



专题：量子保密通信技术与应用

量子信号与经典光信号共纤传输中的噪声抑制技术

孙咏梅, 牛佳宁, 纪越峰

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 目前基于光纤的点对点量子密钥分配所需的器件和系统技术正逐步成熟并呈现商业化应用趋势, 因此如何将量子信号和经典光信号复用在一根光纤中以大幅提高系统容量和节约光纤资源成为学术界近年来关注的热点问题之一。主要研究了量子信号与经典光信号共纤传输中的噪声抑制问题, 首先分析四波混频和拉曼散射这两种主要噪声因素对量子信道产生的影响; 然后针对不同信道间隔和不同传输距离的应用场景分别提出了一种基于非等间隔波长分配的四波混频噪声抑制算法以及一种针对四波混频和拉曼散射进行联合优化的波长分配算法; 最后采用仿真验证了所提算法的性能优越性, 为未来不同应用场景下的量子信号与经典光信号共纤传输提供了良好的技术方案。

关键词: 量子密钥分配; 共纤传输; 四波混频; 拉曼散射; 噪声抑制; 波长分配

中图分类号: TN913.7, TN918.91

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018257

Noise suppression in the co-propagation of quantum signals and classical optical signals

SUN Yongmei, NIU Jianing, JI Yuefeng

The State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: At present, the technologies of device and system required for the fiber-based point-to-point quantum key distribution (QKD) are gradually becoming mature and showing the trend of commercial application. Therefore, how to multiplex quantum signals and classical optical signals in a single fiber to greatly increase the capacity and save fiber resources has been becoming one of the hotspots of academia in recent years. The noise impairments in the co-propagation of quantum signals and classical optical signals over a single fiber were mainly studied. Firstly, the influences of the main noises, four-wave mixing (FWM) and Raman scattering on the quantum channels were analyzed. Next, an unequal-frequency-spacing-based FWM noise suppression algorithm and a wavelength assignment algorithm for joint suppression of FWM and Raman scattering were proposed for different application scenarios with different channel space and transmission distance. Finally, the superiorities of the proposed algorithms were verified through numerical simulations. The research results provide feasible noise suppression schemes for different application scenarios in the future.

Key words: quantum key distribution, co-propagation, four-wave mixing, Raman scattering, noise suppression, wavelength assignment

收稿日期: 2018-08-03; 修回日期: 2018-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61331008); 信息光子学与光通信国家重点实验室 (北京邮电大学) 资助项目 (No.IPOC2017ZZ04)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61331008), Fund of State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications) (No.IPOC2017ZZ04)



1 引言

随着超级计算机及量子计算机技术的飞速发展，基于计算复杂度的传统加密方式面临着巨大的挑战。值得庆幸的是，量子密钥分发（quantum key distribution, QKD）技术的出现为信息安全领域提供了新的解决方案。量子密钥分配的安全性由量子力学定律保证，窃听者无法在不被发现的情况下获取任何信息^[1]。因此，量子密钥分配产生的对称密钥与一次一密（one-time-pad, OTP）技术相结合能够保证信息的安全传输。

自 1984 年量子密钥分发协议被首次提出以来^[2]，量子密钥分配技术在理论和实验上均取得了重大突破。随着先进的探测设备^[3-4]、高效的 QKD 协议机制^[5-6]等技术的提出，目前测量设备无关 QKD 系统在超低损耗光纤中的传输实验距离已经达到 404 km^[7]；安全密钥生成速率也达到了 Mbit/s 水平^[8-9]。随着基于光纤的点对点量子密钥分配所需的器件和系统技术的逐步成熟并呈现商业化应用趋势，人们开始意识到 QKD 技术想要推广使用所面临的挑战之一是如何大幅提高系统容量和节约光纤资源。初期在 QKD 系统的实施过程中，为了避免量子信号受到经典光信号的干扰，大多选择铺设专用光纤用于量子信号的传输，而且单根光纤中只传输一路量子信号，这样系统容量极低，会带来极大的成本浪费。因此，如何在现有普遍采用密集波分复用（dense wavelength division multiplexing, DWDM）技术传输经典光信号的光纤中承载量子信号成为推动 QKD 技术进一步发展的关键，引起了学术界的广泛关注^[11-22]。然而，量子信号与经典光信号在光功率方面存在巨大差异。以 1 Gbit/s 的 C 波段开关控（OOK）经典光调制信号为例，它的功率一般约为 0 dBm，相当于每个光脉冲含有 8×10^6 个光子。而出于安全考虑，用于生成密钥的量子信号均为单光子量级，实际应用中大约为每脉冲含有

0.4 个光子。这一特性使得量子信号极易受到经典光信号的干扰，为量子信号与经典光信号的共纤传输带来了挑战。

在量子信号与经典光信号共纤传输系统中存在多种噪声类型，根据产生机制的不同，量子信道受到的干扰噪声主要有相邻信道串扰噪声、放大器自发辐射（amplified spontaneous emission, ASE）噪声、散射噪声以及四波混频（four-wave mixing, FWM）噪声。相邻信道串扰噪声是由于 DWDM 器件隔离度不够导致部分经典光信号的光子泄露到量子信道中产生的，属于带外噪声，这种噪声可以通过提高 DWDM 器件隔离度的方法来降低。ASE 噪声只存在于配置了光纤放大器或半导体光放大器的长距离 DWDM 系统中，虽然 ASE 噪声具有较宽的频谱能够对量子信号造成干扰，但是目前针对这一噪声已经提出了较为有效的抑制方案，例如“放大器绕行”方案^[23]以及“QKD 信道噪声过滤”方案^[24]，通过以上措施基本能够去除 ASE 噪声对量子信号的干扰。散射噪声是在传输过程中由于经典光信号与光纤的相互作用而产生的，包括瑞利（Rayleigh）散射、布里渊（Brillouin）散射以及拉曼（Raman）散射。其中瑞利散射和布里渊散射产生的噪声频谱仅存在于泵浦光附近 10 GHz 左右的范围，而目前最为常用的 DWDM 系统的频谱间隔通常为 100 GHz 和 200 GHz，因此不会对量子信号造成干扰^[24]。而拉曼散射噪声具有较宽的频谱，对于 C 波段的量子信号与经典光信号波分复用系统，拉曼散射噪声会覆盖量子信道波长范围，因而对量子信号造成干扰。四波混频是泵浦信号在传输过程中造成光纤折射率扰动而产生的一种光纤非线性效应，该效应会产生多种新频率的噪声信号，可能会与量子信道的频率相同从而影响量子密钥分配系统的性能。综上，在量子信号与经典光信号波分复用的共纤传输系统中，拉曼散射噪声与四波混频噪声为带内噪声，无法通过滤波器滤除，因此成为影响 QKD

系统性能的主要干扰因素。目前,针对如何降低共纤传输系统中的噪声干扰问题已经提出了频域滤波技术^[11-18]、时域滤波技术^[16]以及降低经典光信号功率^[14-16,18]等方案,但是这些措施会受到器件制造技术以及实际的光通信网络需求的限制,因此还需要进一步研究降低量子信道的干扰噪声的方案。

本文将围绕量子信号与经典光信号共纤传输系统中的拉曼散射噪声与四波混频噪声对 QKD 系统性能的影响进行理论分析与数值仿真。在此基础上,针对不同信道间隔和不同传输距离的应用场景分别提出一种基于非等间隔波长分配的四波混频噪声抑制算法以及一种针对四波混频和拉曼散射噪声进行联合优化的波长分配算法,并对两种算法的性能进行了仿真验证。研究结果将为未来不同应用场景,例如多维全光网^[25]所支持的云计算和物联网应用,提供基于量子信号与经典光信号共纤传输的安全通信技术方案。

2 四波混频与拉曼散射对共纤传输系统的影响

本节将分别研究量子信号与经典光信号共纤传输系统中四波混频与拉曼散射两种噪声的功率大小以及在 QKD 接收端接收到的光子数,在此基础上对两种噪声造成的 QKD 系统误码率进行数值仿真分析。

2.1 四波混频噪声理论分析

四波混频是光纤中不同波长的光波相互作用而导致在其他波长上产生新光波的一种非线性效应^[27]。假设 3 个光信道频率分别为 f_i 、 f_j 、 f_k ($k \neq i, j$), 则四波混频产生的新频率为:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (1)$$

当产生的噪声频率恰好与量子信道频率相同时,四波混频噪声将成为带内噪声而无法通过滤波器滤除。四波混频产生的新频率的峰值功率

P_{ijk} 为^[26]:

$$P_{ijk} = \frac{\eta D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L}}{9\alpha^2} [1 - e^{-\alpha L}]^2 \quad (2)$$

其中, P_i 、 P_j 、 P_k 分别为输入信号的功率, α 为光纤损耗, L 为传播距离, γ 为光纤的非线性系数, D 为四波混频简并因子。如果 3 个输入信号的频率互不相等, 则 D 的值取 6, 如果只有两个不同的频率, 即 $f_i = f_j$, 则 D 的值取 3。四波混频效率 η 为^[27]:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{1 - e^{-\alpha L}} \right) \quad (3)$$

其中:

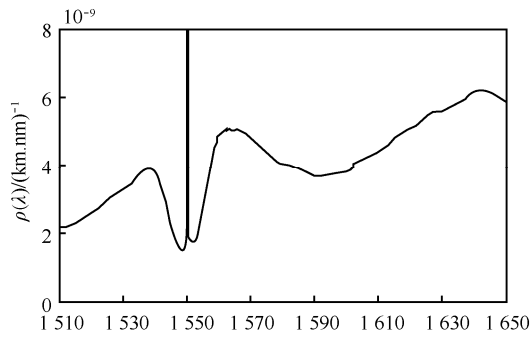
$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda^2}{c} |f_i - f_k| |f_j - f_k| \left(D_c + \frac{dD_c}{d\lambda} \left(\frac{\lambda^2}{2c} \right) (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right) \quad (4)$$

其中, $\Delta\beta$ 为相位匹配因子, λ 为波长, c 为光速, D_c 为光纤的色散系数, $dD_c/d\lambda$ 为光纤色散系数的斜率。

从以上分析可以看出, 四波混频效率与系统中众多参数相关, 通过增大信道间隔和色散管理技术能够降低四波混频产生的噪声功率^[28]。除此之外, 也可以通过设计合适的量子信道和经典光信道之间的频率间隔和信道位置, 从而避免四波混频噪声落在量子信道^[21,29]。

2.2 拉曼散射噪声理论分析

拉曼散射是指在光纤中传输的光子与介质发生非弹性的相互作用, 从而发出与入射光频率不同的光辐射的现象^[13]。拉曼散射产生的噪声光谱是连续的, 频谱宽度可达到 200 nm, 因此对于 C 波段的 DWDM 复用系统来说拉曼散射噪声会覆盖量子信道。拉曼散射噪声的功率与拉曼散射因子有关, 参考文献[14]通过实验测量了泵浦光中心波长为 1 550 nm 时不同波长处的拉曼散射因子大小, 如图 1 所示。

图1 1550 nm 泵浦光条件下拉曼散射因子测量值^[14]

从图1可以看出,在C波段的范围内,尽量靠近泵浦光的波长处的拉曼散射因子最小^[20]。假设经典光信号和量子信号的波长分别为 λ_c 和 λ_q ,信道的带宽为 $\Delta\lambda$,则经典光信号在量子信道产生的拉曼散射噪声功率为^[13-14]:

$$P_{\text{ram}} = P \cdot e^{-\alpha L} \cdot L \cdot \rho(\lambda_c, \lambda_q) \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

其中, P 代表经典光信号的功率。拉曼散射因子 $\rho(\lambda_c, \lambda_q)$ 可以通过平移图1中的泵浦光波长位置得到^[30]。通常根据入射光与散射光的传输方向不同,可以将拉曼散射分为正向拉曼散射和背向拉曼散射,其中散射光与入射光传输方向一致时称为正向拉曼散射,反之则称为背向拉曼散射。前期研究表明,两种散射噪声具有相同的拉曼散射因子,但是二者具有不同的传输特性。随着光纤传输距离的增加,正向拉曼散射噪声先是逐渐增加,在距离为20 km时达到峰值,随后噪声强度又逐渐下降。而背向拉曼散射噪声则是随着光纤

距离的增加一直呈增加的趋势并逐渐饱和,且整体上背向散射噪声一直大于正向散射噪声,因此背向拉曼散射对系统性能会造成更大的干扰^[31]。

2.3 四波混频噪声与拉曼散射噪声对共纤传输系统性能的影响

四波混频噪声与拉曼散射噪声对系统性能的影响与系统的结构密切相关,因此基于QKD系统和经典DWDM光传输系统的现状,本文给出一种量子信号与经典光信号共纤传输系统结构,如图2所示,其中,Laser指激光器;VOA指可调光衰减器;FM指法拉第旋转镜;PM指相位调制器;BS指分束器;CIR指环形器;SPD指单光子探测器;NBF指窄带滤波器。经典DWDM光传输系统中的数据信号需要实现双向的传输;然而对于QKD系统,只需要单向通信即可实现两用户之间的密钥共享。为了避免QKD系统受到背向拉曼散射噪声干扰,在该系统结构中量子信号和与其同向的经典光信号通过DWDM设备复用后在同一根光纤中传输,而与其反向的经典光信号则在另一根光纤中独立传输。另外,在经典光信号的发射端配置了窄带滤波器来滤除信号源的散射噪声;在QKD接收端之前也配置了窄带滤波器来提高隔离度,从而进一步滤除带外噪声。在本系统中假设QKD采用BB84协议,其编解码基于法拉第-迈克尔逊干涉仪(Faraday-Michelson interferometer, FMI)来实现,但是该系统同时也适用

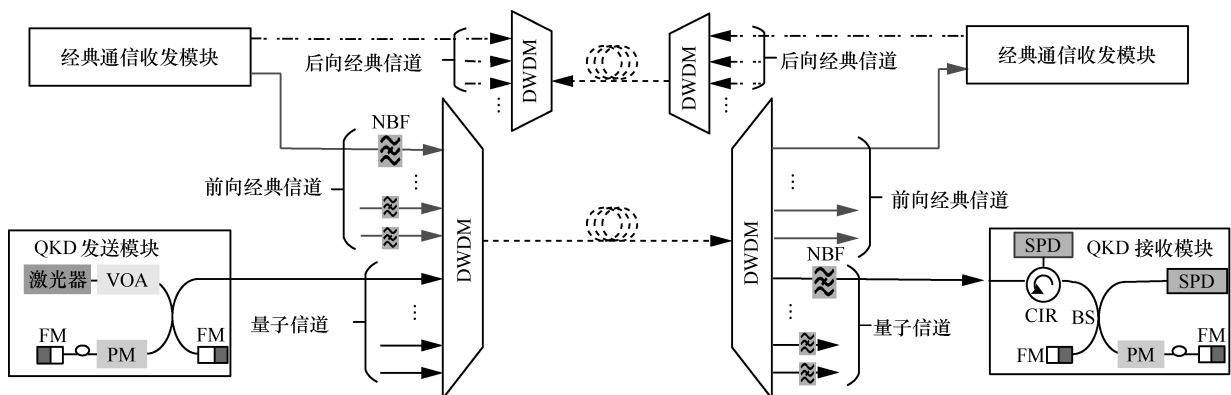


图2 基于DWDM的共纤传输系统示意图

于其他的单向 QKD 编码方案, 如马赫-增德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer) 方案以及差分相位编码方案等。

在式 (2) 及式 (5) 的基础上, 可以推导出在图 2 系统的 QKD 接收端的 SPD 探测到的拉曼散射噪声及四波混频噪声光子数如下:

$$p_{\text{ram}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{ram}} \lambda_q}{hc} \tau_{\text{gate}} \eta_{\text{spd}} f_s 10^{-0.11L} \quad (6)$$

$$p_{\text{fwm}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{fwm}} \lambda_q}{hc} \tau_{\text{gate}} \eta_{\text{spd}} f_s 10^{-0.11L} \quad (7)$$

其中, QKD 系统的 FMI 引入了 1/2 的损耗, h 代表普朗克常数, c 代表光速, τ_{gate} 代表 SPD 的门宽, η_{spd} 代表 SPD 的探测效率, f_s 代表系统的重复频率, IL 为系统中光纤接头及器件带来的总的插入损耗 (图 2 中, 同步光信号与协商信号均视为经典信号, 不再单独标出)。

根据式 (6) 及式 (7) 可以对拉曼散射与四波混频噪声在不同应用场景 (在本文中主要分析对信道间隔和传输距离有不同要求的应用场景) 下的性能进行仿真分析。假设系统中的光纤类型为目前应用广泛的标准单模光纤 (standard single mode fiber, SSMF), 仿真参数的选择见表 1。仿真中假设系统中量子信道的波长为 1 549.32 nm, 经典光信道有 3 个, 其波长与量子信道相邻并高于量子信道, DWDM 系统采用传统的等信道间隔方式, 其信道间隔参照经典光通信系统的现状, 分为 0.8 nm (对应 100 GHz) 或 1.6 nm (对应 200 GHz) 两种情况。

表 1 主要的仿真参数

参数	数值
SPD 门宽 (τ_{gate})	125 ps
SPD 探测效率 (η_{spd})	10%
重复频率 (f_s)	10 MHz
量子信道滤波器带宽 ($\Delta\lambda$)	0.12 nm
系统插入损耗 (IL)	8 dB
经典光信号功率 (P)	0 dBm

在光纤长度及信道间隔情况下, QKD 接收端的 SPD 探测到的拉曼散射噪声及四波混频噪声光子数仿真结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在 100 GHz 信道间隔下, 四波混频噪声在 50 km 传输范围内均大于拉曼散射噪声, 此时四波混频噪声为主要的干扰因素。当信道间隔增加至 200 GHz 时, 四波混频噪声显著下降, 而此时拉曼散射噪声却略高于 100 GHz 信道间隔的情况, 这是由于拉曼散射噪声功率在远离泵浦光频率时会增大。此外, 在 200 GHz 信道间隔下, 10 km 以上传输范围的拉曼散射噪声始终大于四波混频噪声, 是影响 QKD 系统的主导噪声源。

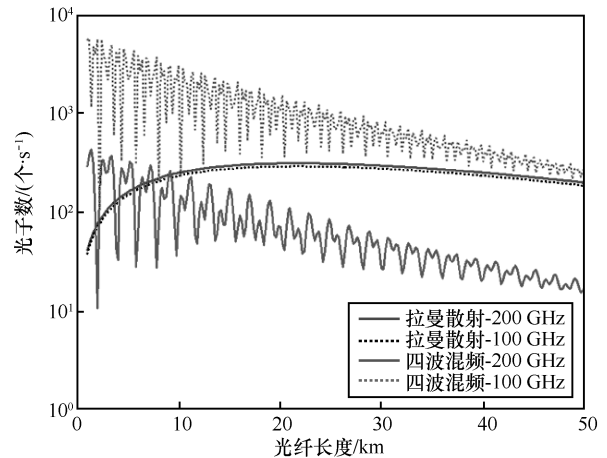


图 3 不同光纤长度及信道间隔下的拉曼散射噪声及四波混频噪声

为了进一步评估两种噪声对 QKD 系统性能的影响, 本文对图 2 所示系统的量子误码率 (quantum bit error rate, QBER) 进行了数值仿真。系统 QBER 的定义是发生错误的量子比特数占探测到的比特总数的百分比, 总的 QBER 通常由干涉环的光学误码率 QBER_{opt} 、暗计数误码率 $\text{QBER}_{\text{dark}}$ 、拉曼散射噪声误码率 QBER_{ram} 以及四波混频噪声误码率 QBER_{fwm} 组成。本节的研究重点为四波混频及拉曼散射噪声带来的 QBER, 可以推导出其计算式如下:

$$\text{QBER}_{\text{fwm}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{qp_{\text{fwm}}}{R_{\text{sift}} + 2qf_s p_{\text{dark}} + qp_{\text{fwm}} + qp_{\text{ram}}} \quad (8)$$



$$QBER_{\text{ram}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{qp_{\text{ram}}}{R_{\text{sift}} + 2qf_s p_{\text{dark}} + qp_{\text{fwm}} + qp_{\text{ram}}} \quad (9)$$

$$R_{\text{sift}} = \frac{1}{2} \cdot q\mu\eta_{\text{spd}} f_s 10^{-0.1(\alpha L + \text{IL})} \quad (10)$$

其中, $q=0.5$, 为 BB84 协议的效率; R_{sift} 为对基之后每秒产生的原始量子密钥数, 如式 (10) 所示, 其中 μ 为量子信号每脉冲平均光子数, 出于安全性考虑, $\mu=0.4$; p_{dark} 代表一个 SPD 中发生在脉冲持续时间内的暗计数概率, 本文中 $p_{\text{dark}} = 4 \times 10^{-6}$ 。

基于以上计算式, 本文仿真了不同传输距离及信道间隔条件下的 $QBER_{\text{ram}}$ 以及 $QBER_{\text{fwm}}$, 如图 4 所示。可以看出, 四波混频噪声在频率间隔为 100 GHz 时引入的噪声较大, 且在 7 km 以下的传输范围内引入的 QBER 超过了 11% (通常情况下 QKD 系统能正常工作的门限值); 而拉曼散射噪声引入的 QBER 在 100 GHz 信道间隔下始终小于 3%, 远小于 $QBER_{\text{fwm}}$ 。当频率间隔为 200 GHz 时, $QBER_{\text{fwm}}$ 明显降低, 在 50 km 的传输范围内始终小于 1.5%; 而 $QBER_{\text{ram}}$ 随着传输距离的增加而增加, 在传输距离超过 10 km 的条件下 $QBER_{\text{ram}}$ 要大于 $QBER_{\text{fwm}}$ 。

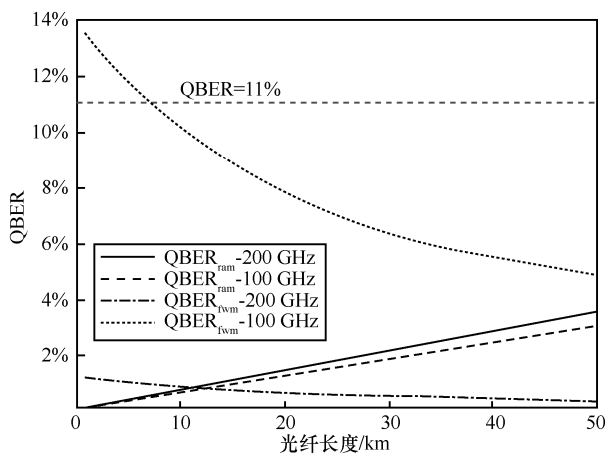


图 4 不同光纤长度及信道间隔下的拉曼散射噪声及四波混频带来的 QBER 大小

综上, 量子信号与经典光信号共纤传输系统中的四波混频噪声与拉曼散射噪声会带来误码,

从而影响系统性能, 并且通过分析可知, 两种噪声的特性与信道间隔和传输距离紧密相关。目前商用的 DWDM 系统的信道间隔通常为 100 GHz 和 200 GHz, 在信道间隔为 100 GHz 情况下, 四波混频噪声在干扰因素中占据主导地位; 在信道间隔为 200 GHz 情况下, 拉曼散射将成为主要的干扰因素。因此需要针对不同的应用场景提出有针对性的噪声抑制方案。

3 共纤传输系统中噪声抑制方案的提出与性能评价

通过前面的分析可知, 量子信号与经典光信号共纤传输系统中的信道间隔会影响量子信道中四波混频噪声与拉曼散射噪声的大小, 信道间隔越小, 四波混频的噪声功率越大^[21]; 信道间隔越大, 能够容纳的信道数越少, 将导致系统传输容量降低。因此如何从信道间隔的角度考虑和设计合适的波长分配方案, 以降低量子信号受到的干扰、提高量子密钥分配的效率以及增加系统容量, 是解决量子信号与经典光信号共纤传输的关键。本文将针对密集间隔 (此处定义为 100 GHz 及以下) DWDM 场景及稀疏间隔 (此处定义为 200 GHz 及以上) DWDM 场景分别提出一种基于非等间隔波长分配的四波混频噪声抑制方案以及一种针对四波混频和拉曼散射进行联合优化的波长分配方案, 并通过仿真分析了提出的方案在不同场景下的优越性。

3.1 适用于密集间隔 DWDM 场景的非等间隔波长分配方案

在密集间隔 DWDM, 即信道间隔为 100 GHz 或更小的场景下, 四波混频噪声是共纤传输系统的主要干扰因素, 针对这一应用场景, 在非等间隔 (unequal frequency spacing, UFS) 波长分配算法^[21]基础上设计了一种基于非等间隔波长分配的四波混频噪声抑制方案。

对于传统的等信道间隔 WDM 系统来说, 由

式(1)可得 $f_{ijk} - f_i = f_j - f_k$, 可见, 当两对信道之间的频率间隔相等时, 四波混频产生的新频率一定会与原有的信道频率重合, 也必然会对该频率上的信号产生干扰。因此, 要想使共纤传输系统免受四波混频的影响, 必须保证任意两对信道之间的频率间隔互不相等, 则此时四波混频产生的新频率必然不会与原来的信号频率重合, 之后只需利用窄带滤波器将产生的新频率噪声滤除掉即可避免四波混频对系统的影响。该方案的基本思想如图5所示。

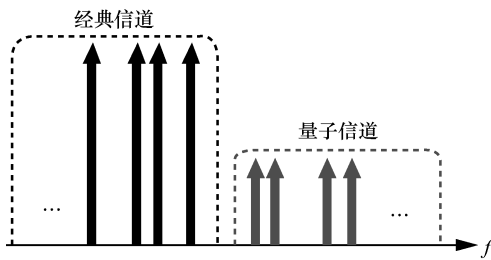


图5 非等间隔波长分配方案示意图

在实际应用时, 将所有信道置于 1 550 nm 的低损耗波段以降低光纤损耗对信号的影响。该方案的两个主要优点为: 量子信道与经典光信道位于两个相邻的波段, 量子信道位于高频部分, 经典光信道位于低频部分, 以尽可能减少相邻信道串扰噪声和拉曼散射噪声; 任意两对信道之间的频率间隔互不相等, 以避免四波混频噪声干扰。因此该方案的关键步骤是计算出满足所有信道非等间隔要求的信道间隔。对于有共计 N 个信道的共纤传输系统来说, 该问题可以简化为寻找 $N-1$ 个连续整数的分布问题, 可以利用整数线性规划问题的求解方式进行求解, 在本文中不再赘述。对于求解得到的一组可行的满足非等间隔要求的正整数 $n_i (i \in [1, 2, \dots, N-1])$, 则最终的信道间隔为 $n_i \cdot \Delta f (i \in [1, 2, \dots, N-1])$, Δf 为波分复用系统能够实现的最小频率间隔。

3.2 适用于稀疏间隔 DWDM 场景的联合优化波长分配方案

拉曼散射噪声功率随着信道间隔的增加而增

加, 因此对于 200 GHz 及以上的稀疏间隔 DWDM 复用系统来说, 不仅要考虑如何降低四波混频噪声, 还需要进一步降低拉曼散射噪声对系统的影响。因此, 本文针对这一应用场景提出了一种四波混频与拉曼散射联合优化的波长分配 (joint optimized channel allocation, JOCA) 算法。

首先, 为了抑制四波混频噪声, 在该方案中采取量子信道与经典光信道穿插的波长分配方式, 并确定经典光信道及预留量子信道的频率分配。其数学描述如下。

假设共纤传输系统中共有 N 个经典光信道, M 个量子信道, 其信道频率分别用集合 $C = \{f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cN}\}$ 及 $Q = \{f_{q1}, f_{q2}, \dots, f_{qM}\}$ 来表示。经典光信道以相等的信道间隔排列, 若假设初始频率为 f_0 , 经典光信道间隔为 Δf_c , 则每个经典光信道的频率, 即集合 C 中的每个元素可以表示为:

$$f_{cn} = f_0 + (n-1) \times \Delta f_c \quad (n = [1: N]) \quad (11)$$

将经典光信道均匀放置之后, 下一步是将量子信道穿插到经典光信道之间。假设两相邻经典光信道之间插入的量子信道个数为 Δa , 则经典光信道的信道间隔 Δf_c 被分割为更小的频隙, 以 Δf_q 表示并且满足 $\Delta f_q = \Delta f_c / (\Delta a + 1)$ 。可以看出, 所有经典光信道之间的频隙都可以用来分配量子信道, 本文将这些频隙称为预留量子信道, 用集合 Q_r 来表示, 则每一个预留量子信道的频率, 即 Q_r 中的元素可以表示为:

$$f_{rqnm} = f_0 + m \times \Delta f_q + (n-1) \times \Delta f_c \quad (m = [1: \Delta a], n = [1: N]) \quad (12)$$

下面将理论分析该方案对于四波混频噪声的抑制。首先, 根据式(11)可以推导出仅由经典光信号产生的四波混频噪声的频谱分布情况为:

$$f_{ijk} = f_{ci} + f_{cj} - f_{ck} = f_0 + (n_i + n_j - n_k) \times \Delta f_c \quad (i, j \neq k) \quad (13)$$

该四波混频噪声频率满足:

$$f_{ijk} - f_0 \equiv 0 \pmod{\Delta f_c} \quad (14)$$



根据式 (12) 可知, 预留量子信道满足:

$$f_{rqnm} - f_0 \equiv m \times \Delta f_q \pmod{\Delta f_c} \quad (15)$$

因此, 从式 (14) 及式 (15) 可以看出, 仅由经典光信号产生的四波混频噪声不会落在预留量子信道上。虽然本方案无法保证所有的四波混频噪声均不落在预留的量子信道上 (由经典光信号和量子信号共同产生的四波混频噪声可能会落在预留量子信道上), 但是量子信号的功率比经典光信号功率低大约 80 dB, 这也就意味着由量子信号参与产生的四波混频噪声功率比仅由经典光信号产生的四波混频噪声功率至少低 80 dB, 与仅由经典光信号产生的四波混频噪声相比可以忽略不计, 因此可以说本方案去除了绝大部分的四波混频噪声。

下一步的重点是在预留量子信道中选择最优的信道作为最终的量子信道。在选择过程中主要考虑信道的拉曼散射噪声大小。由前面的分析可知, 距离经典光信道较近的信道中拉曼散射噪声功率较小, 而经典光信道之间插入的量子信道数目即 Δa 会影响量子信道与经典光信道之间的距离, 因此需要根据实际情况选择合适的 Δa 的值。由于拉曼散射功率谱难以用数学公式进行描述, 因此本文中根据给定的信道间隔、量子信道数目及经典光信道数目采取遍历的方式寻找最优的 Δa 值。在确定最优 Δa 值之后, 还需要对所有预留量子信道上的拉曼散射噪声进行计算, 找出噪声功率最低的 M 个信道作为最终的量子信道。

为了更清晰地说明本方案, 下面以 5 个量子信道、4 个经典光信道, $\Delta f_q = 100$ GHz 的情况为例, 进行联合优化的信道分配方案如图 6 所示。首先通过遍历的方式选择出最优的 Δa 的值为 2。

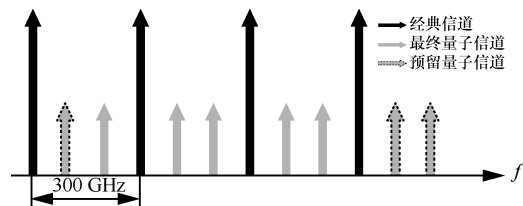


图 6 联合优化波长分配方案示意图

3.3 仿真分析及结果讨论

为了验证所提方案在不同场景下的优越性, 本文将分别在信道间隔为 100 GHz 和 200 GHz 情况下对不同方案带来的系统 QBER 进行仿真分析, 并与传统的等间隔 (equal frequency spacing, EFS) 波长分配方案^[13-14,16] 进行对比。在仿真中假设有 3 路经典光信道和 3 路量子信道。不同的信道分配方案见表 2。需要注意的是, 对于 UFS 方案而言, 下文中信道间隔的含义为等效信道间隔或平均信道间隔。

在仿真中经典光信号的功率为分别为 0 dBm 与 3 dBm, 其中 0 dBm 对应着经典光通信中 1 Gbit/s 的 OOK 信号平均功率, 当信号带宽进一步增大时, 经典光信号的功率也会进一步增大, 因此通过对不同功率条件下 QBER 的仿真能够对各个方案与高速经典光通信的兼容能力进行评价。仿真结果如图 7 所示。从图 7 中看出当信道间隔

表 2 不同的信道分配方案

		经典光信道间隔为 100 GHz	经典光信道间隔为 200 GHz
EFS	经典光信道	193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz	192.9 THz, 193.1 THz, 193.3 THz
	量子信道	193.5 THz, 193.6 THz, 193.7 THz	193.5 THz, 193.7 THz, 193.9 THz
UFS	经典光信道	193.2 THz, 193.275 THz, 193.375 THz	192.9 THz, 193.05 THz, 193.25 THz
	量子信道	193.5 THz, 193.65 THz, 193.7 THz	193.5 THz, 193.8 THz, 193.9 THz
JOCA	经典光信道	193.2 THz, 193.3 THz, 193.4 THz	192.9 THz, 193.1 THz, 193.3 THz
	量子信道	193.25 THz, 193.35 THz, 193.45 THz	193 THz, 193.2 THz, 193.4 THz

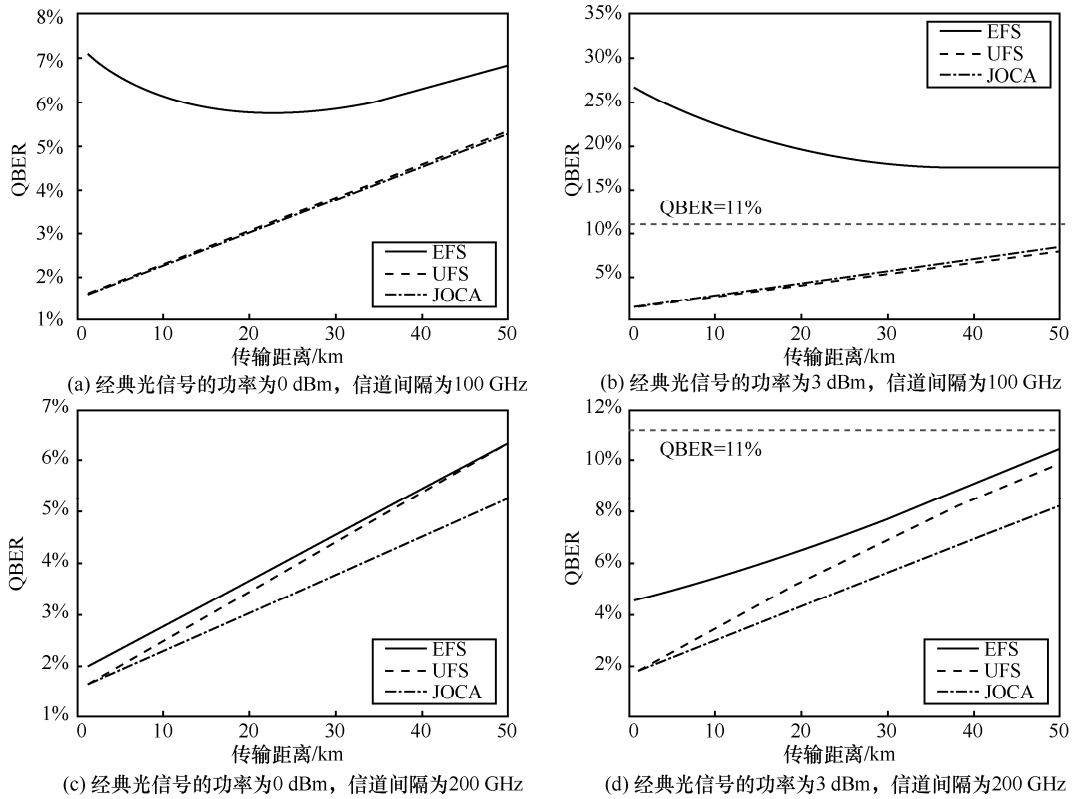


图7 QBER与传输距离及信道间隔关系

为 100 GHz 时, UFS 方案与 JOCA 方案均能有效降低系统的 QBER, 并且两种方案达到的效果基本一致。当经典光信号的功率增加至 3 dBm 时, 传统的 EFS 方案中 QBER 始终高于 11%, 而本文提出的两种方案均能保证系统在至少 50 km 范围内实现正常的量子密钥分配。在这一场景下, 虽然两种提出的方案具有相同的性能, 但是考虑到 JOCA 算法较为复杂, 且在该方案中量子信号与经典光信号的信道间隔要小于 UFS 方案, 为了达到足够的隔离度来避免串扰噪声的干扰, 对系统中的 DWDM 器件及滤波器的性能要求很高, 因此在密集间隔 DWDM 应用场景下 UFS 方案成为了更好的选择。当信道间隔为 200 GHz 时, 虽然 UFS 方案和 JOCA 方案的性能均优于 EFS 方案, 但是 JOCA 方案能够实现更低的误码率, 优势更加明显。因此, JOCA 方案更适合在稀疏间隔 DWDM 应用场景下使用。

4 结束语

实现量子信号与经典光信号共纤传输的主要挑战在于如何减小量子信号受到的经典光信号的干扰, 从而提高量子密钥分配系统的性能。针对这一问题, 本文首先分析了量子信号与经典光信号共纤传输系统中的两种主要的噪声源, 即四波混频与拉曼散射, 并对这两种噪声的特性及对共纤传输系统量子误码率的影响进行了数值推导与仿真分析。在此基础上, 本文提出了一种基于非等间隔的四波混频噪声抑制波长分配方案以及一种针对四波混频与拉曼散射联合优化的波长分配方案。在信道间隔为 100 GHz 及以下的密集间隔 DWDM 场景下, 主要的噪声源为四波混频噪声, 因此非等间隔方案能够很好地适用于这一应用场景。而对于信道间隔为 200 GHz 及以上的稀疏间隔 DWDM 系统, 拉曼散射噪声成为了主要的噪



声源，因此需要更为复杂的联合优化波长分配方案来同时降低四波混频噪声以及拉曼散射噪声。最后本文在不同场景下仿真分析了所提出的两种方案，并与传统方案进行对比，验证了方案的优越性。通过本文的研究，为未来在经典光网络中承载量子密钥分配系统提供了可行的共纤传输噪声抑制方案。

参考文献：

- [1] GISIN N, RIBORDY G, TITTEL W, et al. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145-195.
- [2] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[C]//IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, December 10-12, 1984, Bangalore, India. Piscataway: IEEE Press, 1984: 175-179.
- [3] COMANDAR L C, DYNES J F, SHARPE A W, et al. Giga-hertz-gated InGaAs / InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8): 3109.
- [4] HE D Y, WANG S, CHEN W, et al. Sine-wave gating InGaAs/InP single photon detector with ultralow afterpulse[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(11): 111104..
- [5] ETCHEVERRY S, CAÑAS G, GÓMEZ E S, et al. Quantum key distribution session with 16-dimensional photonic states[J]. *Science Reports*, 2013(3): 2316.
- [6] YIN Z Q, WANG S, CHEN W, et al. Improved security bound for the round-robin-differential-phaseshift quantum key distribution[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 457.
- [7] YIN H L, CHEN T Y, YU Z W, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [8] TANAKA A, FUJIWARA M, YOSHINO K I, et al. High-speed quantum key distribution system for 1-Mbit/s real-time key generation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2012, 48(4): 542-550.
- [9] DYNES J F, TAM W W S, PLEWS A, et al. Ultra-high bandwidth quantum secured data transmission[J]. *Science Reports*, 2016(6): 35149.
- [10] TOWNSEND P. Simultaneous quantum cryptographic key distribution and conventional data transmission over installed fibre using wavelength-division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(3): 188-190.
- [11] WANG L J, ZOU K H, SUN W, et al. Long-distance copropagation of quantum key distribution and terabit classical optical data channels[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(1): 012301.
- [12] MAO Y, WANG B X, ZHAO C, et al. Integrating quantum key distribution with classical communications in backbone fiber network[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6010-6020.
- [13] PETERS N A, TOLIVER P, CHAPURAN T E, et al. Dense wavelength multiplexing of 1 550 nm QKD with strong classical channels in reconfigurable networking environments[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(4): 045012.
- [14] ERAERDS P, WALENTA N, LEGRÉ M, et al. Quantum key distribution and 1 Gbps data encryption over a single fibre[J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 063027.
- [15] MORA J, AMAYA W, RUIZ-ALBA A G, et al. Simultaneous transmission of 20x2 WDM/SCM-QKD and 4 bidirectional classical channels over a PON[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16358-16365.
- [16] PATEL K A, DYNES J F, LUCAMARINI M, et al. Quantum key distribution for 10 Gb/s dense wavelength division multiplexing networks[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 051123.
- [17] WANG L J, CHEN L K, JU L, et al. Experimental multiplexing of quantum key distribution with classical optical communication[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 081108.
- [18] FRÖHLICH B, LUCAMARINI B, DYNES J F, et al. Long-distance quantum key distribution secure against coherent attacks[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 163-167.
- [19] 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.
- [20] DA SILVA T F, XAVIER G B, TEMPORAO G P, et al. Impact of Raman scattered noise from multiple telecom channels on fiber-optic quantum key distribution systems[J]. *Journal of Light Technology*, 2014, 32(13): 2332-2339.
- [21] SUN Y L, LU Y S, NIU J N, et al. Reduction of FWM noise in WDM-based QKD systems using interleaved and unequally spaced channels[J]. *Chinese Optic Letters*, 2016, 14(6): 060602.
- [22] 赖俊森, 吴冰冰, 汤瑞, 等. 量子通信应用现状及发展分析[J]. *电信科学*, 2016, 32(3): 123-129.
- [23] LAI J S, WU B B, TANG R, et al. Analysis on the application and development of quantum communication [J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(3): 123-129.
- [23] ALEKSIC S, WINKLER D, HIPPEL F, et al. Towards a smooth integration of quantum key distribution in metro networks[C]//2014 International Conference on Transparent Optical Networks, July 6-10, 2014, Graz, Austria. Piscataway: IEEE

- Press, 2014: 1-4.
- [24] RUNSER R J, CHAPURAN T, TOLIVER P, et al. Progress toward quantum communications networks: opportunities and challenges[C]//Optoelectronic Integrated Circuits IX. International Society for Optics and Photonics, February 9, 2007, San Jose, California, USA. Bellingham: SPIE Press, 2007: 647601.
- [25] JI Y F, ZHANG J W, ZHAO Y L, et al. Prospects and research issues in multi-dimensional all optical networks[J]. Science China-Information Sciences, 2016, 59(10): 101301.
- [26] KAMINOW I P, KOCH T L. Optical fiber telecommunications IIIA: third edition[M]. Amsterdam: Elsevier Inc, 2012.
- [27] SHIBATA N, BRAUN R P, WAARTS R G. Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber[J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1987, 23(7): 1205-1210.
- [28] UDDIN M F, DOULAH A B M N, HOSSAIN A, et al. Reduction of four wave mixing effect in an optical WDM system by controlling channel spacing and chromatic dispersion[J]. Optical Engineering, 2003, 42(9): 2761-2767.
- [29] FORGHIERI F, TKACH R W, CHRAPLYVY A R, et al. Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unequally spaced channels[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(6): 754-756.
- [30] BAHRAANI S, RAZAVI M, SALEHI J A. Wavelength assignment in hybrid quantum-classical networks[J]. Science Reports, 2018, 8(1): 3456.
- [31] PATEL K A, DYNES J F, CHOI I, et al. Coexistence of

high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber[J]. Physics Review X, 2012, 2(4): 041010.

[作者简介]



孙咏梅（1971-），女，博士，北京邮电大学教授，主要研究方向为光网络技术、量子密钥分配技术与经典光网络技术的融合。



牛佳宁（1992-），女，北京邮电大学博士生，主要研究方向为量子密钥分配技术与经典光网络技术的融合。



纪越峰（1960-），男，博士，北京邮电大学教授，主要研究方向为宽带通信系统和网络技术。