

面向 CVQKD 量子-经典信号共纤传输技术研究

刘旭超^{1,2*}, 孙时伦^{1,2}, 李少波^{1,2}, 温佳旭^{1,2}, 李华贵^{1,2**}¹中国电子科技集团公司网络通信研究院, 河北 石家庄 050081;²河北省光子信息技术与应用重点实验室, 河北 石家庄 050081

摘要 量子-经典信号共纤传输技术对实用化量子保密通信网络建设具有重要意义。针对经典光在光纤信道中的拉曼散射(RS)、四波混频(FWM)以及交叉相位调制(XPM)等非线性效应对量子信号的噪声干扰,构建了量子-经典信号共纤传输连续变量量子密钥分发(CVQKD)系统的安全密钥率仿真模型,重点分析了经典光功率、信道间隔和探测方式对系统噪声和密钥率的影响。结果表明,在近距离传输时,FWM噪声占主导地位,在传输距离大于10 km时,XPM噪声大于RS和FWM噪声。系统总噪声与经典光功率正相关,与波分复用信道间隔反相关。零差和外差检测下,随着传输距离的增加,安全密钥率整体变化趋势接近,零差检测方式具有更大的极限传输距离。该研究工作可为实用化量子-经典信号共纤传输CVQKD系统的优化设计提供参考。

关键词 量子光学; 连续变量量子密钥分发; 共纤传输; 拉曼散射; 四波混频; 交叉相位调制

中图分类号 TN918.4 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221092

1 引言

连续变量量子密钥分发(CVQKD)具有安全密钥率高、与经典光通信和光网络设备兼容性好等技术优势,引起信息安全领域研究人员的极大兴趣^[1-6]。为加快CVQKD实用化、降低应用成本,量子-经典信号共纤传输技术得到重点关注^[7-9]。经典光强度比量子高数个量级,在光纤信道中产生的拉曼散射(RS)、四波混频(FWM)和交叉相位调制(XPM)等非线性效应对量子信号的传输干扰严重,导致CVQKD系统密钥分发距离一般较短,速率较低。因此研究量子-经典信号共纤传输过程中经典信号对量子信道的影响具有重要意义。

在量子-经典信号共纤传输系统中,量子信道受到经典光的噪声主要包括RS、FWM、XPM、波分复用器的经典光泄漏和放大器的自发辐射(ASE)等。其中,由经典光泄漏和放大器自发辐射产生的光子与量子信号的载波频率不同,CVQKD系统中的相干检测方式可以很好地对其进行滤除,其对实际的密钥分发影响可以忽略。而RS和FWM等非线性效应产生与量子信号频率相同的混沌光子,相干检测技术并不能完全滤除其影响^[10]。在时分复用CVQKD系统中,XPM直接作用在光信号相位上,导致本振光和信号光之间的相位差发生剧烈抖动,进而增加信道过噪声^[11]。

2015年,Kumar等^[9]通过对实际通信环境中的各种噪声进行对比分析,提出RS是系统的主要噪声之一。国内研究人员针对RS对共纤传输CVQKD系统的密钥率的影响也进行了很多研究^[5,12-13]。2020年,孙咏梅等^[14]分析了RS和FWM效应对量子信道的综合影响。2013年,Chen等^[11]研究了单个经典光对量子信号光的相位调制影响,其对研究基于密集波分复用器的多经典光信号的复杂相位调制作用具有指导意义。上述工作对量子-经典信号共纤传输中RS、FWM及XPM等进行了较好的研究,然而在实际系统中,上述三种效应是同时存在的,多个经典光共同作用时的总噪声比较复杂,开展综合上述三种噪声的面向CVQKD系统的量子-经典共纤传输模型研究具有实际应用价值。

本文针对CVQKD系统,建立了综合RS、FWM和XPM等效应的量子-经典信号共纤传输模型,仿真分析了三种非线性效应对系统噪声和密钥率的影响。介绍了量子-经典信号共纤传输的研究现状和本文的关注点;建立仿真模型,并介绍了CVQKD安全密钥率、RS、FWM、XPM及仿真参数设置;重点讨论了综合上述三种噪声的量子-经典共纤传输性能。本文研究可为实际环境下CVQKD系统的量子-经典共纤传输提供理论支持和参考。

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-10; 录用日期: 2022-06-29; 网络首发日期: 2022-07-09

基金项目: 河北省省级科技计划(22310701D)

通信作者: liuxuchao15@mails.ucas.ac.cn; *17778263627@163.com

2 基本原理

2.1 量子-经典信号共纤传输技术研究模型

图 1 为量子-经典信号共纤传输 CVQKD 系统示意图, Alice 为系统发射端, 发射端产生的方差为 V 的高斯量子相干态经光纤信道传输到接收端 Bob 处, 并在 Bob 进行零差或外差检测。经典光通信发射端包含两路经典光信号, 其编码方式均为开光键控(OOK)调制, 经典光通信接收端使用直接探测方式。量子光信号和两束经典光信号由波分复用器复用在单模光纤信道中, 并在接收端进行解复用, 完成对各个信号的探

测。在 CVQKD 系统中, 由于信号光极其微弱, 为了减小本振光退偏对信号光的干扰, 通常将信号光或本振光依次进行延迟处理, 图中延迟线分别设置在发射端和接收端本振光路和信号光路中, 从而使信号光和本振光通过信道的的时间产生一定间隔(时分复用)。在量子-经典信号共纤传输过程中, 经典光的强度相较于光量子高数个量级, 其在光纤信道中产生的 RS、FWM 和 XPM 等非线性效应对量子信号的传输干扰严重, 增加信道过噪声。本模型研究量子-经典信号共纤传输系统中经典光功率、信道间隔和探测方式对系统噪声和密钥率的影响。

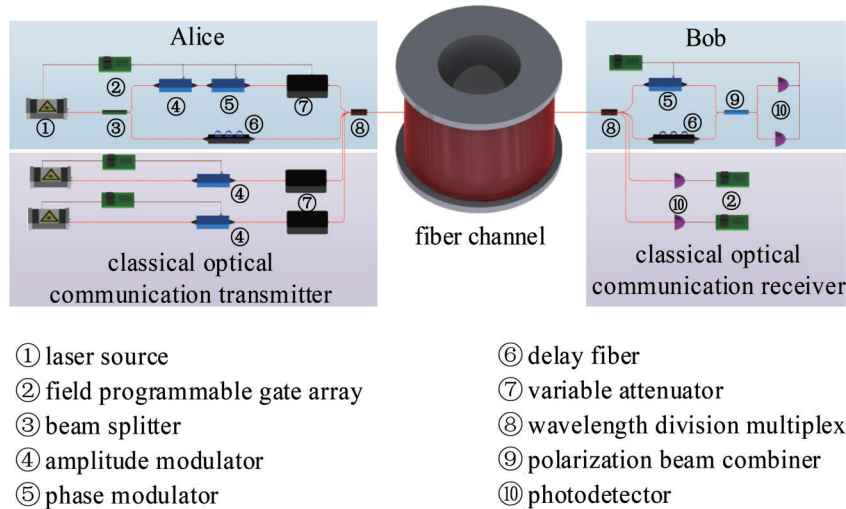


图 1 面向 CVQKD 的量子-经典信号共纤传输系统模型

Fig. 1 Quantum-classical signal co-channel transmission system model for CVQKD

2.2 安全密钥率理论

在量子-经典信号共纤传输 CVQKD 系统中, 经典信号对量子信道产生的噪声干扰会降低系统的密钥率。在集体攻击情况下, CVQKD 系统的密钥率^[15]为

$$K_{\text{col}} = (1 - \rho)(\beta I_{\text{AB}} - \chi_{\text{BE}}), \quad (1)$$

式中: ρ 为中断概率; β 为系统反向协商效率; I_{AB} 为 Alice 与 Bob 之间的互信息量; χ_{BE} 为 Bob 和 Eve 之间的 Holevo 界, 决定了 Eve 从 Bob 中可获得的最大信息量。在平衡零差检测条件下, 密钥率 $I_{\text{AB}}^{\text{hom}}$ 的表达式为

$$I_{\text{AB}}^{\text{hom}} = \frac{1}{2} \text{lb} \frac{V + \chi_{\text{tot}}}{1 + \chi_{\text{tot}}}, \quad (2)$$

式中: $\chi_{\text{tot}} = \chi_{\text{line}} + \chi_{\text{hom}}/T$ 为零差检测下系统的总噪声, $\chi_{\text{line}} = (1 + T\epsilon)/T - 1$ 为信道噪声, T 为信道透射率, ϵ 为信道过噪声, $\chi_{\text{hom}} = [(1 - \eta) + v_{\text{el}}]/\eta$ 为零差探测噪声, 与零差检测器相关, η 为探测器的量子效率, v_{el} 为电噪声。

在平衡外差检测条件下, 密钥率 $I_{\text{AB}}^{\text{het}}$ 的表达式为

$$I_{\text{AB}}^{\text{het}} = \text{lb} \frac{V + \chi'_{\text{tot}}}{1 + \chi'_{\text{tot}}}, \quad (3)$$

式中: $\chi'_{\text{tot}} = \chi_{\text{line}} + \chi_{\text{het}}/T$ 为外差检测下的系统总噪声,

$\chi_{\text{het}} = [1 + (1 - \eta) + 2v_{\text{el}}]/\eta$ 为外差探测噪声, 与外差检测器相关。高斯攻击是集体攻击下最优攻击模式之一, 在高斯攻击下 χ_{BE} 的表达式为

$$\chi_{\text{BE}} = \sum_{i=1}^2 G\left(\frac{\lambda_i - 1}{2}\right) - \sum_{i=3}^5 G\left(\frac{\lambda_i - 1}{2}\right), \quad (4)$$

式中: $G(x) = (x + 1)\text{lb}(x + 1) - x\text{lb}x$; $\lambda_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 为 CVQKD 系统协方差矩阵的第 i 个辛特征值。 λ_i 满足如下关系式:

$$\begin{cases} \lambda_{1/2}^2 = \frac{1}{2} [A \pm \sqrt{A^2 - 4B}] \\ \lambda_{3/4}^2 = \frac{1}{2} [C \pm \sqrt{C^2 - 4D}] \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $A = V^2(1 - 2T) + 2T + T^2(V + \chi_{\text{line}})^2$; $B = T^2(V\chi_{\text{line}} + 1)^2$; 在零差检测时, C 和 D 可分别表示为

$$\begin{cases} C = \frac{A\chi_{\text{hom}} + V\sqrt{B} + T(V + \chi_{\text{line}})}{T(V + \chi_{\text{tot}})} \\ D = \sqrt{B} \frac{V + \sqrt{B}\chi_{\text{hom}}}{T(V + \chi_{\text{tot}})} \end{cases}, \quad (6)$$

外差检测时, C 和 D 的表达式为

$$\begin{cases} C = \frac{A\chi_{\text{het}}^2 + B + 1 + 2\chi_{\text{het}}[V\sqrt{B} + T(V + \chi_{\text{line}})] + 2T(V^2 - 1)}{[T(V + \chi'_{\text{tot}})]^2} \\ D = \left[\frac{V + \sqrt{B}\chi_{\text{het}}}{T(V + \chi'_{\text{tot}})} \right]^2 \end{cases} \quad (7)$$

当 $i=5$ 时, $\lambda_i = \lambda_5 = 1$ 。将式(2)~(7)代入式(1),可分别得到 CVQKD 系统零差检测与外差检测安全密钥率的表达式。由上述可知,密钥率的主要影响参数为信道透过率 T 、中断概率 P 和信道过噪声 ϵ ,下文将主要分析由 RS、FWM 和 XPM 引起的信道过噪声对 CVQKD 系统密钥率的影响。

2.3 RS 噪声分析

RS 是指光子在光纤传输中与介质发生非弹性的

相互作用并产生与入射光频率不同的光辐射的现象。该过程产生的噪声光强与 RS 系数有关,噪声光谱连续且宽度可达 200 nm。假设经典光与量子信号同向传输,经典光的输入功率为 P_i 、传输距离为 L 时,忽略拉曼效应造成的光强损耗, Bob 端可检测到的 RS 噪声功率^[9,16]为

$$P_{\text{RS}} = \int_0^L B(\lambda_c, \lambda_q) P_i \exp[-\alpha_q(L-z)] \exp(-\alpha_c z) \Delta\lambda dz = \frac{B(\lambda_c, \lambda_q) \Delta\lambda P_i}{\alpha_q - \alpha_c} [\exp(-\alpha_c L) - \exp(-\alpha_q L)], \quad (8)$$

式中: $B(\lambda_c, \lambda_q)$ 为 RS 系数; λ_c, λ_q 分别为经典光和量子信号光的波长; α_c, α_q 分别为 λ_c, λ_q 对应的光衰减系数; $\Delta\lambda$ 为量子信道带宽。

在密集波分复用量子-经典信号共纤传输中,经典光和量子信号光波长接近,RS 系数和衰减系数近似相等,即 $\beta(\lambda_c, \lambda_q) = \beta, \alpha_q \approx \alpha_c = \alpha$ 。在解复用器的输出端,每个模式内的 RS 噪声平均光子数为

$$\langle N_{\text{RS}} \rangle = \frac{P_{\text{RS}} \eta_{\text{MU}}}{h\nu N_{\text{mode}}} \approx \frac{\lambda^3}{hc^2} P_i L \exp(-\alpha L) B \eta_{\text{MU}}, \quad (9)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为真空光速; η_{MU} 为复用器与解复用器的插入损耗系数; $N_{\text{mode}} = \Delta\nu \cdot \Delta t = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$ 为在带宽为 $\Delta\lambda$ 、时间 $\Delta t = 1$ s 时窗内的模式数。RS 噪声可模型化为符合玻色-爱因斯坦统计的混沌光源^[7],则 Bob 端检测到的 RS 噪声方差为

$$\epsilon_{\text{RS}} = 2\eta_{\text{Bob}} \frac{1}{2} \langle N_{\text{rs}}^{(i)} \rangle = \frac{\lambda^3}{hc^2} P_i L \exp(-\alpha L) B \eta_{\text{MU}} \eta_{\text{Bob}}, \quad (10)$$

式中: η_{Bob} 为探测器的量子效率; $N_{\text{rs}}^{(i)}$ 为混沌光子个数。当多个经典光同时存在时,RS 噪声平均光子数可近似用求和的方式得到,最后求出总体的拉曼噪声方差。

2.4 FWM 噪声分析

FWM 是光纤介质极化作用产生的一种光波间耦合现象,属于三阶非线性效应,可以生成三倍频、和频和差频等多种参量效应^[16]。FWM 产生的辐射光频率谱与 RS 不同,并不是连续的,其与入射光频率直接相关,呈线状谱。假设三个不同频率的经典光分别为 $f_i, f_j, f_k (k \neq i, j)$, 由 FWM 作用产生光波的频率为

$$f_{\text{FWM}} = f_i + f_j - f_k \quad (11)$$

当入射光波频率确定时,容易计算出生成的光波频率 f_{FWM} 。由于经典光通信的波分复用信道是等间隔设置的,如果量子信号的信道频率设置不当,FWM 噪声光子刚好对应 CVQKD 量子信号,将产生较大干扰。当前的量子-经典信号共纤传输系统通常采用错开量子频率信道的方法,以避免 FWM 的影响。然而,在密集波分复用系统中,通信信道有几十上百个,错开信道方法的成本很高且灵活性差。研究包含 FWM 效应的量子-经典信号共纤传输技术具有实际意义。与拉曼效应类似,FWM 效应造成的光强损耗很小,忽略不计,由 FWM 产生的噪声光功率^[17]为

$$P_{\text{FWM}} = \frac{\eta D_{\text{FWM}}^2 \gamma^2 P_i P_j P_k \exp(-\alpha L)}{9\alpha^2} [1 - \exp(-\alpha L)]^2, \quad (12)$$

式中: D_{FWM} 为 FWM 简并因子,若 3 个输入光信号频率互不相等,则 $D_{\text{FWM}} = 6$,若其中两个频率相同,即 $i = j$,则 $D_{\text{FWM}} = 3$; γ 为非线性系数; P_i, P_j, P_k 为对应参与混频效应信号的输入功率; η 为 FWM 的效率,表达式为

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left\{ 1 + \frac{4\exp(-\alpha L) \sin^2(\Delta\beta L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right\}, \quad (13)$$

式中: $\Delta\beta$ 为相位匹配因子,表达式为

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c - \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c}{d\lambda} \right], \quad (14)$$

式中: $\Delta f_{mk} = |f_m - f_k|$, $m = i, j$; λ_k 为第 k 束经典光波长; D_c 为光纤的色散系数; $dD_c/d\lambda$ 为光纤色散系数的斜率。由式(12)~(14)可得 FWM 噪声光子数。FWM 产生的噪声光子同样可认为是混沌光源, 由式(9)、(10)可得 Bob 端检测到的 FWM 噪声方差为

$$\epsilon_{\text{FWM}} = \eta_{\text{Bob}} \frac{P_{\text{FWM}} \eta_{\text{MU}}}{h\nu N_{\text{mode}}} \quad (15)$$

当多个经典光组合生成目标光频率时, FWM 的噪声平均光子数可近似用求和的方式得到, 最后求出噪声方差。本文以两束经典光通过 FWM 效应产生量子信道噪声光为分析模型, 研究包含 FWM 效应的量子-经典信号共纤传输性能。

2.5 XPM 噪声分析

XPM 可解释为: 当一束光在光纤传输时, 光强的起伏会导致光纤折射率发生变化, 若此时另一束光也在光纤中传输, 其相位就具有时变的特点, 即相位调制效应。CVQKD 系统中, 由于信号光极其微弱, 为了减小本振光退偏对信号光的干扰, 通常采取对信号光或本振光依次进行延迟处理并间隔通过信道的方法(时分复用)。由于 XPM 的影响, 信号光与本振光之间的相位差会产生抖动, 信道的过噪声增加, 系统的密钥率降低。当经典光信号在光纤信道传输时, 另一束目标光相位的变化量^[18]为

$$\delta\varphi = 2\gamma_1 \int_0^L P(0, t + d_{12}z) \exp(-\alpha z) dz, \quad (16)$$

式中: $\gamma_1 = 2\pi n f / (cA_{\text{eff}})$ 为非线性耦合系数, n 为光纤折射率, f 为光载波频率, A_{eff} 为光纤有效截面积; $P(0, t + d_{12}z)$ 为经典光功率, z 为传输距离, $d_{12} \approx D_c(\lambda_1 - \lambda_2)$ 为两个信道的相对距离。

对式(16)进行傅里叶变换, 得到目标光相位变化量的谱密度为

$$\Psi(f) = \phi_P(f) H_{12}(f), \quad (17)$$

式中: $\phi_P(f)$ 为经典光信号的功率谱密度; $H_{12}(f) = 2\gamma \int_0^L \exp(-\alpha z + i2\pi f d_{12}z) dz$ 是经典光功率密度在 XPM 光纤内的转换函数。本振光和信号光之间的相位差^[8]可表示为

$$\Delta\varphi_{\text{XPM}}(L, t) = \varphi_{\text{signal}}(L, t) - \varphi_{\text{LO}}(L, t - \Delta t), \quad (18)$$

式中: φ_{signal} 为信号光相位的变化量; φ_{LO} 为本振光相位的变化量; Δt 为信号光与本振光之间的时间延迟。对式(18)进行傅里叶变换, 得到本振光与信号光的相位差的谱密度为

$$\Delta\Psi_{\text{XPL}}(f) = \phi_P(f) H_{12}(f) [1 - \exp(-i2\pi f \Delta t)], \quad (19)$$

将式(19)在 $(-1/\Delta t, 1/\Delta t)$ 区间对频率 f 进行积分, 即可得到本振光和信号光的相位差的方差:

$$\text{Var}(\Delta\Psi_{\text{XPL}}) = \int_{-1/\Delta t}^{1/\Delta t} \Delta\Psi_{\text{XPL}}(f) df, \quad (20)$$

式中: $\text{Var}(\cdot)$ 代表方差。

高斯调制 CVQKD 中, 将信息调制在光量子的正则位置和正则动量上, 上述相位方差的存在会在系统中产生噪声, 降低系统密钥率。由该相位方差导致的 XPM 噪声方差^[19]为

$$\epsilon_{\text{XPM}} = V_A \text{Var}(\Delta\Psi_{\text{XPM}}), \quad (21)$$

式中: V_A 为发送端的高斯调制方差。本模型中考虑两束经典光在光纤中对量子信号产生的 XPM 作用, 假设两束经典光均为 OOK 调制信号, 式(17)中的功率谱密度为

$$\phi_P(f) = \phi_{P1}(f) + \phi_{P2}(f) = P_1 T_1 \frac{\sin^2(\pi f T_1)}{(\pi f T_1)^2} + P_2 T_2 \frac{\sin^2(\pi f T_2)}{(\pi f T_2)^2} + C\delta(f), \quad (22)$$

式中: P_1, P_2 为两束经典光的光功率; T_1, T_2 为两束经典光的调制周期; $C\delta(f)$ 为光强直流分量。

在量子-经典共纤传输 CVQKD 系统中, RS 噪声和 FWM 噪声模服从玻色-爱因斯坦统计, 二者之和即总噪声可通过线性相加获得。XPM 噪声作用在量子本振光和信号光的相位上, 虽然与另外两种噪声属于不同的物理机制, 但上述研究所得噪声为统计方差, 因此可近似进行线性相加处理, CVQKD 系统总过噪声^[10-11]的表达式为

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{\epsilon_{\text{RS}} + \epsilon_{\text{FWM}} + \epsilon_{\text{XPM}}}{T\eta_{\text{Bob}}\eta_{\text{mode}}}, \quad (23)$$

式中: ϵ_0 为系统初始的过噪声(本模型中假设 $\epsilon_0 = 0$)。将式(23)代入 CVQKD 安全密钥率公式, 可以求出特定参数下系统的密钥率。

2.6 仿真参数设置

上述面向 CVQKD 的量子-经典共纤传输系统模型中综合考虑了 RS、FWM 以及 XPM 等非线性效应, 建立了相应的 CVQKD 密钥率计算数学模型。该模型可在不同条件下定量分析 CVQKD 系统密钥率与光纤链路传输距离之间的关系。通过上述各非线性效应对量子信号的噪声干扰的分析可知, 影响 CVQKD 系统密钥率的主要参数包括传输距离、经典信号光功率、波分复用器频率间隔等。量子-经典信号共纤传输系统模型的仿真参数如表 1 所示。

3 仿真结果与分析

图 2 为上述三种非线性效应分别引入的噪声方差随距离的变化关系图。其中, 点线、实线、虚线分别对应 RS、FWM 以及 XPM 噪声分布曲线 ($P_1 = P_2 = 1 \text{ mW}$, $\Delta f = 100 \text{ GHz}$)。如图 2 所示: RS 噪声随传输距离的增加先增大后减小; FWM 噪声随距离的增加呈振荡分布, 且极大值逐渐减小; XPM 噪声随距离的增加而增大; 在传输距离较近时, 三种噪声中 FWM 噪声占主导地位; 在传输距离较远时, XPM 噪声大于 RS 噪声, 也大于 FWM 噪声。其原因为: 光纤损耗使经典光功率逐渐减小, RS 生成噪声逐渐减小且生成的噪声

表 1 MATLAB 仿真的参数

Table 1 Simulation parameters of MATLAB

Symbol	Numerical value
ρ	0.05
β	0.95
V	4
η	0.65
v_{el}	0.012
α / m^{-1}	4.6×10^{-5}
λ_q / nm	1550.31
$B / (\text{m} \cdot \text{nm})$	4×10^{-3}
$\Delta\lambda / \text{nm}$	0.12
η_{MU}	0.8
D	3
γ	1.22×10^{-3}
$D_c / (\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$	1.7×10^{-5}
$dD_c / d\lambda / (\text{s} \cdot \text{m}^{-3})$	56
$T_1(T_2) / \text{ns}$	0.1
$\Delta t / \text{ns}$	5
	100
$\Delta f / \text{GHz}$	200
	400
	0.001
$P_1(P_2) / \text{W}$	0.002
	0.003

也不断衰减;当传输距离较近时,RS 噪声光子增加量大于链路损耗,噪声曲线上升;当传输距离较远时,RS 噪声光子增加量小于链路损耗,噪声曲线下降。FWM 相位匹配因子随距离的增加呈周期性分布,见式(14),故其产生的噪声随距离的增加呈振荡分布;噪声极大值逐渐减小的原因为光纤损耗和非线性饱和效应的存在。XPM 噪声作用在量子信号的相位上,具有积累效应。对于本系统设定的参数,在传输距离约为 10 km 处,三种效应产生的噪声近似相等,实际应用中应予以关注,该距离与光纤非线性系数和经典光功率有关。

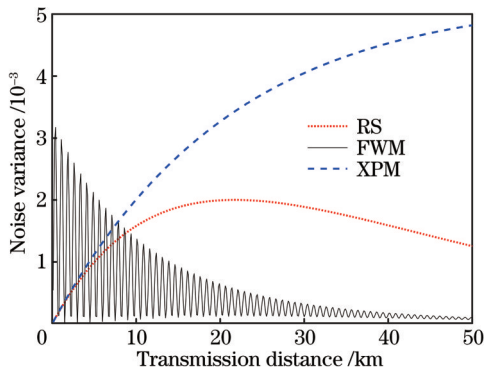


图 2 噪声方差与传输距离的关系图

Fig. 2 Noise variance varying with transmission distance

图 3 为不同经典光功率条件下三种非线性效应引入的总噪声方差随距离的变化关系图。其中,实线、点线、虚线分别对应输入经典光功率 $P_1 = P_2 = 1 \text{ mW}$ 、 $P_1 = P_2 = 2 \text{ mW}$ 和 $P_1 = P_2 = 3 \text{ mW}$ 时的总噪声方差曲线 ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)。如图 3 所示:系统总噪声随经典光功率的增大而增大;随着传输距离的增大,总噪声极大值与极小值逐渐收敛,且在远距离传输时,总噪声与经典光功率近似呈正比关系;不同经典光功率下的总噪声的极大值之差在近距离传输时远大于远距离传输,其原因可由式(10)、(12)、(19)可知,三种非线性效应均与光功率呈正相关,经典光功率增加时,三种非线性效应产生的噪声增大。由上述分析可知:在近距离传输时,FWM 起主要作用,总噪声极大值与极小值之差较大;传输距离变大时,另外两种效应起主要作用。此外,不同经典光功率下的总噪声的极大值之差在近距离传输时远大于远距离传输,表明增大经典光功率对 FWM 噪声的影响更大。

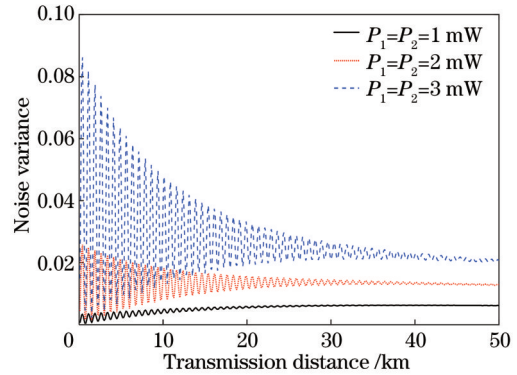


图 3 总噪声方差与传输距离的关系图

Fig. 3 Relationship between total noise variance and transmission distance

图 4 为不同信道间隔下系统总噪声随链路距离的变化。其中,实线、点线、虚线分别对应波分复用信道频率间隔 Δf 为 100 GHz、200 GHz、400 GHz 时的总噪声分布曲线 ($P_1 = P_2 = 1 \text{ mW}$)。如图 4 所示,总噪声随信道间隔频率的增大而减小,且随着距离的增加,噪声减小的趋势变明显;总噪声极大值与极小值之差也随信道频率间隔的增大而减小。其原因是:增加信道频率间隔会在一定程度上减弱 FWM 和 XPM 效应,系统总噪声减小,且由于 FWM 噪声减小,总噪声极大值与极小值之差减小。此外,RS 噪声模型忽略了散射系数与波长的变化关系,实际在一定波长区间内,增加信道间隔也可以降低散射噪声。

图 5 为不同经典光功率下 CVQKD 系统安全密钥率随传输距离的变化,其中虚线、点线、实线分别对应经典信号功率为 $P_1 = P_2 = 1 \text{ mW}$ 、 $P_1 = P_2 = 2 \text{ mW}$ 、 $P_1 = P_2 = 3 \text{ mW}$ 时的密钥率变化曲线 ($\Delta f = 100 \text{ GHz}$)。如图 5 所示,系统安全密钥率随传输距离的增加逐渐降

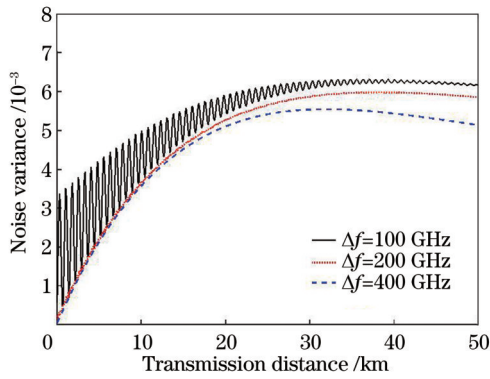


图 4 总噪声方差与传输距离的关系图

Fig. 4 Relationship between total noise variance and transmission distance

低,且在传输距离达到某一值时密钥率急速下降,这是该条件下系统可实现的最远传输距离;密钥率和极限传输距离随经典光功率的增大而分别降低和减小,其原因为:密钥率与透过率正相关,与总噪声反相关,当密钥率降低至某一值时,系统将中断工作。随着传输距离的增加,光纤信道透过率降低、系统总噪声增加,系统密钥率降低。经典光功率越大,总噪声越大,密钥率越低。

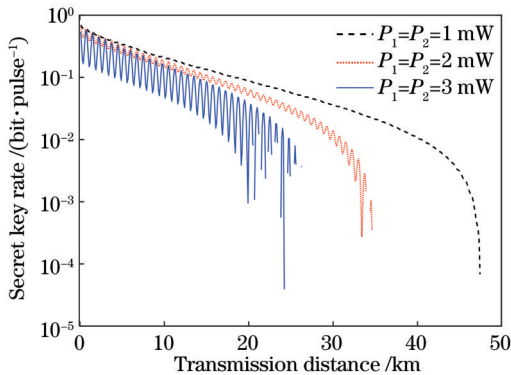


图 5 系统密钥率随传输距离的变化

Fig. 5 Relationship between secret key rate and transmission distance

图 6 为不同信道间隔条件下系统密钥率随传输距离的变化,其中实线、点线、虚线分别对应信道间隔 Δf 为 100 GHz, 200 GHz, 400 GHz 时的密钥率变化曲线 ($P_1 = P_2 = 1$ mW)。如图 6 所示,不同信道间隔条件下的密钥率曲线在近距离传输时基本一致,随着传输距离的增大,曲线逐渐分离,且随着信道间隔的增大,密钥率提高、最远传输距离增大,其原因是:当传输距离较小时,非线性效应引起的总噪声较小,此时系统其他干扰因素如电噪声为主要影响因素,随着传输距离的增大,上述效应引起的总噪声逐渐体现出来。此外,通过增大信道间隔可以降低系统总噪声,实际面向 CVQKD 的量子-经典共纤传输系统应考虑增大波分复用的信道间隔。

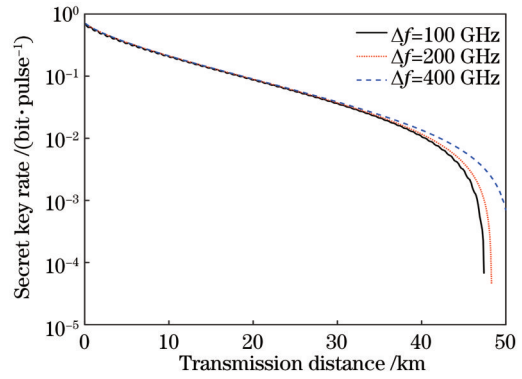


图 6 系统密钥率随传输距离的变化

Fig. 6 Relationship between secret key rate and transmission distance

图 7 为不同检测方式下密钥率随传输距离的变化,图中点线和实线分别为零差和外差检测 ($P_1 = P_2 = 1$ mW, $\Delta f = 100$ GHz)。如图 7 所示,两种检测方式下,系统安全密钥率的整体变化趋势非常接近,传输距离较近时,外差检测可以获得比零差检测更高的安全密钥率,传输距离较远时,结果相反。该结果与很多工作得出的结论一致,说明本模型关注的额外噪声不影响该结论。

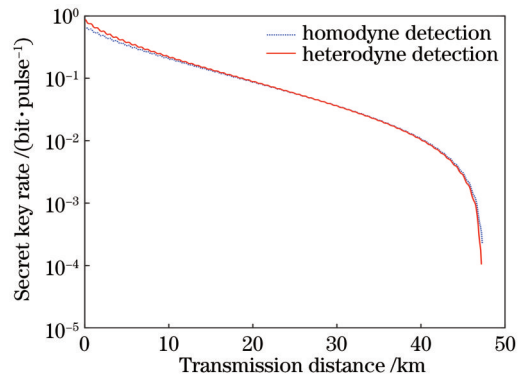


图 7 系统密钥率随传输距离的变化

Fig. 7 Relationship between secret key rate and transmission distance

4 结 论

针对 CVQKD 系统密集波分复用经典-量子信号共纤传输技术中,经典光在光纤信道中的 RS、FWM 以及 XPM 等效应对量子信号的噪声干扰,建立了综合三种非线性效应的量子-经典信号共纤传输研究模型,仿真分析了经典光功率、信道间隔以及探测方式对系统密钥率的影响。结果表明:RS 噪声随传输距离的增加先增大后减小,FWM 噪声随传输距离的增加呈振荡分布,XPM 噪声与传输距离正相关,在近距离传输时,FWM 噪声占主导地位,在传输距离大于 10 km 时,XPM 噪声将大于 RS 和 FWM 噪声。随着经典光功率的增加,总噪声增加,且在远距离传输时,总噪声与经

典光功率近似成正比。随着信道间隔频率的增大,总噪声减小,且随着传输距离的增加,噪声减小得更快。系统安全密钥率随传输距离的增加逐渐降低,经典光功率越大,相同距离下系统能够实现的安全密钥率越低,极限传输距离越短。不同信道间隔条件下的密钥率曲线在近距离传输时基本一致,随着传输距离的增大,曲线逐渐分离,且随着信道间隔的增大,密钥率提高、最远传输距离增大。两种检测方式下,密钥率曲线整体变化趋势非常接近,传输距离较远时,零差检测可以获得更高的密钥率,但差别不大。综上所述,经典光功率和信道间隔对于系统的噪声和密钥率有较大的影响,在实际经典-量子信号共纤传输系统中应合理选取。本文可为远距离高密钥率 CVQKD 及量子保密通信网络设计优化提供参考。

参 考 文 献

- [1] Bai Z, Yang S, Li Y. High-efficiency reconciliation for continuous variable quantum key distribution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(4): 044401.
- [2] Wang C, Huang P, Huang D, et al. Practical security of continuous-variable quantum key distribution with finite sampling bandwidth effects[J]. Physical Review A, 2016, 93(2): 022315.
- [3] Zhou N R, Wang L J, Gong L H, et al. Quantum deterministic key distribution protocols based on teleportation and entanglement swapping[J]. Optics Communications, 2011, 284(19): 4836-4842.
- [4] Gong L H, Song H C, He C S, et al. A continuous variable quantum deterministic key distribution based on two-mode squeezed states[J]. Physica Scripta, 2014, 89(3): 035101.
- [5] 周晓东, 张松磊, 方晓明, 等. 波分复用量子密钥分发拉曼噪声分析及最佳波段选择算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0527001.
Zhou X D, Zhang S L, Fang X M, et al. Raman noise analysis and optimal band selection algorithm for wavelength division multiplexing quantum key distribution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0527001.
- [6] 黄彪, 黄永梅, 彭真明. 连续变量量子密钥分发的参考脉冲相位攻击与探测[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1127001.
Huang B, Huang Y M, Peng Z M. Attack and detection on reference-pulse phase of continuous-variable quantum-key distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1127001.
- [7] 翟淑琴, 袁楠. 基于损耗和高斯噪声的连续变量多组分 EPR 导引操控[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2012001.
Zhai S Q, Yuan N. Manipulated multipartite continue-variable EPR steering with loss and Gaussian noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2012001.
- [8] Karinou F, Brunner H H, Fung C H F, et al. Toward the integration of CV quantum key distribution in deployed optical networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(7): 650-653.
- [9] Kumar R, Qin H, Alléaume R. Coexistence of continuous variable QKD with intense DWDM classical channels[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(4): 043027.
- [10] Qi B, Zhu W, Qian L, et al. Feasibility of quantum key distribution through a dense wavelength division multiplexing network[J]. New Journal of Physics, 2010, 12(10): 103042.
- [11] Chen Y, Shen Y, Tang G Z, et al. Impact of cross-phase modulation induced by classical channels on the CV-QKD in a hybrid system[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(11): 110302.
- [12] 许振宇, 李云霞, 石磊, 等. 基于连续变量的经典-量子信息共信道同传系统拉曼散射影响分析[J]. 量子电子学报, 2016, 33(3): 322-328.
Xu Z Y, Li Y X, Shi L, et al. Analysis of Raman scattering in multiplexed classical and quantum transmission channel system based on continuous variable[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(3): 322-328.
- [13] 李佳豪, 石磊, 张启发, 等. 经典-量子信号共信道传输实验噪声分析及性能优化[J]. 量子电子学报, 2021, 38(3): 365-373.
Li J H, Shi L, Zhang Q F, et al. Noise analysis and performance optimization of experiments in classical-quantum signals co-channel transmission[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2021, 38(3): 365-373.
- [14] 孙咏梅, 张鹏, 贾相龙, 等. 一种面向量子安全光通信的低噪声波长分配方案[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(6): 658-664.
Sun Y M, Zhang P, Jia X L, et al. A low-noise wavelength assignment scheme for quantum-based secure optical communication[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(6): 658-664.
- [15] Wang S Y, Huang P, Wang T, et al. Atmospheric effects on continuous-variable quantum key distribution[J]. New Journal of Physics, 2018, 20(8): 083037.
- [16] Peters N A, Toliver P, Chapuran T E, et al. Dense wavelength multiplexing of 1550 nm QKD with strong classical channels in reconfigurable networking environments[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(4): 045012.
- [17] Shibata N, Braun R, Waarts R. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(7): 1205-1210.
- [18] Leibrich J, Wree C, Rosenkranz W. CF-RZ-DPSK for suppression of XPM on dispersion-managed long-haul optical WDM transmission on standard single-mode fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(2): 155-157.
- [19] Qi B, Lougovski P, Pooser R, et al. Generating the local oscillator "locally" in continuous-variable quantum key distribution based on coherent detection[J]. Physical Review X, 2015, 5(4): 041009.

Co-Fiber Quantum-Classical Signal Transmission Technology for CVQKD

Liu Xuchao^{1,2*}, Sun Shilun^{1,2}, Li Shaobo^{1,2}, Wen Jiayu^{1,2}, Li Huagui^{1,2**}

¹Network Communication Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;

²Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application, Shijiazhuang 050081, Hebei, China

Abstract

Objective The co-fiber quantum-classical signal transmission technology is of great significance for the development of practical quantum secure communication networks. Quantum signals are interfered with the noise resulting from the nonlinear effects, such as Raman scattering (RS), four-wave mixing (FWM), and cross-phase modulation (XPM), of the classical signal in fiber channels. For the above reason, this paper constructs a simulation model for the secure key rate of a continuous-variable quantum key distribution (CVQKD) system based on co-fiber quantum-classical signal transmission. The paper focuses on analyzing the influences of the power of the classical light, channel spacing, and detection method on system noise and key rate. The results show that the FWM noise dominates the short-range transmission process, while the XPM noise is larger than both the RS noise and the FWM noise when the transmission range is longer than 10 km. The total system noise is positively correlated with the power of the classical light and inversely correlated with the spacing of wavelength division multiplexing channels. Under homodyne and heterodyne detection, the variations in the secure key rate with the transmission range exhibit a similar overall trend, although the homodyne detection method achieves a longer maximum transmission range. This paper can provide a reference for the optimal design of practical CVQKD systems based on co-fiber quantum-classical signal transmission.

Methods Focusing on the CVQKD system, this paper builds a co-fiber quantum-classical signal transmission model integrating the RS, FWM, and XPM effects and simulates and analyzes the effects of the three nonlinear effects on system noise and key rate. The research status of co-fiber quantum-classical signal transmission and the focus of this paper are outlined; the simulation model is constructed, and the secure key rate of the CVQKD system, RS, FWM, XPM, and simulation parameter settings are presented; the properties of co-fiber quantum-classical signal transmission are expounded. This paper can provide theoretical support and a reference for co-fiber quantum-classical signal transmission of CVQKD systems in practical environments.

Results and Discussions As shown in Fig. 2, the RS noise first increases and then decreases with the increase in the transmission range. The FWM noise exhibits an oscillating distribution as the range increases, and its maximum decreases gradually. The XPM noise increases with the range. When the transmission range is short, the FWM noise is dominant among the three noises. Otherwise, the XPM noise is larger than the RS noise and the FWM noise. In Fig. 3, the total system noise increases with the power of the classical light. As the transmission range increases, the maximum and minimum of the total noise gradually converge, and during long-range transmission, the total noise is approximately positively proportional to the power of the classical light. The differences in the maximum of the total noise under different power of the classical light are much larger in short-range transmission than in long-range transmission. Fig. 4 shows the variation in the total system noise with transmission distance under different channel spacings. The total noise decreases with the increase in channel frequency spacing, and with the increase in the range, the decreasing trend of the noise becomes obvious. The difference between the maximum and minimum of the total noise also decreases as the channel frequency spacing increases. Fig. 5 presents the change in the secure key rate of the CVQKD system with the transmission distance under different power of the classical light. The system's secure key rate gradually decreases with the increase in the transmission distance, and the secret key rate decreases rapidly when the transmission distance reaches a certain value, which is the longest transmission distance that the system can achieve under the corresponding condition. The secret key rate and the maximum transmission distance both decrease with the increase in the power of the classical light.

Conclusions The RS noise first increases and then decreases with the increase in the transmission distance. The FWM noise is in an oscillating distribution as the range increases. The XPM noise is positively correlated with the transmission distance. When the transmission distance is short, the FWM noise dominates. In contrast, the XPM noise will be larger than both the RS noise and the FWM noise when the transmission distance is longer than 10 km. The total noise increases with the power of the classical light, and during long-range transmission, it is approximately positively proportional to the power of the classical light. Nevertheless, it decreases as the channel frequency spacing increases and decreases more rapidly as the distance increases. The system's secret key rate gradually decreases with the increase in the transmission

distance. Large power of the classical light results in a lower secret key rate and a shorter maximum transmission distance that the system can achieve under the same distance. The secret key rate curves under different channel spacings are approximate during short-range transmission. As the transmission distance increases, the curves gradually separate, and the secret key rate and the maximum transmission distance both increase as the channel spacing increases. Under the two detection methods, the overall change trends of the secret key rate curves are close to each other. When the transmission distance is long, the homodyne detection can obtain a higher secret key rate, but the difference is not large. To sum up, the power of the classical light and channel spacing have a great influence on the noise and secret key rate of the system and should thus be selected properly in actual co-fiber classical-quantum signal transmission systems.

Key words quantum optics; continuous-variable quantum key distribution; co-fiber transmission; Raman scattering; four-wave mixing; cross-phase modulation