中文核心期刊

经典–量子信号共纤同传方案研究

程 康，周媛媛*，王 欢
（海军工程大学 电子工程学院，武汉 430033）

摘要：经典－量子信号共纤同传技术旨在提升光纤量子密钥分发网络资源的利用效率。针对基于单模光纤的经典－量子信号共纤同传、基于少模光纤的经典－量子信号共纤同传和基于多芯光纤的经典－量子信号共纤同传方这 3 种方案，分析了其工作原理，阐述了其研究现状，讨论了其特点，总结了其优势和不足，并对下一步经典－量子信号共纤同传技术的发展进行了展望。

关键词：量子密钥分发；经典－量子信号共纤同传；少模光纤；多芯光纤
中图分类号：TN918.91；TN915.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002-5561（2018）03-0009-05
DOI：10.13921/j.cnki.issn1002–5561.2018.03.003

Research on methods of classical–quantum signals simultaneous transmission sharing a same fiber

CHENG Kang, ZHOU Yuanyuan, WANG Huan*
(School of electronic engineering, Naval University of engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The technique of classical-quantum signals simultaneous transmission sharing a same fiber is targeted at improving the utilization efficiency of optical networks for the quantum key distribution. The methods of classical-quantum signals simultaneous transmission sharing a single mode fiber, a few-mode fiber and a multicore fiber are the main objects of the theoretical and experimental researches at present. Considering the three methods, this paper analyzes the working principles, elaborates the present situation of the research, discusses the characteristics and summarizes the advantages and disadvantages. Finally, the suggestions and prospects are proposed.

Key words: quantum key distribution; classical-quantum signals simultaneous transmission sharing a same fiber; few-mode fiber; multicore fiber

0 引言

自 1984 年 Bennett and Brassard 提出第一个量子密钥分发（Quantum key distribution, QKD）协议[1]以来，量子密钥分发在理论[2-4]和实验[5-8]上都取得了重大的突破，实用化进程也一步步推进。例如：2004 年 6 月，美国 BB–N 公司建立的世界上第一个量子密码通信网络在美国马萨诸塞州剑桥城正式投入运行 [9]；2008 年 10 月，欧盟“基于量子密码的全球保密通信网络研发项目（SECOQC）”的科学家宣布 SECOQC 组建的 7 节点量子保密通信演示验证网络运行成功 [5]；2017 年 9 月，我国建成了世界上首条量子保密通信骨干网“京沪干线”[10]。

目前，QKD 的主要载体是光子，其过程包括经典通信和量子通信两部分。实际应用中，为避免相互干扰，基于光纤的 QKD 系统网络中的光量子信号和经典信号各自占用一根光纤。这种做法造成了巨大的光纤信道资源浪费，因此，人们尝试探索经典–量子信号共纤同传技术来解决这一困扰。

1997 年，英国 Townsend 博士首次完成了将一路经典信号和一路量子信号以波分复用的方式融合在一根单模光纤中传输的实验[11]。2013 年，Joel Carpenter 等人基于少模光纤成功进行了经典–量子信号模分复

收稿日期：2017–12–19。
基金项目：国家自然科学基金（批准号：61302099）资助。
作者简介：程康（1993–），男，硕士研究生，主要从事量子保密通信方面的研究。
*** 通信作者**：周媛媛（E–mail: zyy–hjgc@aliyun.com）。

用共纤同传实验[12]。2016 年，欧洲的 J.F.Dynes 等人首次在 53km 的 7 芯光纤中以空分复用方式共同传输了经典和量子两种信号[13]。至此，经典–量子信号共纤同传的 3 大主流方案：基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案、基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案和基于多芯光纤的经典–量子信号共纤同传方案形成。

本文将对这 3 种共纤同传方案的工作原理、发展现状展开研究。

1 同传方案发展概况

1.1 基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案

基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传技术是指利用波分复用技术，将经典光信号和量子信号融合在同一根单模光纤中同时传输的技术，其原理框图如图 1 所示。

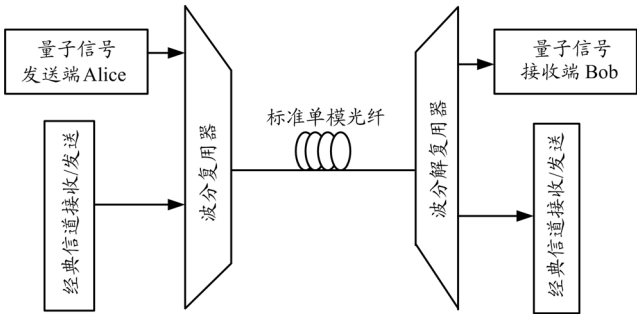

图 1　基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传原理框图

该项技术需要克服的主要问题是经典强光信号对量子弱光信号的影响，一般经典信号与量子信号的光强相差 100dB[14]。在两种信号以波分复用方式共纤同传的过程中，量子信号不可避免地受到由经典信号产生的各种噪声的影响。主要的噪声源[15~19]有瑞利散射、自发喇曼散射、经典信道对量子信道的串扰和四波混频等。针对这些噪声，众多研究者采取了一系列的方法[15,17~20]来抑制噪声，如波长隔离、窄带滤波、时域滤波和降低经典信号的输入功率等，以达到提升传输距离和密钥生成率的目的。

根据经典信号和量子信号波长分配方式的不同，可将基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案分为两类：一类是同波段传输方案[15]（经典信号与量子信号都在 C 波段）；另一类是较远波长隔离方案[15]（量子信号在 O 波段波长进行传输，经典光信号在 C 波段进行传输）。

对于同波段传输方案，2005 年，美国世界通信公司的 Tiejun J. Xia 等人首次实现一路量子信号和 4 路 10Gb/s 经典数据信号共纤同传[16]，传输距离达 50km。该实验未采用抑制噪声的措施，导致系统量子误比特率较高。2009 年，瑞士日内瓦大学 P Eraerds 等人通过使用高精度的噪声隔离设备和带宽更低的窄带滤波器、采用密钥生成率较高的 SARG 协议并适当降低经典信号功率等手段，将传输距离为 50km 对应的安全密钥生成率提高到了 11b/s[21]。2012 年，英国剑桥大学东芝研究所的 K.A.Patel 等人除采用了窄带滤波和降低经典信号功率的手段外，还使用了探测时间门限为 100ps 的 InGaAs 单光子探测器 [20]，使得信噪比性能提升了 10 倍，将同传距离和密钥生成率分别提升至 90km 和 7.6kb/s，其性能较之前的实验有大幅度的提升。2015 年，法国巴里科技电信公司的 Rupesh Kumar 等人完成了一路连续变量的量子密钥分发（Continuous Variable Quantum Key Distribution, CV–QKD）信号与密集波分复用的经典信号共纤同传的实验[22]，在较大的经典信号发射功率下，传输距离最远达到了 75km，相应的量子密钥生成率为 490b/s。该实验表明 CV–QKD 抗噪声性能较强，易于与现有光网络中经典强光信号融合。

对于较远波段隔离方案，1997 年，英国电信实验室的 Townsend 博士首次完成了一路量子密钥分发和一路经典信号同传的实验[11]，但由于没有采取有效的抑制噪声措施，量子误比特率很高。2005 年，美国电信科学实验室的 N.I.Nweke 等人通过采用窄带滤波、增加波分复用器和解复用器的信道隔离度以及使用性能较好的单光子探测器等手段，使得共传距离为 10km 时对应的最大密钥生成率达到 70b/s[16]。2009 年，美国卓讯科技公司的 T. E. Chapuran 等人采用了低损耗两级薄膜复用/解复用器和带宽为 1.5nm 的带通滤波器，该实验传输 25km 时对应的安全密钥生成率为 9b/s[23]。2016 年，中国科技大学的王留军将一路量子信号和 4 路总信息速率为 5.69Tb/s 的经典信号融合共传 [24]，使得传输最远距离达到了 80km，对应的密钥生成率为 1kb/s。实验分析得出，QKD 信号与 C 波段 T 比特级大容量经典信号复用传输时，量子信道波长选用 1310nm 要比 1510nm 更合适。

1.2 基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案

少模光纤比多模光纤的模式数更少，一般为 2~10 个[25]。基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传技术是

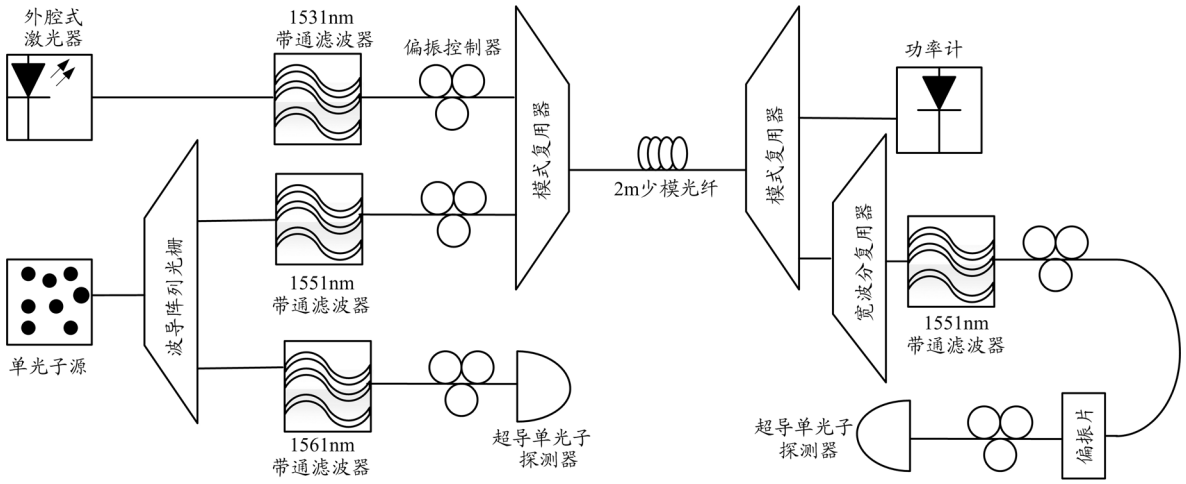

图 2 基于少模光纤经典-量子信号共纤同传实验原理框图

指经典信号和量子信号分别占用不同的模式融合在一根少模光纤中共同传输的技术。

2013 年，悉尼大学的 Joel Carpenter 等人完成了经典信号和量子信号在一根 6 个模式少模光纤中共同传输的实验[12]，其中量子信号在基模中传输，其经典信道和量子信道隔离度达 35dB。实验虽然只在 2m 长的少模光纤上进行，但也验证了基于少模光纤的经典-量子信号共纤同传方案的可行性。其实验原理框如图 2 所示。

1.3 基于多芯光纤的经典-量子信号共纤同传方案

多芯光纤是指同一包层内含有多个纤芯的光纤。如图 3 所示，此 7 芯光纤包层直径为 185μm，芯间距为 45μm[13]。基于多芯光纤的经典-量子信号共纤同传是指经典信号与量子信号分别占用不同的纤芯融合在一根多芯光纤中共同传输的技术。

2016 年，英国剑桥大学东芝研究室的 J.F.Dynes 等人在长达 53km 的 7 芯光纤中进行了首次基于多芯光纤的经典-量子信号共纤同传实验[13]。量子信道安排在 7 芯光纤的中心纤芯上，双向 10Gb/s 的经典信号安排在外围 6 路纤芯中。实验测得量子密钥生成率为 605kb/s，纤芯之间的隔离度大于 40dB。其实验原理框图如图 4 所示。

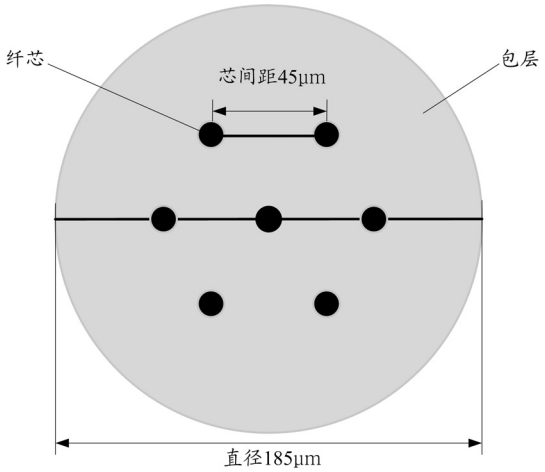

图 3 7 芯光纤横断面示意图

2 同传方案分析及比较

对基于单模光纤的经典-量子信号共纤同传方案，目前提高同波段传输性能的途径主要有 3 个方面：一是提升仪器设备性能，如波分复用/解复用器、带通滤波器和单光子探测器性能的进一步提高，能更好地抑制经典强光信号对量子弱光信号的影响（该方法对较远波段隔离方案也同样适用）；二是降低经典信号功率来减小其对量子信号的干扰，但是这种方法是以牺牲经典通信的性能来提升量子密钥分发的传输性能；三是用 CV-QKD 来代替离散变量量子密钥分发（Discrete Variable Quantum Key Distribution，DV-QKD），由于 CV-QKD 采用经典相干光源，将信息调制在正则分量上，且只需使用普通的相干激光器和平衡零差检测器就可实现[26]，比 DV-QKD 抗噪性能更强，更容易与经典光通信融合。但是 CV-QKD 在安全传输距离方面不如 DV-QKD[26]，只限应用于近距离 QKD 系统。

对于较远波段隔离方案，虽然经典信号对量子信号的噪声干扰较同波段共传方案要小得多，但由于量子信号处于 O 波段，光纤固有损耗较大，所以该方案传输距离受限。从文献[24]的实验可以看出：对于量子信号，当复用的经典信号路数达到一定数量时，随着

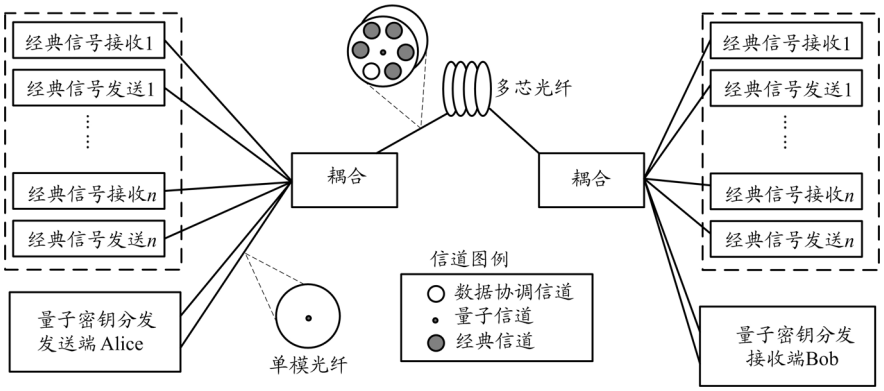

图 4 基于多芯光纤的经典–量子信号共纤同传实验原理框图

经典信号噪声的增大,经典信号噪声干扰将大于 O 波段光纤损耗的影响。此时,较远波段隔离方案将成为更佳选择。因此,在与大容量城域经典光网络融合时,较远波段隔离方案会有更大的用武之地。

基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案相比于前一方案,其优势在于:利用少模光纤不同空间模式信道的正交性,不同信号占用不同的模式,可有效降低经典信号对量子信号的噪声干扰;除此之外,不同模式可结合不同波长信号,即同时采用波长隔离和模式隔离进一步提升经典信道和量子信道之间的隔离度。该方案的不足之处在于,即使是少模光纤,光传输过程中也不可避免地会出现模式色散[27]。另外少模光纤在现有光纤网络中应用较少,使得基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案难以大规模应用。

基于多芯光纤的经典–量子信号共纤同传方案的优势在于多芯光纤各纤芯之间是基于物理结构隔离的,因此,量子信号受到的经典信号干扰较前两种方案更小,使得其更容易在与大容量的经典信号共纤同传时能获得更好的量子密钥分发性能。但是,多芯光纤是一种新型光纤,理论和实际的研究还不够成熟[28,29],与现有光纤网络融合还存在同相位模式输出的耦合效率随纤芯数增加而降低、单芯单模光纤与多芯光纤的耦合效率偏低等问题[30]。因此,这种方案目前还难以大规模应用。

从光纤隔离度性能来说,基于多芯光纤的经典–量子信号共纤同传方案的隔离度最好,基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案的隔离度要优于基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案。就技术成熟程度而言,基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案研究起步较早,且基于单模光纤的经典光通信系统也已发展多年,相应的器件设备相对成熟,而基于多芯光纤和少模光纤的经典–量子信号的共纤方案近些年才开始提出,国内外相关研究不足,相应的设备还不完善。从应用前景来看,目前基于少模光纤和多模光纤的光网络还难以大范围铺设,且与现有光网络的融合也是一个难题,这在很大程度上限制了两种方案的实用化。因此,基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案将是在现有光纤网络中实现经典–量子信号共纤同传的主要技术途径。

3 结束语

本文介绍了经典–量子信号共纤同传 3 大主流方案的原理和研究进展,进行了深入的分析比较,总结了各个方案的优势和不足。为推进经典–量子信号共纤同传技术的进一步发展,我们提出以下建议:

①对基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传方案,一方面可以提高同传系统器件的性能,如在基于单模光纤的经典–量子信号共纤同传系统中使用插入损耗更小的器件,以降低系统的总信号衰减;使用性能更好的单光子探测器,以便更有效地滤除噪声光子;设计更高灵敏度的经典信号接收装置,便于进一步降低光纤中经典信号总功率等。另一方面可以采取适当的纠错编码方案,如低密度校验码等,对接收到的量子信号进行纠错,降低经典–量子信号共纤同传的量子误比特率,提升通信质量[31,32]。

②对基于少模光纤的经典–量子信号共纤同传方案,可以使用渐变型少模光纤,以降低同传过程中的模式色散。此外,可同时在少模光纤中使用波分复用和模分复用以及 CV–QKD 技术以进一步提升信道隔离度和量子信号的抗噪声性能。

③对基于多芯光纤的经典–量子信号共纤同传方案,可以尝试在多芯光纤中使用波分复用技术和 CV–QKD 相关协议,以进一步提高系统的信息速率和抗噪声性能。

参考文献:

[1] BENNETT C H, BRASSARD G. An Update on Quantum Cryptography [J]. Lecture Notes in Computer Science, 1984, 196: 475–480.

[2] GAO F, GUO F Z, WEN Q Y, et al. Quantum key distribution without alternative measurements and rotations [J]. Physics Letters A, 2006, 349(1): 53–58.

[3] GISIN N, RIBORDY G, TITTEL W, et al. Quantum Cryptography[J].

Physics, 2008, 74(1): 145–195.

[4] 曾贵华. 量子密码学[M]. 北京：科学出版社，2006.

[5] POPPE A, PEEV M, MAURHART O. Outline of the SECOQC quantum-key-distribution network in Vienna [J]. International Journal of Quantum Information, 2008, 6(2): 209–218.

[6] ELLIOTT C, PEARSON D, TROEXE G, et al. Quantum cryptography in practice[J]. Acm Sigcomm Computer Communication Review, 2003, 33 (4):227–238.

[7] 周春源，吴光，陈修亮，等. 50km 光纤中量子保密通信[J]. 中国科学，2003，33(6)：538–543.

[8] STUCKI D, GISIN N, GUINNARD O, et al. Quantum Key Distribution over 67km with a plug & play system [J]. New Journal of Physics, 2002, 4 (1): 41–41.

[9] 屈平，方芳. 量子密码技术与通信安全[J]. 世界科学，2004(8)：36-38.

[10] 佚名. 全球首条量子保密通信骨干网“京沪干线”具备开通条件[J]. 中国产经，2017(9)：77–77.

[11] TOWNSEND P D. Simultaneous quantum cryptographic key distribution and conventional data transmission over installed fiber using wavelength-division multiplexing[J]. Electronics Letters, 2002, 33(3): 188–190.

[12] CARPENTER J, XIONG C, COLLINS M J, et al. Mode multiplexed single-photon and classical channels in a few-mode fiber[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28794–28800.

[13] DYNES J F, KINDNESS S J, TAM S W, et al. Quantum key distribution over multicore fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8081–8087.

[14] LANCH D, MARTINEZ J, ELKOUSS D, et al. QKD in standard optical telecommunications networks[C]//International Conference on Quantum Communication and Quantum Networking. October 26-30, 2009, Naples, Italy. Berlin: Springer, 2009: 142–149.

[15] 王宇帅，李云霞，石磊，等. 经典 - 量子信道复用技术研究[J]. 光通信技术，2014，38(3)：59–62.

[16] XIA TJ, CHEN D Z, WELLBROCK G, et al. In-band quantum key distribution on fiber populated by high-speed classical data channels[C]// Optical Fiber Communication Conference, March 5, 2006, Anaheim, California, USA. California: The Optical Society of America, 2006.

[17] NWEKE N I, TOLIVER P, RUNSER R J, et al. Experimental characterization of the separation between wavelength-multiplexed quantum and classical communication channels [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87 (17) :175–177.

[18] XAVIER G B, FARIA G V D, TEMPORAO G P, et al. Scattering effects on QKD employing simultaneous classical and quantum channels in telecom optical fibers in the C-band [C]// American Institute of Physics, 2009: 327–330.

[19] PETERS N A, TOLIVER P, CHAPURAN T E, et al. Dense wavelength multiplexing of 1550nm QKD with strong classical channels in reconfigurable networking environments[J]. New Journal of Physics, 2011, 11 (5): 045012-1–045012-17.

[20] PATEL K A, DYNES J F, CHOI I, et al. Coexistence of high-b-rate quantum key distribution and data on optical fiber [J]. Physical Review X, 2012, 2(4): 773–777.

[21] PATRICK ERAERDS, NINO WALENTA, MATTHIEU LEGRE, et al. Quantum key distribution and 1Gb/s data encryption over a single fiber [J]. New Journal of Physics, 2009, 12(6): 063027-1–063027-15.

[22] KUMAR R, QIN H, ALLAUME R. Coexistence of continuous variable QKD with intense DWDM classical channels [J]. New Journal of Physics, 2015, 17(4) : 043027-1–043027-12.

[23] 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):105001-1–105001-17.

[24] WANG L J, ZOU K H, SUN W, et al. Long distance co-propagation of quantum key distribution and terabit classical optical data channels [J]. Physical Review A, 2017, 95(1)：012301-1–012301-8.

[25] 罗均文，李云霞，石磊，等. 基于少模光纤模分复用的量子信号 - 经典光信号共纤同传技术[J]. 激光与光电子学进展，2017(2)：278–285.

[26] 陆鸢. 连续变量量子保密通信技术研究 [D]. 上海：上海交通大学，2011.

[27] 赵海远. 少模光纤模式复用传输系统链路分析与信号处理研究[D]. 北京：北京邮电大学，2015.

[28] 马静，冯高锋，杨军勇. 多芯光纤的研究进展 [C]// 光纤材料产业技术创新战略联盟，2012 年 11 月 2 日，武汉，中国. 北京：中国电子材料行业协会，2012：90–100.

[29] 杨芳，唐明，李博睿，等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. 光学学报，2014，34(1)：58–62.

[30] 王清华，宁提纲，胡旭东. 多芯光纤激光器的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术，2010(2)：1–4.

[31] 张彦煌. 基于连续变量量子密钥分发的高效 LDPC 解码算法[D]. 太原：山西大学，2014.