



专题：量子保密通信技术与应用

量子密钥分发和经典光通信波分复用共纤传输研究

钱懿, 林翔宇, 王东, 胡小豹, 陈金剑, 陈文皓

(浙江九州量子信息技术股份有限公司, 浙江 杭州 311215)

摘要: 研究了量子密钥分发和经典光通信波分复用共纤传输的技术难点和可行性。基于系统重复频率 40 MHz 的诱骗态相位编码 BB84 协议量子密钥分发设备, 提出了 3 种量子信号与经典光信号的波分复用共纤传输方案: 单纤双向 CWDM 共纤传输方案, 复用 1 550.12 nm 波长量子信号、1 310 nm 波长时钟信号以及正向 1 590 nm 波长 100 Mbit/s 速率光信号和反向 1 610 nm 波长 100 Mbit/s 速率光信号, 光纤传输距离 70 km 下密钥成码率达到 1.2 kbit/s; 双纤双向 CWDM 共纤传输方案, 复用 1 550.12 nm 波长量子信号、1 610 nm 波长时钟信号以及 1 个波长的同向光信号在 1 310 nm 波长 OOK 光信号速率 10 Gbit/s, 光纤传输距离 55 km 下, 密钥成码率达到 1.58 kbit/s; 双纤双向 DWDM 共纤传输方案, 复用 1 550.12 nm 波长量子信号、1 610 nm 波长时钟信号以及 2 个同向波长各自为 1 551.72 nm 和 1 552.52 nm, 并模拟 100 Gbit/s 相干光通信 DP-QPSK 信号接收功率, 光纤传输距离 70 km 下, 密钥成码率达到 1.16 kbit/s。

关键词: 量子密钥分发; 传统光通信; 波分复用; 城域网

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018258

Study of “quantum + classical” wavelength division multiplexing technique in optical network

QIAN Yi, LIN Xiangyu, WANG Dong, HU Xiaobao, CHEN Jinjian, CHEN Wenhao

Zhejiang Quantum Technologies Co., Ltd., Hangzhou 311215, China

Abstract: The co-propagation of quantum key distribution (QKD) and classical optical communication via wavelength division multiplexing (WDM) was studied, based on 40 MHz system clock decoy BB84 QKD. In the bi-directional CWDM scheme, 1.2 kbit/s key generation rate was achieved while the quantum wavelength (1 550.12 nm), synchronization wavelength (1 310 nm), forward direction error-free 100 Mbit/s data wavelength (1 590 nm) and backward direction error-free 100 Mbit/s data wavelength (1 610 nm) were multiplexed over 70 km fiber. In the dual-fiber unidirectional CWDM scheme, 1.58 kbit/s key generation rate was achieved while the quantum wavelength (1 550.12 nm), synchronization wavelength (1 610 nm) and forward direction error-free 10 Gbit/s data wavelength (1 310 nm) were multiplexed over 55 km fiber. In the dual-fiber unidirectional DWDM scheme, 1.16 kbit/s key generation rate was achieved while the quantum wavelength (1 550.12 nm), synchronization wavelength (1 610 nm) and two forward direction error-free 100 Gbit/s DP-QPSK data wavelength (emulated, 1 551.72 nm and 1 552.52 nm) were multiplexed over 70 km fiber.

Key words: quantum key distribution, classical optical communication, wavelength division multiplexing, metropolitan area network

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-09-02

1 引言

量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD), 是一种利用量子力学特性在两个节点之间分发等长的随机数比特串的技术, 所分发的随机数比特串, 具备信息论上的无条件安全性, 可以和目前常用的对称式加密技术 (例如 AES、商密 4、一次一密等) 结合, 增强当前通信网络的安全性等级, 以应对未来的量子算法对传统加密手段带来的潜在威胁^[1-3]。典型的量子密钥分发整体系统三层架构如图 1 所示, 其典型代表是欧盟第六框架计划 (the Sixth Framework Programme for Research, FP6) 资助的维也纳城域量子实验网^[4]。在密钥分发层和密钥管理层, 需要量子信道、同步信道、后处理协商信道、网管信道这些功能信道协同工作, 如果把这些信道都单独配置传输光纤, 那么部署量子密钥分发系统的成本和复杂度都会很高。

学术圈有若干个量子+经典光通信波分复用的代表性工作。2009 年, Chapuran 等人^[5]选择将量子光置于 O 波段的 1 310 nm 处, 与四路 C 波段的经典业务光同向共纤传输, 在长度为 25 km、光纤插入损耗 (简称插损) 为 9 dB@1 550 nm 的链路条件下稳定运行了 4 天, 最终的成码率约

为 1 kbit/s, 平均误码率为 5.9%。2012 年, Patel 等人^[6]使用探测时域门宽为 100 ps, 探测效率为 20% 的单光子探测器, 依靠单光子探测时域滤波手段, 实现了 L 波段单纤双向 1 Gbit/s 业务信号与 C 波段 T12 协议 QKD 系统共纤传输 90 km, 且最终 QKD 的安全成码率为 7.6 kbit/s。2014 年, Choi 等人^[7]采用经典光的功率预衰减和在经典光接收端加放大器的方式, 在现网光纤长度为 26 km, 实际链路插损为 9.6 dB @ 1 550 nm 的情况下, 实现了 4 个 DWDM 波长, 每个波长 NRZ 调制方式的 10 Gbit/s 经典业务与 C 波段 1 GHz 重复频率的 T12 协议 QKD 的量子光+经典光通信共纤传输, 最终获得了 160 kbit/s 安全密钥成码率。

量子密钥分发的协议种类众多^[3], 在同一协议类型下的物理实现方式也有多样性, 例如最为常见的 QKD 协议为诱骗态 BB84 协议, 而实现诱骗态 BB84 协议的物理系统又以相位编码诱骗态 BB84 协议居多^[6-7]。本文研究所涉及的量子密钥分发系统, 是基于相位编码诱骗态 BB84 协议^[8], 会在文章的后续段落里详细描述。

2 经典光与量子光共纤传输产生的影响

经典光与量子光强差异较大, 当经典光与量子光进行波分复用共纤传输时, 较强的经典光信

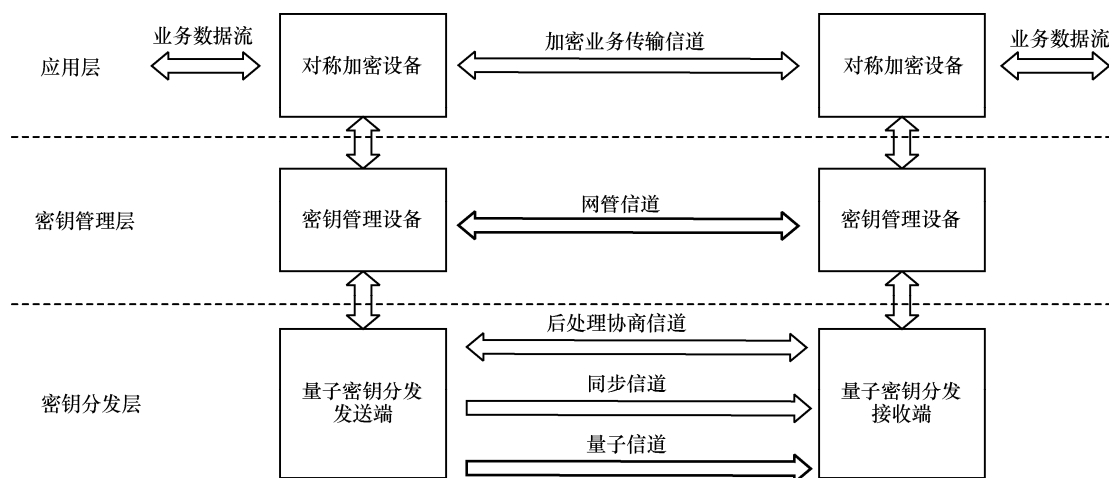


图1 量子密钥分发系统以及应用系统的分层架构



号会对量子信号产生较大的影响，从而导致量子信号的单光子探测器的判决结果里出现较高的量子误码率，由于 QKD 的理论框架里，把所有的误码率贡献都归结于线路窃听者的攻击，则该情况下经典光引发的量子误码率升高会导致 QKD 的传输距离及安全成码率的降低。

经典光与量子光共纤传输带来的噪声来源主要包括以下几个方面。

- 波分复用器件有限的隔离度（典型为相邻通道间 30 dB 隔离度），导致经典光漏至量子光波段，该类噪声属于为带外噪声。解决该影响因素的方法就是提升器件的通道隔离度（ ≥ 80 dB），使得经典光波长的信号被量子探测器的探测响应可以小到被忽略，通常高隔离度的波分复用器件可以通过厂商定制获取，在量子波段的插损相较于普通隔离度的波分复用器件略大，成本尚可。
- 经典光在光纤中传输时的非线性效应而产生新的频率成分，并且其频谱延伸至量子光波长，主要包括拉曼（Raman）散射效应和四波混频效应，四波混频效应在参考文献[5]中有详细讨论，结论是四波混频的贡献远远小于自发拉曼散射，自发拉曼散射源自于拉曼效应，这是经典光与光纤介质分子的相互作用，而产生的拉曼噪声光子，并且噪声光子的频域分布范围较广，可以在噪声源波长的左右 200 nm 带宽延展，且拉曼效应随着光纤长度的增加，效果越明显。在本文的后续段落主要考虑拉曼散射噪声对量子信道产生的影响，并进行详细的理论和实验分析。

2.1 拉曼散射噪声理论计算

对于波长 λ_d 的经典光，其发射功率为 I 时，其在量子光波长 λ_q 处产生的正向拉曼散射强度可由式（1）表示^[6]：

$$I_{\text{Raman}}^f = \beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I e^{-\alpha_q L} \int_0^L e^{(\alpha_q - \alpha_d)l} dl \quad (1)$$

其中， α_d 为经典光波长在光纤中的衰减因子， α_q 为量子光波长在光纤中的衰减因子， L 为光纤长度， $\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta)$ 为拉曼散射系数， δ 为量子信道滤波带宽。

其在量子光波长 λ_q 处产生的反向拉曼散射强度由式（2）表示：

$$I_{\text{Raman}}^b = \frac{\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta)}{\alpha_d + \alpha_q} I (1 - e^{-(\alpha_d + \alpha_q)L}) \quad (2)$$

而对于相同的经典光接收功率 I_R ，正向拉曼散射强度如式（3）。

$$I_{\text{Raman}}^f = \frac{\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I_R}{\alpha_q - \alpha_d} (1 - e^{(\alpha_d - \alpha_q)L}) \quad (3)$$

反向拉曼散射强度由式（4）表示：

$$I_{\text{Raman}}^b = \frac{\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I_R}{\alpha_q + \alpha_d} (e^{\alpha_d L} - e^{-\alpha_q L}) \quad (4)$$

对于相同发射功率的经典光在光纤中传输时对量子信道产生的拉曼散射噪声随光纤长度的关系，在如下环境中做了相关实验。具体光路搭建如图 2（以经典光源使用 CWDM 波长 1 610 nm 的光模块为例）所示。

固定入纤功率情况，正向拉曼散射强度测试链路如图 2（a）所示，经典光通过光衰减器衰减，保证在光纤的入射口处光功率为 -20 dBm，再经过一组波分复用器和光纤，光纤长度的变化范围为 5~90 km。在接收端波分复用器的 1 550 nm 波长出口处级联了一个 1 550.12 nm 中心波长 100 GHz 滤波带宽的滤波器，并使用问天品牌的 WT-SPD300 单光子探测器测量其拉曼散射计数。背向拉曼散射强度测试链路如图 2（b）所示，同样将经典光的入纤功率衰减至 -20 dBm，将经典光从发射端的 1 610 nm 带通口注入，将 1 550.12 nm 中心波长 100 GHz 带宽滤波器与单光子探测器都放置在发射端的波分复用器的 1 550 nm 处，用以测量背向拉曼散射计数。

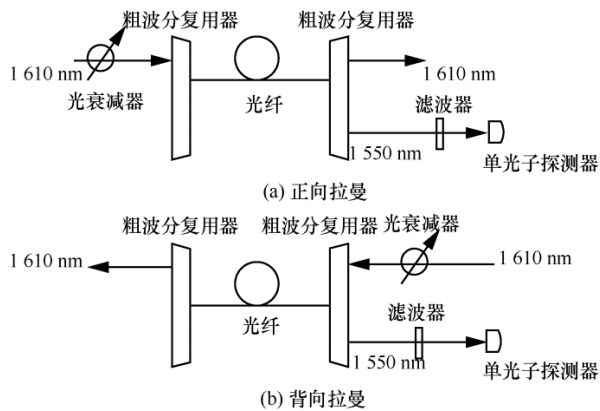


图2 拉曼噪声测试示意图

对于固定经典光出纤功率情况，正向拉曼散射与背向拉曼散射的测试链路搭建与经典光固定入纤功率情况相同。在此情况下需要在经典光的发射端串联可调节光衰减器，以保证经典光在光

纤出射口处的光功率为 -20 dBm。

实验使用 $1\ 310$ nm、 $1\ 590$ nm、 $1\ 610$ nm、 $C30\sim C32$ 、 $C36$ 与 $C37$ 波长的光作为经典光产生的拉曼散射计数。测试 $1\ 310$ nm、 $1\ 590$ nm与 $1\ 610$ nm时采用CWDM作为合波器件，测试 $C30\sim C32$ 、 $C36$ 与 $C37$ 时采用DWDM作为合波器件。由于经典光的光功率均在光纤的入射口与出射口测量，不同的WDM对经典光的插损不影响出射与入射的功率标定。对于不同WDM的量子信道插损与滤波器插损，会影响拉曼散射计数的大小，因此对该插损进行了测量，并根据测量结果对拉曼散射计数进行了补偿。

固定发射功率情况的实验结果如图3所示。固定出射功率情况的实验结果如图4所示。图4(a)

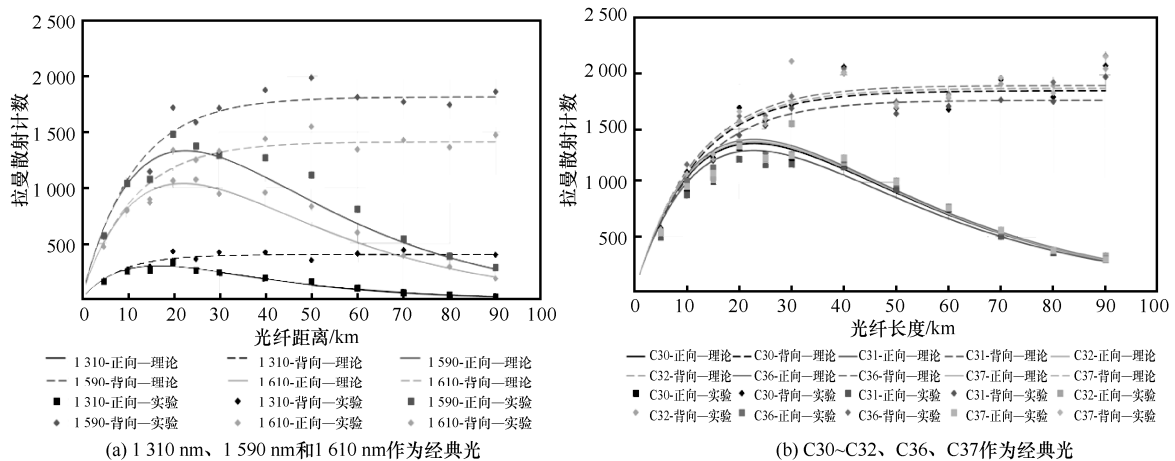


图3 固定入射功率情况下拉曼噪声测试结果

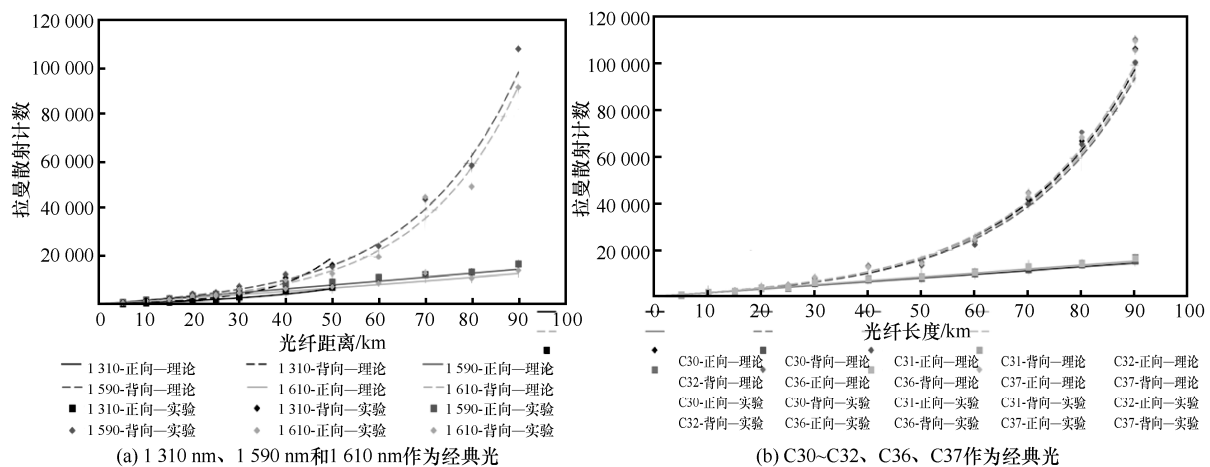


图4 固定出射功率情况下拉曼噪声测试结果



中, 1 310 nm 由于衰减过大, 50 km 以上无法达到 -20 dBm 的出射功率, 因此实验仅测到 50 km。两种情况下, 实验数据与理论曲线均符合得很好。

2.2 拉曼散射噪声与光纤长度的关系

由于实际应用过程中, 必定采用固定接收功率方案, 因此固定发射功率情况本文不做讨论。

由第 2.1 节可知, 固定接收功率情况下, 正向与背向拉曼均随着光纤距离增加而增加 (如图 4 所示)。正向拉曼几乎呈线性增长, 而背向拉曼则呈指数增长。因此, 实际应用中, 需要考虑链路光纤长度, 对于过长的光纤距离, 拉曼散射影响会变得非常大。

2.3 拉曼散射噪声与经典光波长的关系

由第 2.1 节式 (1) ~ 式 (4) 可知, 波长主要影响衰减因子 α_d 以及散射系数 $\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta)$ 。

为了研究 C 波段的经典光在量子光波长 (1 550.12 nm) 产生的拉曼噪声的影响, 本文选取了 1 550.12 nm 两侧的 14 个通道间隔为 100 GHz ITU 标准波长, 并且在靠近波分解复用器端的光纤处设置相同的经典光接收功率, 使用单光子探测器定量的测量经典光在不同光纤长度下对量子光波长造成的拉曼散射噪声计数, 统计结果绘成图 5。从图 5 中可以清楚地看出, 在量子光波长左右两侧分别有一个强度较小的区域坑, 经典光波长如果配置在“坑”内的区域, 在量子光波长处产生的拉曼噪声较小。且在相同的经典光接收功率时, ITU 标准下的 C31 号波长在量子光波长处产生的拉曼噪声计数最小, 即当经典光波长比量子光波长长 3 个 ITU 100 GHz 间隔时, 其在量子光波长处产生最小的拉曼噪声。

此外, 本文还选取了 CWDM 的 3 种波长 1 310 nm、1 590 nm、1 610 nm 以及 C 波段的 5 个波长作为经典光波长, 均在图 6 中光纤输出端以 -30 dBm 的接收功率下使用单光子探测器分别测量它们在不同长度光纤中传输时对量子通道的影响。

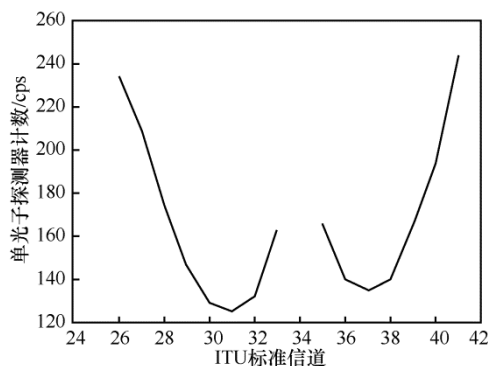


图 5 C 波段部分 ITU 标准波长经典光在量子光波长处产生的拉曼噪声计数

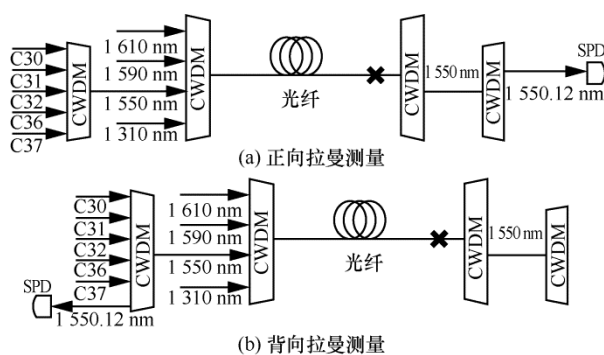


图 6 经典光在量子波长的拉曼噪声测量

从图 7 可以看出, 不论正向拉曼还是背向拉曼, 当光纤长度小于 55 km 时, 1 310 nm 的经典光所产生的拉曼噪声最小, 其他 7 种波长光所带来的拉曼噪声, 1 590 nm 最大, C31 号波长最小, 其余波长产生的拉曼噪声彼此相差不大。随着光纤距离的增加, 除 1 310 nm 以外的经典光, 由于衰减因子 α_d 相差不大, 拉曼散射随距离的增长几乎相同。而 1 310 nm 的经典光, 由于其衰减因子 α_d 远远大于其余波长的经典光, 因此拉曼散射增长非常快。当光纤长度超过 55 km 时, 波长为 1 310 nm 的经典光在量子波长产生的拉曼噪声已经大大超出了其他 7 种波长光所带来的拉曼噪声。此时, 经典光的传输不宜使用该波长。

2.4 光纤链路节点处的衰减对拉曼的影响

和实验室光纤环境不同的是, 由于现实的光纤环境中存在不同程度的光纤跳纤转接和熔接处理, 链路中除了光纤带来的损耗, 还会存在一个

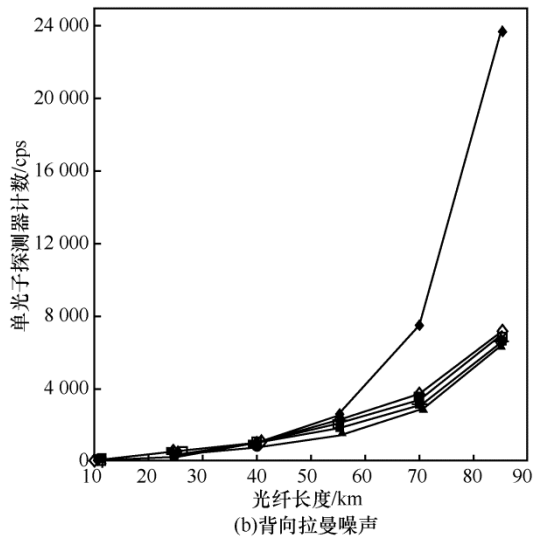
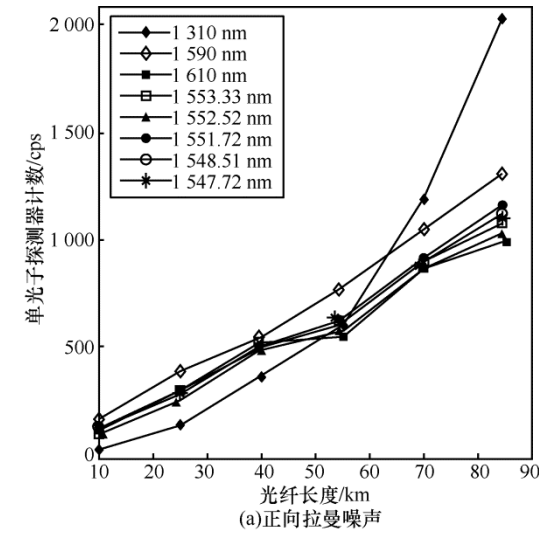


图7 不同波长经典光在量子波长的反向拉曼噪声对比

或多个衰减跳变点。这些衰减跳变点可能会导致固定接收功率的情况下，拉曼散射增大。通过实验模拟实际链路环境，分别测量衰减跳变点位置与衰减大小对正向、背向拉曼散射的影响。

2.4.1 跳变点位置、衰减大小对正向拉曼散射的影响

令衰减跳变点位置为 L' ，衰减大小为 α_{Ext} 。其正向拉曼散射强度可以由式(5)表示：

$$P_{\text{ram}}^f(\lambda, l) = \frac{\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I_R}{\alpha_q - \alpha_d} (1 - e^{(\alpha_d - \alpha_q)L}) \quad (5)$$

其中， $I_R = I e^{-\alpha_d L} e^{-\alpha_{\text{Ext}}}$ ， I_R 表示接收端的经典光

功率。

若存在多个衰减跳变点，令衰减点 n 的位置为 L_n ，其衰减大小为 $\alpha_{\text{Ext}n}$ ，可以得到：

$$P_{\text{ram}}^f(\lambda, l) = \frac{\beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I_R}{\alpha_q - \alpha_d} (1 - e^{(\alpha_d - \alpha_q)L}) \quad (6)$$

其中， $I_R = I e^{-\alpha_d L} e^{-\alpha_{\text{Ext}1}} e^{-\alpha_{\text{Ext}2}} \cdots e^{-\alpha_{\text{Ext}n}}$ ， I_R 表示接收端的经典光功率。

由式(6)可知，在固定接收功率的情况下，正向拉曼散射与衰减跳变点的数量、位置、大小无关。

为了验证式(6)，使用多个光纤盘组成一段光纤环境，通过在不同位置引入衰减并且改变衰减值的大小，测量了在1310 nm波长经典光接收功率相同的情况下，在量子波长产生的拉曼噪声的强度，如图8所示。使用单光子探测器对拉曼噪声进行了定量的测量分析，结果见表1。

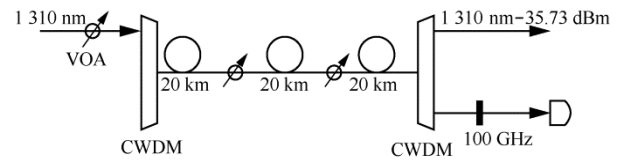


图8 正向拉曼与衰减跳变点位置、大小关系实验示意图

表1 相同接收功率下改变不同位置不同衰减大小时的拉曼噪声

衰减 1/dB	衰减 2/dB	衰减 3/dB	量子通道噪声/cps
2	3	4	419
2	3	3	426
2	4	4	429
1	2	2	431
3	5	2	434
0	5	3	427

表1的数据结果表明，在保证1310 nm波长光的接收功率不变时，改变图8中3个衰减器的衰减值的大小，单光子探测器所探测的噪声计数保持不变。结果表明，固定接收功率时，正向拉曼噪声与衰减点的位置与大小无关。与式(5)、式(6)符合得很好。

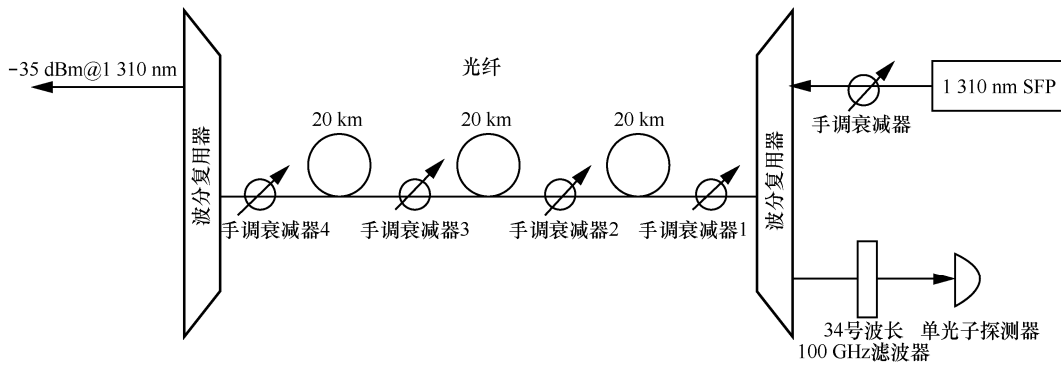


图9 背向拉曼与衰减跳变点位置、大小关系实验示意图

表2 相同接收功率下,不同衰减跳变点位置与大小,背向拉曼噪声计数实验结果

插损位置	额外引入插损 3 dB		额外引入插损 7 dB		额外引入插损 7 dB	
	理论计数	实验计数	理论计数	实验计数	理论计数	实验计数
0	1 208.5	1 102.2	762.5	753.6	481.1	454.2
20	4 499.4	4 728.6	7 031.3	7 109.2	11 081.0	11 216.8
40	4 786.0	4 820.5	7 577.3	7 675	12 004.2	12 007.4
60	4 811.0	4 798.4	7 624.9	7 442.6	12 084.6	11 753.2

2.4.2 跳变点位置、衰减大小对背向拉曼散射的影响

同样地,令衰减跳变点位置为 L' , 衰减大小为 α_{Ext} 。其背向拉曼散射强度可以由式 (7) 表示:

$$P_{\text{ram}}^b(\lambda, l) = \beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I \int_0^{L'} e^{-(\alpha_q + \alpha_d)l} dl + \beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I e^{-2\alpha_{\text{Ext}}} \int_{L'}^L e^{-(\alpha_q + \alpha_d)l} dl \quad (7)$$

通过实验验证式 (7)。实验环境搭建如图 9 所示。

在右侧波分复用器的 1 310 nm 通道内打入 1 310 nm 的经典经典光, 该经典经典光经过 3 段 20 km 光纤, 产生背向拉曼散射, 被右侧波分复用器 1 550 nm 通道处的单光子探测器接收, 得到拉曼计数。首先, 测量了不加任何衰减 (手调衰减器 1~4 衰减均为 0 dB) 时的拉曼计数, 作为计算标准。然后在某一衰减点 (手调衰减器 1~4), 分别引入衰减值 3 dB、5 dB、7 dB, 固定接收功率为 -35 dBm, 测量产生的拉曼计数。实验结果见表 2。

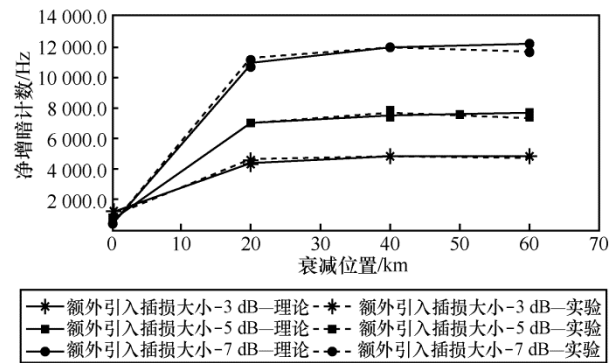


图10 引入不同位置与衰减大小的衰减跳变点,背向拉曼理论公式计算值与实验值比较

图 10 为引入衰减跳变点后,背向拉曼理论计算数据与实验数据的对比。由图 10 可得,实验结果与式 (7) 符合得很好。

将式 (7) 推广至 n 个衰减跳变点, 令衰减点 n 的位置为 L_n , 其衰减大小为 $\alpha_{\text{Ext}n}$, 可以得到:

$$P_{\text{ram}}^b(\lambda, l) = \beta(\lambda_d, \lambda_q, \delta) I \left(\sum_{i=0}^n e^{-2\sum_{j=0}^i (\alpha_{\text{Ext}j})} \int_{L_i}^{L_{i+1}} e^{-(\alpha_q + \alpha_d)l} dl \right) \quad (8)$$

其中, 为了书写方便与格式统一, 规定 $\alpha_{\text{ext}0} = 0$, $L_0 = 0$, $L_{n+1} = L$ 。

2.5 如何减小拉曼散射对量子光的影响

由第 2.1 节可知, 拉曼散射与光纤长度、经典光功率、经典光方向、经典光波长以及量子信道滤波带宽有关。传输距离越长, 光纤中经典光功率越高、量子信道滤波带宽越宽, 受到拉曼散射的影响也就越大。另外, 相同波长经典光产生的正向拉曼散射普遍大于背向拉曼。

目前解决经典光与量子光共纤传输时产生的拉曼噪声有如下几种: 降低经典光的入纤功率^[7], 从而降低经典光产生的拉曼噪声强度; 选择合适的经典光波长, 使得该波长的经典光在量子波长处产生的拉曼噪声较小; 频域滤波^[9]及在量子探测器之前加上合适的窄带滤波器, 使得量子光可以较小的损耗进入探测器, 而阻断一些带内拉曼噪声光进入探测器^[6]; 时域滤波法, 基于拉曼散射光子在时域上均匀分布的特点, 设置较窄的探测器的门宽, 使得量子光到达探测器时刚好可以被检测到, 从而可以阻止一部分拉曼噪声进入探测器内而造成误码^[6]; 采用时分复用的方法^[10], 当经典光的调制方式为二强度高低电平方式 (如 OOK 调制) 时, 发送量子光脉冲的时间与经典光发送低电平的时间重合, 可以降低经典光产生的拉曼噪声对量子光的影响, 该方法只能适用周期性的正向经典光共纤传输 (如同步时钟信号), 而对于数据信号来说实现复杂度较高, 而且不同波长的传播色散不一样导致的拉曼极小时区也会缩窄。

本文主要采用如下几种方法降低拉曼散射的影响。

(1) 降低经典光的功率

一般给定速率的光收发器件, 例如 SFP, 存在一个最小参考接收功率 (即灵敏度), 当接收到的光低于该功率, 会导致误码率高于该速率下的行业标准误码率阈值, 且信号抖动增加。灵敏度与光收发器件的信号速率相关, 例如 100 Mbit/s

SFP 采用 APD 接收探头可以达到 -46 dBm 的灵敏度, 而 1.25 Gbit/s SFP 采用 APD 探头可以达到 -37 dBm 的灵敏度。将经典光接收功率调节至灵敏度附近, 从而完成经典光功率的最优化。

考虑到链路插损会随时间变化 (例如光纤老化) 的问题, 在波分复用设备中采用了经典光发射功率自适应调节方案。该设备能检测接收端的光功率, 并自动调节经典光功率, 保证接收端的光功率在 SFP 的最小接收功率附近。

该方案的主要实施方式如图 11 所示, 在经典光发射端口处连接一个电控光衰减器, 衰减器由发射端共纤传输设备的微控制单元控制衰减值。在经典光的接收侧接入一个分光比为 1:9 的光分束器, 其中 90% 端接入经典光接收器, 10% 端接入一个 PIN 管, 用来监测接收端经典光功率, 并将功率值通过接收端共纤传输设备的微控制单元传至发射端, 通过不断反馈调节发射端的光衰减器, 最终实现经典光的接收功率与设置值相等。该设备不仅可以保证经典光的发射功率最低, 而且能够避免由于光纤链路环境变化所带来的影响。

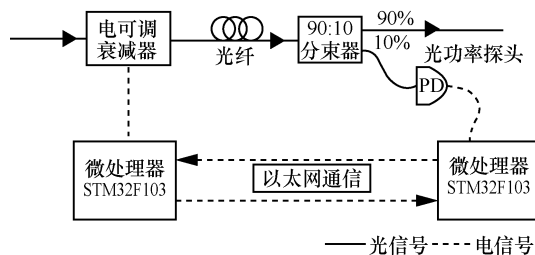


图 11 经典光功率自适应调节共纤传输设备工作原理示意图

(2) 挑选合适的波长

挑选 1 310 nm、1 590 nm、1 610 nm 以及 C 波段的 5 个波长, 包括 C30~C32、C36、C37。详见第 2.2 节。

(3) 时域滤波与频域滤波

时域滤波: 由于拉曼散射过程随机, 其强度在时域上分布均匀。使用的 40 MHz QKD 中的单光子探测器采用时域滤波, 门宽为 300 ps (如图 12 (a) 所示)。仅在量子信号到达的时候进行

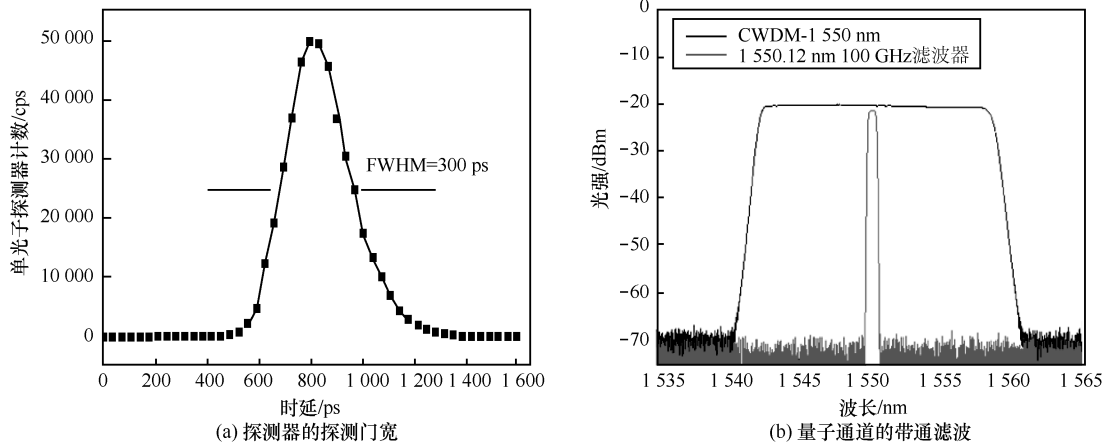


图 12 QKD 接收端的拉曼抑制

探测，将门外的拉曼散射噪声全部滤除。这能够大大降低拉曼散射对量子信号的影响。

频域滤波：拉曼散射为非线性散射，其频谱非常宽。在单光子探测器前，放置了带通滤波器，其中心波长为 1550.12 nm（如图 12（b）所示），与量子信号波长匹配。该滤波器能够有效降低带外的拉曼噪声，从而进一步降低拉曼噪声强度。

（4）优化经典光方向

在系统架构搭建的过程中，尽可能将与量子光同向的信号复用至一根纤中，避免反向信号与量子信号共纤传输。

2.6 QKD 成码与拉曼噪声的关系

本文所研究的诱骗态 BB84 协议 QKD 采用信号态+诱骗态+真空态方案，信号态和诱骗态的平均光子数分别为 μ 、 ν 。使用 GLLP 公式可以仿真出系统的安全密钥率：

$$R = \frac{1}{2} \left\{ \mu e^{-\mu} Y_1 [1 - H(e_1)] - f_{EC} Q_\mu H(E_\mu) \right\} \quad (9)$$

需要估算出 Y_1 、 e_1 以及 Q_μ 和 E_μ 。

不考虑 Bob 端探测器的后脉冲效应时，经过距离为 L 的光纤信道之后，探测器对信号态和诱骗态的总响应率为：

$$Q_{tot} = P_\mu \mu e^{-\alpha_q L \eta_{Bob}} + P_\nu \nu e^{-\alpha_q L \eta_{Bob}} + P_d + P_R(L) \quad (10)$$

其中， P_μ 和 P_ν 分别为 Alice 选择信号态和诱骗态

的比例， η_{Bob} 和 P_d 分别为探测器的探测效率和暗计数率， α_q 为光纤的损耗系数， $P_R(L)$ 表示光纤的拉曼散射，是一个随光纤长度变化的量。

当考虑探测器的后脉冲效应时，对于后脉冲概率为 P_a 的情况，可以分别得到探测器对信号态和诱骗态的响应率：

$$Q_\mu = \mu e^{-\alpha_q L \eta_{Bob}} + P_d + P_R(L) + Q_{tot} P_a \quad (11)$$

$$Q_\nu = \nu e^{-\alpha_q L \eta_{Bob}} + P_d + P_R(L) + Q_{tot} P_a \quad (12)$$

信号态和诱骗态的 QBER 可近似为：

$$E_\mu = e_{opt} + \frac{1}{2} P_a + \frac{1}{2} \frac{P_d + P_R(L)}{Q_\nu - Q_{tot} P_a} \quad (13)$$

$$E_\nu = e_{opt} + \frac{1}{2} P_a + \frac{1}{2} \frac{P_d + P_R(L)}{Q_\nu - Q_{tot} P_a} \quad (14)$$

因此，可以通过诱骗态方法计算出 Q_1 和 e_1 ：

$$Y_1 = \frac{\mu}{\mu\nu - \nu^2} \left(Q_\nu e^\nu - Q_\mu e^\mu \frac{\nu^2}{\mu^2} - \frac{\mu^2 - \nu^2}{\mu^2} P_d \right) \quad (15)$$

$$e_1 = \frac{E_\nu Q_\nu e^\nu - \frac{1}{2} P_d}{Y_1 \nu} \quad (16)$$

3 应用组网实验与数据分析

3.1 单纤双向 CWDM 共纤传输

在某些特定场合，为了将客户侧业务与量子密钥分发业务隔离开，此时为了节约光纤资源，选择将 QKD 的量子光信号、同步时钟信号以及协商信号、网管复用在同一根光纤中传输，如图 13 所示。

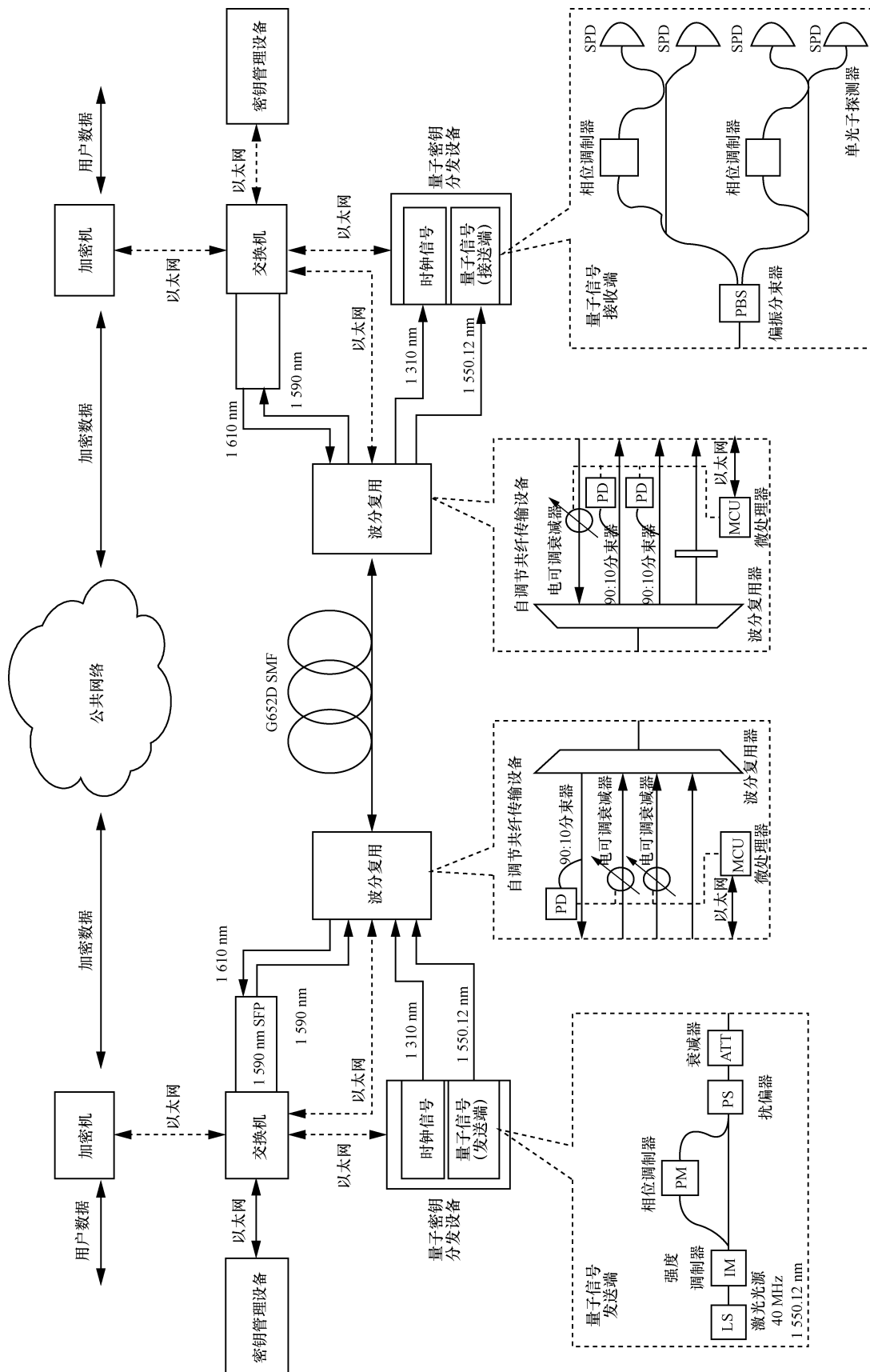


图 13 WDM 单纤双向 QKD 网络架构



由于此时存在反向经典信号，因此增加了反向拉曼散射噪声。对于 40 MHz QKD 系统来说，经典信号的传输速率不超过 100 Mbit/s。

本文选取了 1 310 nm 波长作为同步光，同向经典信号选择 1 590 nm 及反向经典信号选取了 1 610 nm。通过分析经典信号的实际带宽需求，选择了 100 Mbit/s 的光模块作为经典信号的收发器。它们的接收灵敏度为 -46 dBm，为了预留部分冗余，将同向和反向经典信号的接收功率设置为 -44 dBm。在 QKD 的接收端使用了中心波长为 1 550.12 nm、带宽为 0.8 nm 的带通滤波器进行了噪声的频域滤波，量子光信号以较小的损耗通过滤波器，而带外噪声被滤除。

本文分别测试了 3 种光纤链路长度下，有无正反经典信号的 QKD 安全密钥成码率，如图 14 所示。数据结果表明，在 3 种光纤长度下，复用了同向与反向经典信号后的量子密钥成码率降比小于 10%。

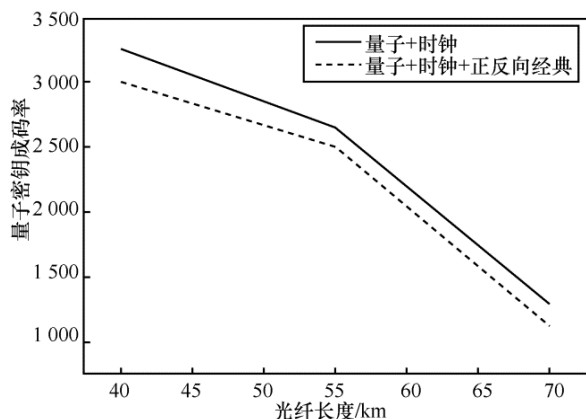


图 14 量子光与 1 310 nm 时钟光、正反向经典信号共纤传输时的成码率

3.2 双纤双向 CWDM 共纤传输

在城域网中，光纤单跨距离通常小于 55 km，根据上文的研究，此时经典业务与量子光复用传输时，经典光的波长选择 1 310 nm 对量子信道影响最小，如图 15 所示。

本文选择 1 610 nm 波长的光作为同步光。经典光分别选用速率为 1.25 Gbit/s、2.5 Gbit/s 和 10 Gbit/s

的 1 310 nm 光，根据光模块厂商提供的接收灵敏度，将 1 310 nm 光的接收功率分别设置为 -35 dBm、-28 dBm 和 -21 dBm。在上述情况下，测量了自研 QKD 在光纤长度为 25 km、40 km 和 55 km 下的安全成码率，由于上述光纤是由多个光纤盘拼接而成的，引入了连接器的损耗，上述 3 段光纤的损耗分别为 5.6 dB、8.5 dB 和 10.4 dB。

40 MHz QKD 与不同速率的 1 310 nm 经典光复用，成码率和误码率如图 16 所示。本文最终实现了 10 Gbit/s 速率的经典光和量子光在 55 km 的光纤链路下共纤传输，安全密钥速率为 1.58 kbit/s。

3.3 双纤双向 DWDM 共纤传输

DWDM 常常用于长距离干线传输，该场景光纤距离长，共传经典信号速率高。由于需要长距离传输，选用损耗较小的 C 波段的 DWDM 波长作为经典光与量子光共传。由于该场景下，经典光速率比较高，相应的最低接收功率也高，若只是简单地将经典光衰减至最低接收功率附近，会严重影响量子信号。因此，采用将经典光功率衰减至接收器的灵敏度以下，再使用 EDFA 后放大的方案，减少经典光的拉曼散射影响。

对 100 Gbit/s DPQPSK 短距传输而言，色散、偏振模色散、偏振态变化以及非线性的损伤基本可以忽略不计，当前的相干处理算法可以接近完美地处理前 3 个损伤。而在典型的入纤功率下，短距离传输引起的非线性相位噪声可以不用考虑。经典信号的低输入功率会导致 EDFA 输出的 OSNR 降低，因此误码率会有一些升高。对 10 Gbit/s 直接检测 OOK 信号而言，无色散补偿系统中的光纤传输色散效应会引起信号的劣化。在 SMF 中的偏振模色散对 10 Gbit/s 系统则基本无影响。在短距离直接检测系统中，偏振模色散导致的损伤也可以不用考虑。类似上述 100 Gbit/s 系统，EDFA 输入功率降低导致的输出 OSNR 降低是主要的制约因素。图 17 (a) 是 10 Gbit/s DWDM 波长的 OOK 信号分别经过 55 km 和 70 km 光纤再输入

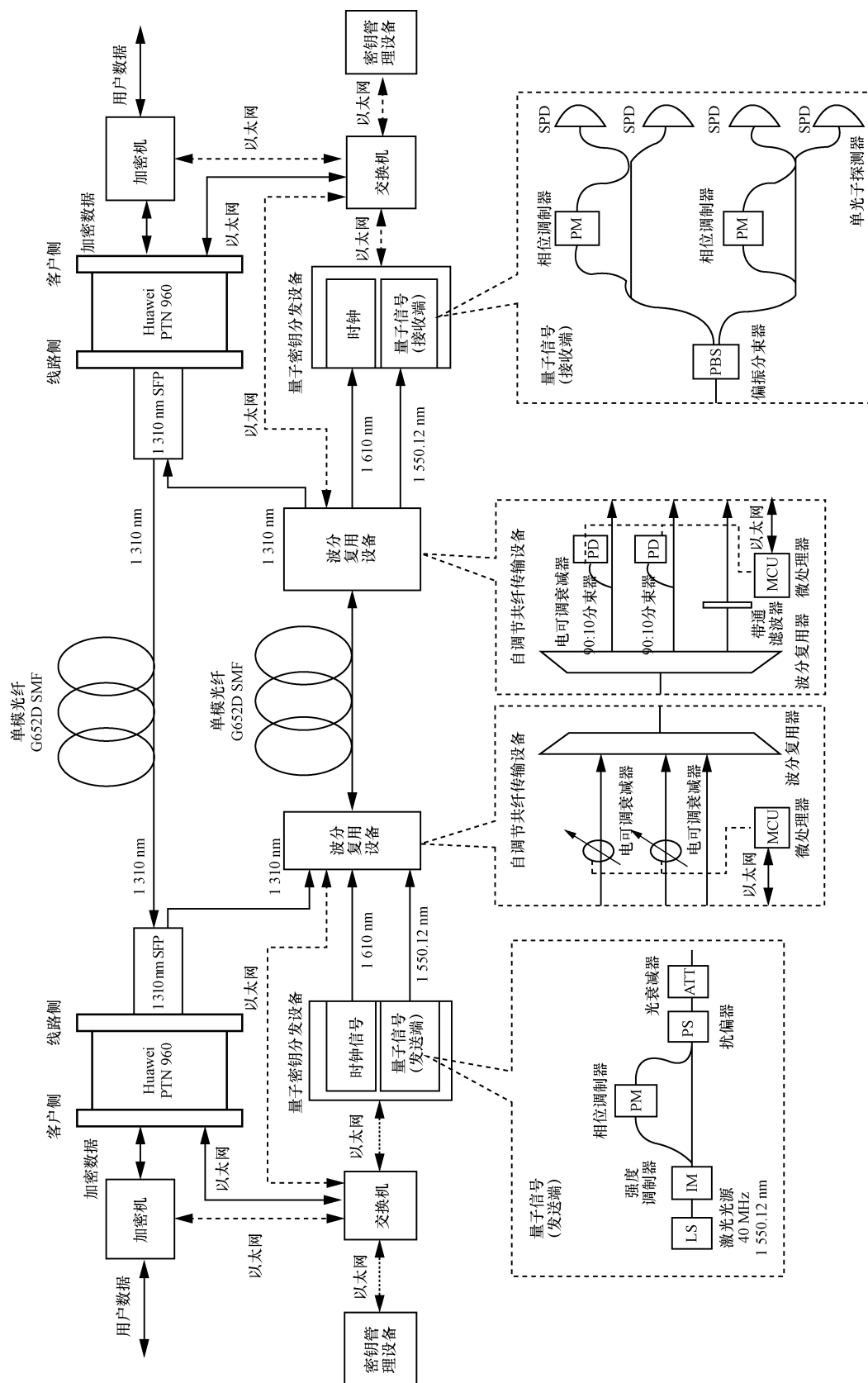


图 15 双纤双向 CWDM 共纤传输网络架构

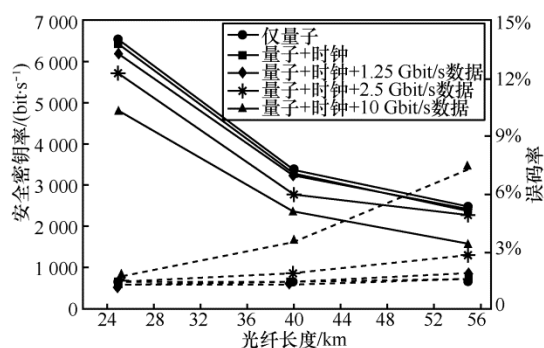


图 16 量子光与不同速率的经典光共纤传输的安全密钥率与误码率

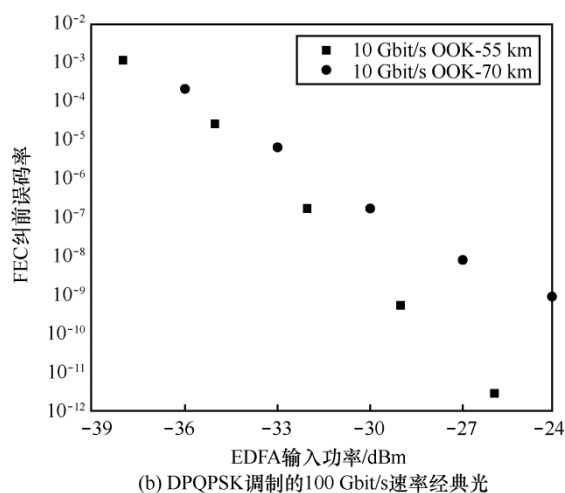
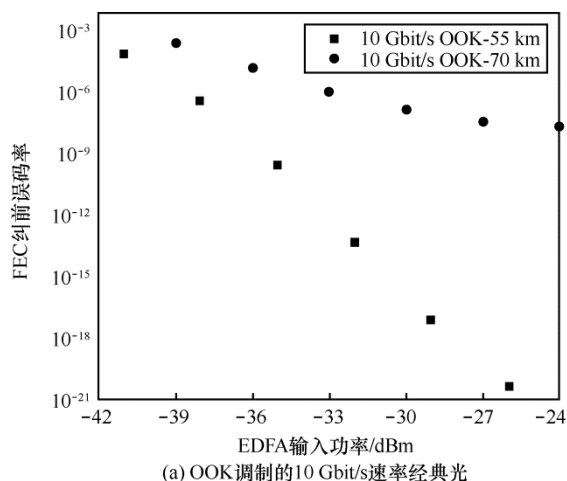


图 17 经典光进放大器前的功率与放大后误码率关系图

EDFA 后，输出的误码率和注入 EDFA 的功率的关系（通过 Optisystem 仿真），图 17（b）是 10 Gbit/s DWDM 波长的 DP-QPSK 信号分别经过 55 km 和 70 km 光纤再输入 EDFA 后，输出的误码率和注入 EDFA 的功率的关系（通过

Optisystem 仿真）。

在实验室使用等效激光光源模拟经典信号对量子信号的影响。本文选择 ITU 标准 C31、C32 号波长作为两路经典光的波长，用两个可调波长激光器分别模拟了实际的网络传输设备的光源，架构如图 18 所示。

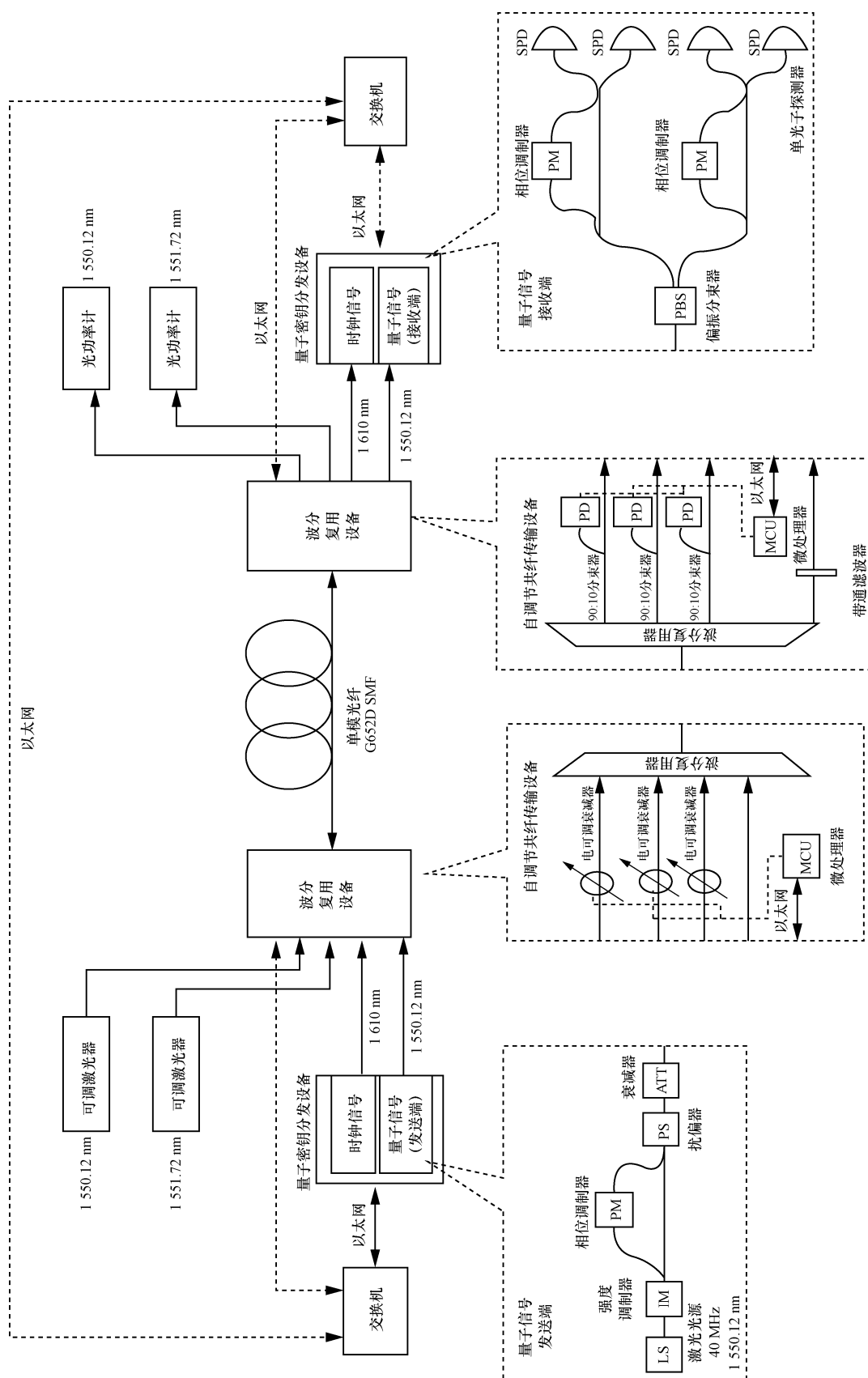
根据经典光误码率纠错容限所允许的初始误码率 10^{-3} 量级，在 10 Gbit/s、100 Gbit/s 速率数据与量子光共纤传输实验中，将经典光的接收功率均设置为 -37 dBm。本文分别测试了 55 km 和 70 km 光纤距离下的共纤传输情况，最终的安全密钥率分别为 2.24 kbit/s 和 1.16 kbit/s。

4 结束语

通过本文的分析结果得知，基于诱骗态 BB84 协议的量子密钥分发系统，可以在如下的 3 种场景和经典光通信数据共纤混传且对安全成码能力不造成过大的影响：CWDM 单纤双向共纤混传，混传的经典光业务速率 ≤ 1 Gbit/s；CWDM 双纤双向共纤混传，混传的经典光业务速率 ≤ 10 Gbit/s 且混传距离 ≤ 55 km；DWDM 双纤双向共纤混传，混传距离 ≤ 70 km，混传的经典业务光波长较少（ ≤ 2 ）且每个波长都是相干光通信方式并可以在接收端配置放大器和软判决 FEC。本文的研究结果有助于推动量子通信融合到现有光通信网络的标准化进程^[12-14]。值得注意的是，从 2000 年之后新兴的连续变量 QKD 技术，其相干检测的方式，使得该类型 QKD 在波分混传场景下的噪声抑制能力相较于单光子检测型 QKD（诱骗态 BB84 协议、DPS 协议、COW 协议等）更为出色，并已有相关产业化研究论文发表^[15]，值得后续关注。

参考文献：

- [1] SHOR P W. Algorithms for quantum computing: discrete log and factoring[J]. Proceedings of Annual Symposium on the Foundations of Computer Science, 1994: 124-134.





- [2] MAYERS D. Quantum key distribution and string oblivious transfer in noisy channels[C]//The 16th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, August 18-22, 1996, Santa Barbara, CA, USA. Berlin: Springer, 1996: 343-357.
- [3] SCARANI V, BECHMANN-PASQUINUCCI H, CERF N J, et al. The security of practical quantum key distribution[J]. Review of Modern Physics, 2009, 81(3): 1301.
- [4] PEEV M, PACHER C, ALLÉAUME R, et al. The SECOQC quantum key distribution network in Vienna[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(7): 075001.
- [5] CHAPURAN T, TOLIVER P, PETERS N, et al. Optical networking for quantum key distribution and quantum communications[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(10): 105001.
- [6] PATEL K A, DYNES J F, CHOI I, et al. Coexistence of high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber[J]. Physical Review X, 2012, 2(4): 773-777.
- [7] CHOI I, ZHOU Y R, DYNES J F, et al. Field trial of a quantum secured 10 Gbit/s DWDM transmission system over a single installed fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23121.
- [8] 浙江九州量子信息技术股份有限公司. 一种量子密钥分配系统: CN206517428U[P]. 2017-09-22.
- Zhejiang Quantum Technologies Co., Ltd. A quantum key distribution system: CN206517428U[P]. 2017-09-22.
- [9] CHOI I, YOUNG R J, TOWNSEND P D. Quantum information to the home[C]// European Conference and Exhibition on Optical Communication, Sept 16-20, 2011, Amsterdam, Netherlands. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-3.
- [10] AU YEUNG J, YARIV A. Spontaneous and stimulated Raman scattering in long low loss fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1978, 14(5): 347-352.
- [11] SUBACIUS D, ZAVRIYEV A, TRIFONOV A. Backscattering limitation for fiber-optic quantum key distribution systems[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(1): 145-179.
- [12] 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.
- [13] CUI X G, LIU X, CAO S Y, et al. Development, challenge and opportunity of optical fiber communication system technologies[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 34-43.
- [14] ZHENG X P, HUA N. Review and outlook of 30 years of

optical network development [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 24-33.

- [15] 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(99): 1.

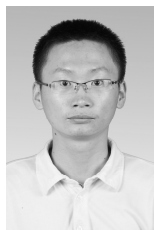
[作者简介]



钱懿 (1982-), 男, 博士, 浙江九州量子信息技术股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为量子通信和传统光通信网络融合技术、光交换、软件定义网络、量子密钥分发协议和量子密钥分发后处理算法。



林翔宇 (1993-), 男, 浙江九州量子信息技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为光通信性能监控子系统和量子通信的光学自反馈系统。



王东 (1989-), 男, 博士, 浙江九州量子信息技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为相位编码型 BB84 量子密钥分发系统的光学架构研究和量子密钥分发协议。

胡小豹 (1991-), 男, 浙江九州量子信息技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为非线性光纤光学、激光器。

陈金剑 (1993-), 男, 浙江九州量子信息技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为量子保密通信的密钥管理层网络技术。

陈文皓 (1989-), 男, 浙江九州量子信息技术股份有限公司工程师, 主要研究方向为无源光学器件、含波分复用器件、耦合器、磁光效应器件。