子载波数 $N=5$ 时的理论值为 4.3×10^{-3} SNU, 其不仅包括传统单载波 CV-QKD 系统中的 IQ 调制器的有限消光比噪声和 IQ 不平衡噪声, 而且包括额外引

入的各个子载波之间的交调噪声。多载波 CV-QKD 系统的相位噪声在子载波数 $N=5$ 时理论值为 3.6×10^{-3} SNU, 其主要包括光纤色散噪声、信道相位噪声、时变激光相位噪声, 以及额外的子载波间干扰噪声。除去已理论建模的过噪声, 多载波 CV-QKD 系统其他噪声可能来源于 IQ 调制器偏置漂移噪声、残余相位与偏振噪声等。

利用图 3 获得的 5 个子载波的过噪声, 并依据多载波 CV-QKD 系统安全协议理论估计得到 5 个子载波的安全码率, 概括在表 2 中。同时, 将不同传输距离下 5 个子载波的平均安全码率相加得到多载波 CV-QKD 系统的安全码率, 分别为 1819.32 Mbps@5 km、1078.48 Mbps@10 km、374.19 Mbps@25 km、112.96 Mbps@50 km 和 34.63 Mbps@75 km, 验证了本研究

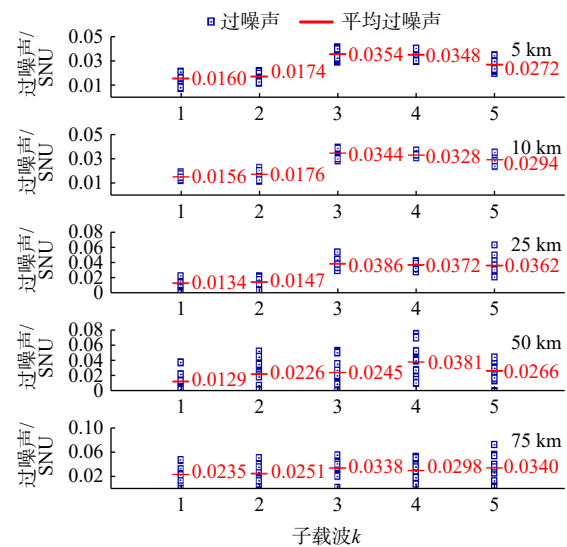


图 3 测量得到的不同传输距离下 5 个子载波的过噪声

表 2 不同传输距离下测量得到的渐近安全码率

传输距离/km	SC1 安全码率/Mbps	SC2 安全码率/Mbps	SC3 安全码率/Mbps	SC4 安全码率/Mbps	SC5 安全码率/Mbps	多载波系统 安全码率/Mbps
5	462.37	396.86	319.36	320.18	320.55	1819.32
10	272.51	246.16	190.38	186.63	182.80	1078.48
25	93.45	94.94	64.06	61.11	60.63	374.19
50	27.92	24.85	23.06	16.88	20.25	112.96
75	7.86	8.36	6.27	6.40	5.74	34.63

提出的基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统实现了 10 km 城域距离下 Gbps 量级和 50 km 城域距离下 100 Mbps 量级的安全码率。

4 讨论

基于 OFDM 技术实现 10 GHz 重复频率的高速多载波 CV-QKD 系统,并通过设计双级相位噪声补偿方案和高性能数据后处理方案,首次实现了 10 km 传输距离下 Gbps 量级和 50 km 传输距离下 100 Mbps 量级的安全码率。为进一步突出本研究提出的基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统优势,还开展了 10 GHz 重复频率的单载波 CV-QKD 系统实验验证。在多载

波 CV-QKD 系统相同的实验条件下,包括相同的实验装置、调制方差优化方案和相位噪声补偿方案等,10 GHz 重复频率的单载波 CV-QKD 系统在 1.3×10^7 数据量下过噪声和渐近安全码率评估值如图 4 所示,在 5、10、25、50 和 75 km 安全传输距离下平均安全码率分别为 1670.69、976.74、332.14、73.22 和 6.24 Mbps。因此,对比不同传输距离下多载波 CV-QKD 系统和单载波 CV-QKD 系统的安全码率,能够获得多载波系统安全码率增益值分别为 1.09@5 km、1.10@10 km、1.13@25 km、1.54@50 km 和 5.55@75 km,如图 5 所示,表明在相同实验条件下本研究提出的基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统能将安全码率提升 4 倍,且量子密钥分发的带宽越大和传输距离越长,多

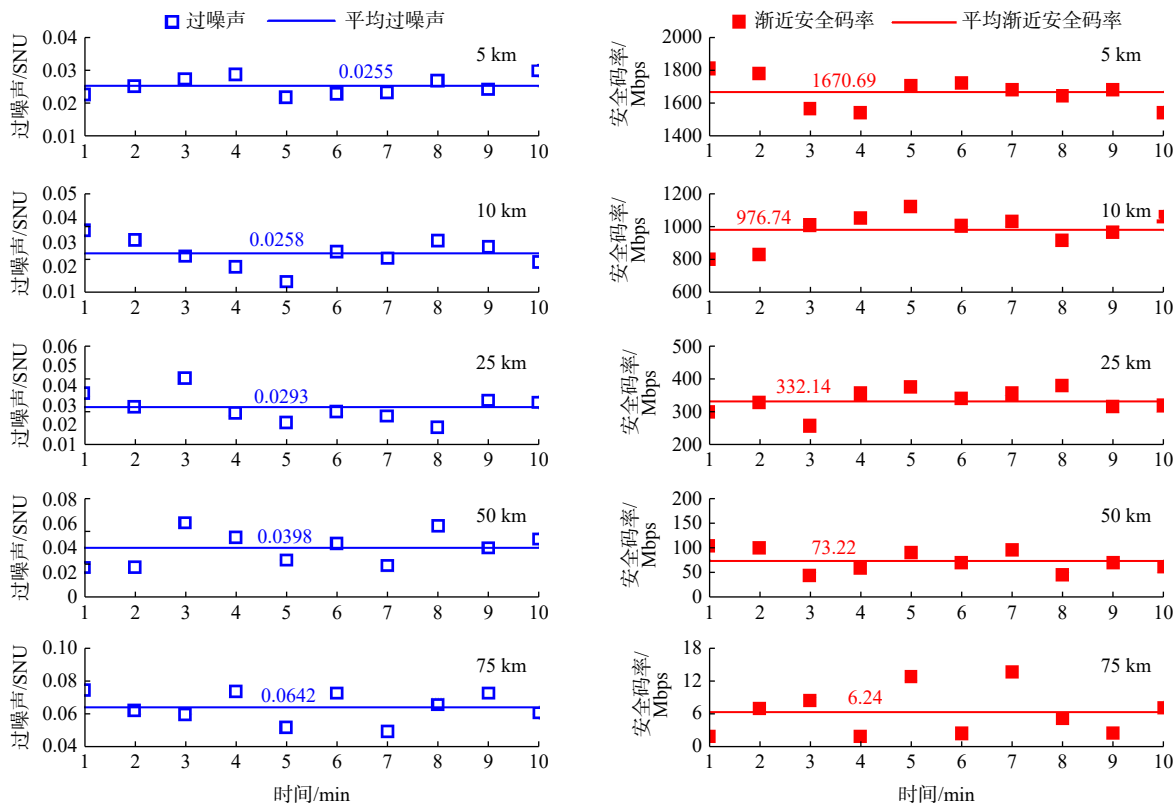


图 4 不同传输距离下单载波 CV-QKD 系统过噪声和安全码率的测量结果

载波 CV-QKD 系统的性能优势越明显。在 75 km 传输距离下,多载波系统的安全码率增益实验值低于理论值。这一现象揭示了系统在极低信噪比条件下的性能瓶颈:虽然多载波设计本身通过子信道并行传输,有效规避了单载波系统在长距离下难以克服的巨大色散噪声,从而降低了对总体相位噪声补偿能力的要求;然而,信噪比的严重恶化最终限制了本研究相位噪声补偿算法的效能,导致残余相位噪声增加,是安全码率增益下降的主要原因。

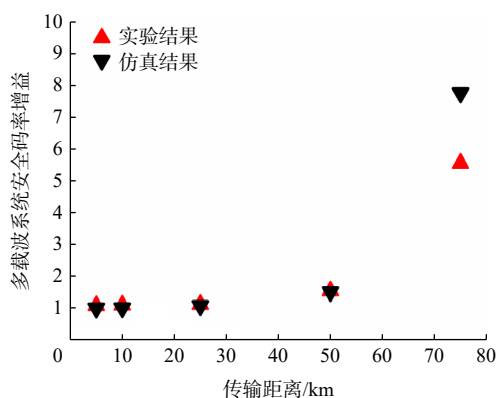


图5 不同传输距离下多载波系统安全码率增益

此外,提出的多载波 CV-QKD 系统还具备实时、随机调节每个子载波的重复频率和调制协议的能力,能够灵活满足不同传输信道和不同密钥分发用户需求,具有很好的可操作性、安全性和环境适应性。

5 结论

本研究将 OFDM 技术和 CV-QKD 技术结合,并实现了多载波 CV-QKD 协议设计及 10 GHz 重复频率的多载波 CV-QKD 系统实验验证。首先,在传统单载波 CV-QKD 协议的基础上,设计出基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 协议,建立了多载波 CV-QKD 系统安全码率评估理论模型。其次,开展了子载波数 $N=5$ 的多载波 CV-QKD 系统实验验证,通过设计高精度的双级相位噪声补偿方案,实现了一个超低过噪声的多载波 CV-QKD 系统,并理论建模分析了多载波 CV-QKD 系统激光器强度噪声、调制噪声、光纤信道光子泄露噪声、DAC/ADC 量化噪声、探测噪声及相位噪声,特别是多载波技术额外引入的子载波之间交调噪声和干扰噪声。再次,基于多 GPU 并行处

理方法,实现吞吐量大于 1.6 Gbps 的数据后处理方案,且单 GPU 最低可实现 279.2 Mbps 的密钥纠错速率,为实现 Gbps 量级安全码率的实时量子密钥分发提供技术支撑。通过上述关键技术攻关,提出的基于 OFDM 的多载波 CV-QKD 系统在 5、10、25、50、75 km 传输距离下分别实现了 1819.32、1078.48、374.19、112.96、34.63 Mbps 的安全码率,首次实现了 10 km 城域距离内 Gbps 量级的安全码率和 50 km 城域距离内 100 Mbps 量级的安全码率。最后,为进一步突出所提出的多载波 CV-QKD 系统的技术优势,在同等实验条件下开展了 10 GHz 重复频率的单载波 CV-QKD 系统实验验证,经对比多载波 CV-QKD 系统在不同传输距离下的多载波安全码率增益分别可达 1.09@5 km、1.10@10 km、1.13@25 km、1.54@50 km 和 5.55@75 km,表明多载波 CV-QKD 系统方案更适用于宽带、长距离量子密钥分发,可为未来高性能量子保密通信提供有效解决方案。

参考文献 (References)

- [1] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145–195.
- [2] Pirandola S, Andersen U L, Banchi L, et al. Advances in quantum cryptography[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(4): 1012–1236.
- [3] Xu F H, Ma X F, Zhang Q, et al. Secure quantum key distribution with realistic devices[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2020, 92(2): 025002.
- [4] Zhang Y C, Bian Y M, Li Z Y, et al. Continuous-variable quantum key distribution system: Past, present, and future[J]. *Applied Physics Reviews*, 2024, 11: 011318.
- [5] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J, et al. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states[J]. *Nature*, 2003, 421(6920): 238–241.
- [6] Braunstein S L, van Loock P. Quantum information with continuous variables[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2005, 77(2): 513–577.
- [7] Jouguet P, Kunz-Jacques S, Leverrier A, et al. Experimental demonstration of long-distance continuous-variable quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 378–381.
- [8] Zhang Y C, Chen Z Y, Pirandola S, et al. Long-distance continuous-variable quantum key distribution over 202.81 km of fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(1): 010502.
- [9] Pan Y, Wang H, Shao Y, et al. Experimental demonstration of

- high-rate discrete-modulated continuous-variable quantum key distribution system[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3307–3310.
- [10] Tian Y, Wang P, Liu J Q, et al. Experimental demonstration of continuous-variable measurement-device-independent quantum key distribution over optical fiber[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 492.
- [11] Tian Y, Zhang Y, Liu S S, et al. High-performance long-distance discrete-modulation continuous-variable quantum key distribution[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 2953–2956.
- [12] Pi Y D, Wang H, Pan Y, et al. Sub-Mbps key-rate continuous-variable quantum key distribution with local local oscillator over 100-km fiber[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(7): 1766–1769.
- [13] Laudenbach F, Pacher C, Fung C F, et al. Continuous-variable quantum key distribution with Gaussian modulation: The theory of practical implementations[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2018, 1(1): 1800011.
- [14] Kiselev F, Samsonov E, Goncharov R, et al. Analysis of the chromatic dispersion effect on the subcarrier wave QKD system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28696–28712.
- [15] Wang H, Li Y, Pi Y D, et al. Sub-Gbps key rate four-state continuous-variable quantum key distribution within metropolitan area[J]. *Communications Physics*, 2022, 5: 162.
- [16] Pan Y, Wang H, Shao Y, et al. Simple and fast polarization tracking algorithm for continuous-variable quantum key distribution system using orthogonal pilot tone[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(19): 6169–6175.
- [17] Weerasinghe A, Alhussein M, Alderton A, et al. Practical, high-speed Gaussian coherent state continuous variable quantum key distribution with real-time parameter monitoring, optimised slicing, and post-processed key distillation[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 21543.
- [18] Li Y, Zhang X F, Li Y, et al. High-throughput GPU layered decoder of quasi-cyclic multi-edge type low density parity check codes in continuous-variable quantum key distribution systems[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14561.
- [19] Yang H Z, Liu S S, Yang S S, et al. High-efficiency rate-adaptive reconciliation in continuous-variable quantum key distribution[J]. *Physical Review A*, 2024, 109: 012604.
- [20] Eriksson T A, Luís R S, Puttnam B J, et al. Wavelength division multiplexing of 194 continuous variable quantum key distribution channels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2214–2218.
- [21] Wang H, Pan Y, Shao Y, et al. Performance analysis for OFDM-based multi-carrier continuous-variable quantum key distribution with an arbitrary modulation protocol[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 5577–5592.
- [22] Wu S P, Liu P, Bar-Ness Y. Phase noise estimation and mitigation for OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(12): 3616–3625.
- [23] Weedbrook C, Lance A M, Bowen W P, et al. Quantum cryptography without switching[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(17): 170504.
- [24] Wang T, Huang P, Zhou Y M, et al. Pilot-multiplexed continuous-variable quantum key distribution with a real local oscillator[J]. *Physical Review A*, 2018, 97: 012310.
- [25] Ma L, Yang J, Zhang T, et al. Practical continuous-variable quantum key distribution with feasible optimization parameters[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(8): 180507.
- [26] Zhang Y C, Huang Y D, Chen Z Y, et al. One-time shot-noise unit calibration method for continuous-variable quantum key distribution[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 024058.
- [27] Wang H, Li Y, Ye T, et al. High-rate continuous-variable quantum key distribution over 100 km fiber with composable security[J]. *Optica*, 2025, 12(10): 1657.

High-speed multi-carrier continuous variable quantum key distribution within metropolitan areas

WANG Heng¹, PAN Yan¹, YE Ting¹, SHAO Yun¹, MA Li¹, WU Mingze², PI Yaodi¹, SUN Ao¹, LI Yang¹, HUANG Wei¹, ZHANG Yichen², XU Bingjie^{1*}

1. National Key Laboratory of Security Communication, Institute of Southwestern Communication, Chengdu 610041, China
2. State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract Continuous-variable quantum key distribution (CV-QKD) technology has emerged as a pivotal direction in quantum secure communication due to its inherent compatibility with classical optical communication systems and high key rates within metropolitan areas. However, the secret key rates of existing CV-QKD systems remain insufficient to meet the practical requirements of one-time pad encryption within metropolitan areas. This work innovatively integrates orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) technology into CV-QKD systems. We experimentally demonstrated, for the first time, a multi-carrier CV-QKD system operating at a 10 GHz repetition rate. Moreover, this experimental system respectively achieves secret key rates of 1819.32, 1078.48, 374.19, 112.96, and 34.63 Mbps over transmission distances of 5, 10, 25, 50, and 75 km by developing a high-precision dual-stage phase noise compensation algorithm, establishing an excess noise theoretical model, and designing a high-throughput data post-processing scheme. Notably, our work realizes the first instance of Gbps-level secret key rates within 10 km and 100 Mbps-level secret key rates within 50 km for metropolitan-area CV-QKD. Compared to traditional single-carrier CV-QKD system with 10 GHz repetition rate under identical experimental conditions, the multi-carrier key rate gains at different transmission distances can respectively reach 1.09@5 km, 1.10@10 km, 1.13@25 km, 1.54@50 km, and 5.55@75 km. These results confirm that the multi-carrier CV-QKD system scheme can significantly enhance quantum key distribution performance, providing an effective solution for future broadband and long-distance quantum secure communication.

Keywords continuous-variable quantum key distribution; orthogonal frequency-division multiplexing; multi-carrier technology; secret key rate; excess noise ●



(责任编辑 王微)