

引用本文: 卢利锋, 李建岐, 赵子兰, 等: 面向电力城域网的多粒度量子交换节点结构[J]. 光通信技术, 2019, 43(8): 47-51.

面向电力城域网的多粒度量子交换节点结构

卢利锋¹, 李建岐¹, 赵子兰², 熊飞², 兰军健³, 李倩倩³, 孙咏梅³

(1. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053;

3. 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: 电力城域网业务承载方式差别很大, 网络交换节点不仅需要支持量子信号、同步信号和经典信号的交换, 还需要具备多粒度的信号交换功能来支持不同服务等级电力业务的加密传输。采用基于光纤级交换层、波带级交换层和波长级交换层的多粒度量子交换节点结构, 提高交换节点的灵活性并降低交叉连接矩阵的规模。同时, 将波长选择开关引入多粒度量子交换节点, 通过可编程的灵活波长选择保证了同用户量子信号与同步信号的同路径交换。仿真结果表明该量子交换节点结构在电力城域网中应用的可行性。

关键词: 电力城域网; 量子密钥分发; 多粒度; 量子交换

中图分类号: O431.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)08-0047-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-granularity quantum switching node structure for power metropolitan area network

LU Lifeng¹, LI Jianqi¹, ZHAO Zilan², XIONG Fei², LAN Junjian³, LI Qianqian³, SUN Yongmei³

(1. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. The State Key Laboratory of

Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: There are great differences in service carrying modes of power MAN. Network switching nodes not only need to support the exchange of quantum signals, synchronous signals and classical signals, but also need to have multi-granularity signal switching functions to support the encrypted transmission of power services of different service levels. A multi-granularity quantum switching node structure based on optical fiber level switching layer, waveband level switching layer and wavelength level switching layer is adopted to improve the flexibility of the switching node and reduce the size of the cross-connection matrix. At the same time, the wavelength selection switch is introduced into the multi-granularity quantum switching node, and the programmable and flexible wavelength selection ensures the same path switching with the user's quantum signal and synchronous signal. The simulation results show that the quantum switching node structure is feasible in the application of power metropolitan area network.

Key words: power metropolitan area network; quantum key distribution; multi-granularity; quantum switching

0 引言

安全问题是电力行业走向信息化、智能化之路必

收稿日期: 2018-12-05。

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGR17XKJ2017J847号)资助。

作者简介: 卢利锋(1978-), 男, 硕士, 电力正高级工程师, 全球能源互联网研究院有限公司信息通信所技术研发主任工程师, 主要从事电力骨干光纤网络通信研究、量子通信技术研究及电力通信软件开发工作。擅长算法分析及软件开发。



须解决的关键问题^[1]。量子密钥分发(QKD)^[2-4]可以成为电力通信网络安全保障的重要技术。对于电力广域网, 节点交换是扩大网络规模的主要技术。电力城域网是电力广域网的重要组成部分, 可实现电力控制类专线业务、保护安稳类 2M 通道业务、管理信息化类业务、视频类业务和语音交换类业务等多种不同承载网业务的混合传输。这些电力专用业务的通信方式各不相同, 有的直接通过光纤传输, 有的经过专用通道传输, 有的通过 IP 网传输, 并且经过的承载网也不同, 在物理上是完全隔离的。由于 QKD 的引入会增加波长

信道数目,从而极大增大交叉连接矩阵的规模导致其插入损耗的增大,需要控制交换节点的插入损耗来保证 QKD 的性能;另一方面,针对 QKD 同步信号,同用户的量子信号与同步信号需要保持传输路径的一致性来实现接收端的正常检测,需要交换节点具有灵活的波长信道选择功能。因此,网络核心节点需要具备不同光纤、不同波长和不同粒度业务的处理能力,同时支持量子信号、同步信号以及经典光信号的交换。

为解决这两方面的问题,本文介绍一种面向电力城域网的多粒度量子交换节点结构。

1 量子交换节点研究现状

当前,学术界对于 QKD 网络的研究如火如荼,但其规模一般较小。中国科技大学提出了基于波分复用器(WDM)的全时全通量子路由器结构^[5]如图 1 所示。该量子路由器由 WDM_A、WDM_B、WDM_C 和 WDM_D 等 4 个 WDM 设备组成,每个 WDM 设备都是三波长的,且支持的复用/解复用波长为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 。WDM_A 和 WDM_D 通过波长 λ_2 进行信号的交换, WDM_A 和 WDM_B 通过波长 λ_3 进行信号的交换, WDM_A 和 WDM_C 通过波

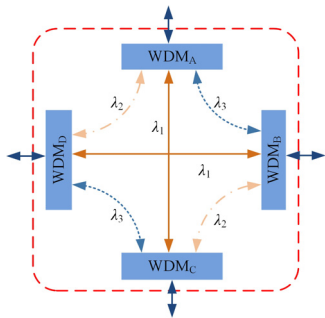


图 1 四端口全时全通量子路由器

长 λ_1 进行信号的交换,其它 WDM 设备之间的连接同理,据此可以完成完整的内部连接。基于这种量子路由器就能建立全时全通 QKD 网络,其可以完成不同节点之间的 QKD。

马德里理工大学提出了基于光分插复用器(OADM)的量子交换节点^[6],其节点结构如图 2 所示。信号经输入端口进入节点,通过带通滤波器 F_q 将波长相匹配的信号由滤波端口输出,不匹配信号由反射端

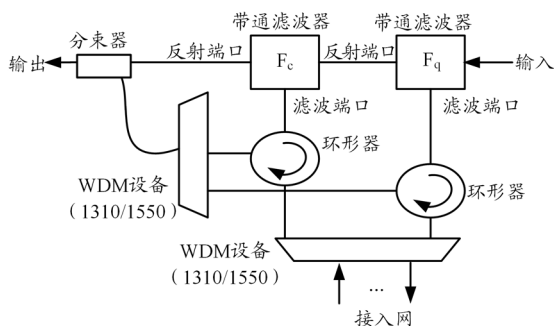


图 2 基于 OADM 的量子交换节点

口输出。 F_c 的工作原理与 F_q 相同,其通过设置中心波长来将波长匹配的经典信号从滤波器的滤波端口输出。在滤波端口滤出的经典信号和量子信号会通过环形器与 WDM 设备复用传输至接入网中。当从接入网上行传输的信号进入该节点时,WDM 设备会将量子信号与经典信号分开,这些信号通过环形器绕过滤波器,在另一个 WDM 设备中进行复用,再通过环形骨干网到达目的地。该节点能完成自动寻址功能,而且使用的无源光器件比较简单,易于实现。

从以上的分析可以看出,中国科技大学提出的节点结构无法实现动态配置,在实际应用中限制较多,如波长无法更改、无法分时利用等。除此之外,马德里理工大学提出的基于 OADM 的量子交换节点虽然能实现自动寻址功能,但是只能支持单个光纤链路传输,且灵活性较低。据此,需要提出一种新的交换节点结构,其不仅具有动态配置的特点,并且可以实现经典、同步和量子这 3 种信号的同节点交换。

2 多粒度量子交换节点的三层架构

如前所述,在电力通信网^[7]中,由于各类电力业务承载方式、通信方式不同,服务质量相差很大,最明显的是生产控制类业务与管理信息化业务是独立的 2 张承载网,在物理上隔离,对时延、可靠性和保护等要求级别完全不同。因此,对于核心的通信节点,要满足多类业务的灵活传输,在将本地业务上传到远端或者从汇聚层将业务下行到本地时,需要将信号从光纤粒度转到波长粒度再从交换节点中继续传输。除此之外,当汇聚层将不同业务汇聚再进行传输时,尽管在交换节点中无需进行较小粒度(如子波长)等级的交换,但仍然需要在较大的粒度(如波带、光纤)等级上进行交换。为了实现 QKD 网络与电力城域网的融合,网络中的交换节点不仅需要支持量子信号、同步信号以及经典信号的同节点交换,而且需要具备对多粒度信号进行灵活交换的能力,以确保电力信息网络的信息安全传输。因此,本文提出一种基于光纤级交换层(FSL)、波带级交换层(BSL)和波长级交换层(WSL)的多粒度量子交换节点结构如图 3 所示。

该节点结构是由 FSL、BSL 和 WSL 构成的三层架构。FSL 是由一个光纤交叉连接(FXC)模块构成的简单结构,而 FXC 模块的核心部分是 $M \times M$ (M 表示输入/输出端口的数目)的光开关矩阵;BSL 的结构由波长选择开关(WSS)器件和一个波带交叉连接(BXC)模块构成,而 BXC 模块的核心部分是 $N \times N$ (N 表示的是

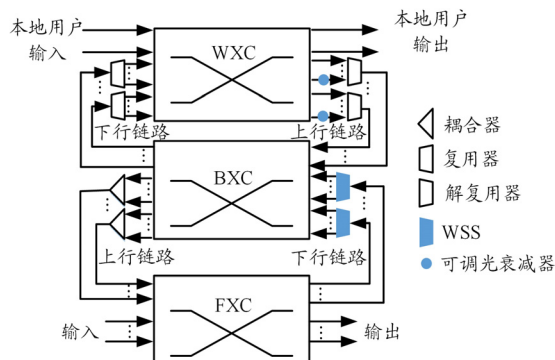


图3 多粒度量子交换节点结构图

BXC模块中光开关矩阵的输入/输出端口的数目)的光开关矩阵;WSS的结构由密集型光波复用(DWDM)设备和一个波长交叉连接(WXC)模块构成,而WXC模块的核心部分是 $K \times K$ (K 表示的是WXC模块中光开关矩阵的输入/输出端口的数目)的光开关矩阵。

假设有 x 个光纤链路从相邻交换节点进入到本交换节点的FSL,是FSL中信号被解复用至BSL的比例, $m \times x$ 是FSL到BSL的端口数。FSL的信号经解复用后作为BSL的输入,其输入波带数目为 y , n 是BSL中信号被解复用至WSL的比例, $n \times y$ 是BSL到WSL的端口数。由于这种结构的对称特性,FSL到BSL的端口数与BSL到FSL的端口数相同,WSL到BSL的端口数与BSL到WSL的端口数相同。

该节点通过在BSL中引入WSS器件^[8]实现接收端的同一用户的量子与同步信号在交换过程中的路径完全统一。WSS器件不仅具有配置的动态性,而且可以对不同波长进行灵活的交换。在该交换结构中引入WSS器件,其交换能力得到了大幅度的增强,并且其建设成本以及难度得到进一步的降低。

3 多粒度量子交换节点的结构与性能分析

多粒度量子交换节点组成的简单典型电力城域网拓扑如图4所示(图4只表示了信号在WSL的上、下路部分,省略了信号在BSL和FSL的上、下路部分,但该交换节点结构也支持在BSL和FSL中进行上、下路来提高业务传输的灵活性)。每一

交换节点分别与多个相邻交换节点相连,不同粒度的经典电力业务及QKD业务通过各自的交换层级交换至相应的输出端口,从而实现灵活的路由功能。同时,每一交换节点的每一层级均有上、下行接口与相应的接入网业务相连,实现不同承载方式电力业务的上、下路功能。假设接入网B1中某一条经典电力业务(如电力信息化、自动化等IP承载网业务)需要经过节点A后到达接入网D1;量子信号的目的地为接入网A2;接入网B2为电力专线业务(如安控类业务),目的地为接入网C1。SYN、QKD 2路信号在节点B直接通过光纤级交换一同交换至与节点A相连的输出端口(注:A和B之间的直连虚线为一条QKD逻辑链路);在A节点需要实现量子信号下路,并保证用户的同步信号随量子信号同路径交换,这一功能由交换节点的BXC层实现,通过配置BXC层的WSS实现量子信号与同步信号始终从同一输出端口输出,并从与接入网A2相连的端口下路;同时,将经典电力业务交换至D节点,直接通过光纤级的下路端口输出至接入网D1;后一路B2专线信号直接通过光纤交换至接入网C1口下路。这样就实现了不同质量等级的多种承载方式电力业务的灵活交换与传输。

与单粒度交换节点结构和文献[9]提出的光交换节点结构相比,多粒度交换节点结构不仅克服了前两者存在的问题,还能够利用多种粒度承载业务,并且

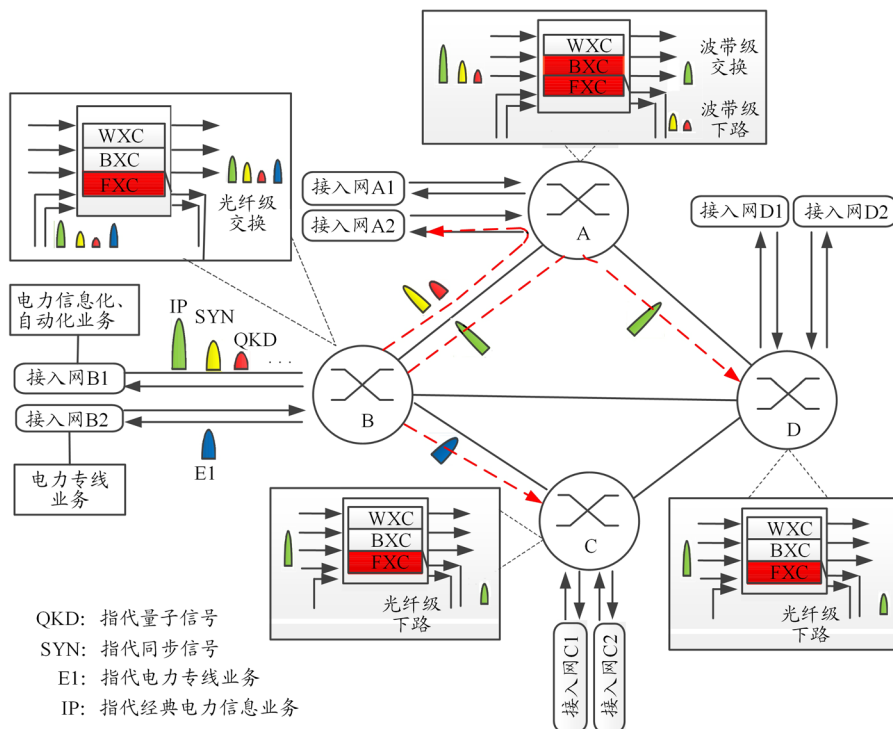


图4 基于多粒度交换节点的电力城域网拓扑示意图

卢利锋,李建岐,赵子兰,等:面向电力城域网的多粒度量子交换节点结构

通过在BSL中引入WSS器件,保证了量子信号和同步信号的同路径传输,提高了交换节点的性能,也降低了其复杂度。另外,多粒度交换节点在不增加复用/解复用器和光开关矩阵的端口数的情况下,也能够承担较大业务的交换传输,所以在一定程度上可以提高交换节点的业务容纳能力。

多粒度交换节点的转发时延主要取决于交叉连接矩阵的开关时延以及波长选择开关的切换时延。基于微机电系统(MEMS)的光开关具有成本低、便于集成化和开关速度达到毫秒量级等优点,时延满足DWDM全光网的技术要求,因此MEMS光开关成为多粒度交换节点交叉连接矩阵的主要开关^[10]。现在,商用的波长选择开关的切换时间达到毫秒级以上,能够满足高速光通信系统的要求。因此,多粒度交换节点结构能够在现有的商用设备器件基础上足够支持目前较低速率的量子通信并且同时能够满足较高速率的光通信需求。对于电力城域网,由于电力网络大多是静态配置业务,其对业务的交换时延不敏感,光开关切换时间不影响电力通信网的可靠性^[11]。

4 多粒度量子交换节点的损耗和串扰分析

4.1 损耗和串扰理论分析

多粒度量子交换节点在灵活性等方面有极大的优势,能够应用在电力通信城域网中。但由于其结构较为复杂,不可避免地会带来损耗较大的问题,而过大的损耗会造成QKD系统误码率的增加,甚至导致其无法正常工作。对于可靠性要求较高的电力通信城域网来说,需要严格分析交换节点的损耗是否能满足性能要求,因此,本文通过理论来分析误码率对QKD系统的影响,并通过仿真来探究其能够使QKD系统正常运行的损耗范围。

通信双方经过BB84协议对基后共享的平均密钥速率的计算如式(1)所示^[12]:

$$R_{\text{sift}} = \frac{1}{2} q f \mu \eta t_{\text{net}} \quad (1)$$

其中, q 表示干涉环相关损耗, μ 表示量子信号脉冲平均光子数, η 表示单光子探测的量子效率, f 表示脉冲重复频率, t_{net} 表示网络损耗。 t_{net} 的计算如式(2)所示^[10]:

$$t_{\text{net}} = 10^{-(l_t + l_r)/10} \quad (2)$$

其中, l_t 表示光纤传输的损耗, l_r 表示器件损耗。

量子比特误码率(QBER^[13])的计算如式(3)所示,其概念定义为错误的比特数与全部接收的比特数之比。

$$QBER = \frac{N_{\text{wrong}}}{N_{\text{right}} + N_{\text{wrong}}} = \frac{R_{\text{error}}}{R_{\text{sift}} + R_{\text{error}}} \quad (3)$$

其中, N_{wrong} 是接收到的错误的比特数, N_{right} 是接收到的正确的比特数, R_{sift} 是平均密钥速率, R_{error} 表示错误率。从误码率的成因角度考虑,则QBER的计算如式(4)所示^[13]:

$$QBER = \frac{\frac{1-V}{2} R_{\text{sift}} + \frac{1}{2} R_{\text{dc}}}{R_{\text{sift}} + R_{\text{dc}}} \quad (4)$$

其中, V 表示干涉环的可见度,取决于干涉所得到的最大、最小光强; R_{dc} 表示系统探测器暗计数噪声;在QKD过程中,光子没有响应在正确探头上会导致误码,而该误码率一般是 $(1-V)/2$ ^[13]。

4.2 损耗和串扰仿真分析

仿真不同重复频率下的QBER随损耗的变化结果如图5所示。可以看出,当 $f=1$ MHz时,在损耗不小于7 dB的情况下,QBER高于QKD系统正常工作的理论最大值(11%)^[13];但是当 f 增加时,如 $f=10$ MHz,衰减是10 dB时,QBER大约是3%,可以达到QKD系统正常工作的QBER要求。基于上面的分析可知,损耗与QBER紧密相关,而降低QBER才能保证QKD系统在多粒度节点的交换过程中正常工作。因此,应当降低交换节点的损耗。一般常采取优化量子信号路由方案等方式来控制量子信号的损耗。

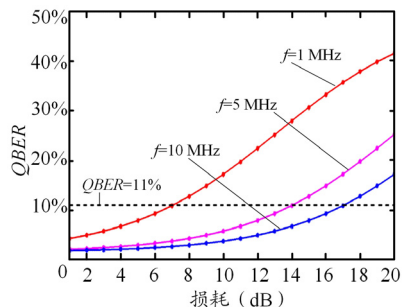


图5 QBER仿真结果图

由前文可知,该结构由光开关矩阵、WSS等器件构成,并且可以实现若干个用户进行共纤传输。因此,必须保证器件之间的隔离度,否则就会使得量子信号受到串扰的影响,影响QKD过程的正常进行。

为进一步探究串扰对交换节点性能的影响,本文利用仿真软件构建其模型,并针对不同器件参数,着重分析其对节点性能的影响以及该节点结构的可行性。仿真中假设WSL中的WXC模块采用8×8的光开关矩阵,BSL中的BXC模块采用8×8的光开关矩阵,FSL中的FXC模块采用4×4的光开关矩阵。

假设有2组用户,分别为用户1和用户2。用户1和用户2各自分配3个波长(本文用频率表示),以实现传输经典信号、同步信号以及量子信号的目的。用

户 1 的 3 个信号频率分别为 192.7 THz、192.9 THz 和 193.1 THz; 用户 2 的 3 个信号频率分别为 192.8 THz、193.0 THz 和 193.2 THz。每组用户 3 个频率的功率分别为 0 dBm、-20 dBm、-110 dBm。2 组用户信号经过同一根光纤复用后进入交换节点的 FSL 中, 在交换节点的 FSL 中的输入端口测得的信号输入光谱图如图 6 所示。

信号经过 FSL 中 4×4 的光开关矩阵后会进入到 BSL 中。在

BSL 中, 首先经过 WSS 将 2 组用户信号分开成为 2 路波带信号。假设 2 组用户之间需要实现经典信号的交换, 则 2 路波带级的信号需要通过 WSL 中的 DWDM 设备解复用后, 输入到 WSL 中 8×8 的光开关矩阵进行交换, 用户 1 的量子信号、同步信号会和用户 2 的经典信号复用, 用户 2 的量子信号、同步信号会和用户 1

的经典信号复用, 从而完成了不同用户经典信号的交换。在这个过程中, 量子信号很容易受到由于器件间隔离度较小造成的干扰。因此, 采取先去掉量子信号的信号源后仿真的方式, 也就是发送端只存在经典信号和同步信号, 并且 WDM

设备的隔离度是 45 dB, 插入损耗是 0.82 dB。通过以上设置之后来仿真经过交换后的串扰信号的功率。信号经交换后到输出端口侧, 在 WSL 中的光开关矩阵输出端口侧测得的光谱图如图 7 所示。可以看出, 串扰信号的功率是 -68 dBm, 其值远远大于量子信号的功率 -110 dBm, 明显会对量子信号造成干扰。为了解决这一问题, 本文在信号经过波长级交换后的输出端口侧加一个隔离度为 60 dB 的光滤波

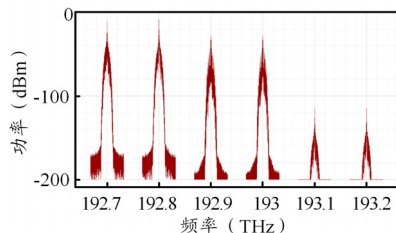


图 6 在交换节点的 FSL 中的输入端口测得的信号光谱图

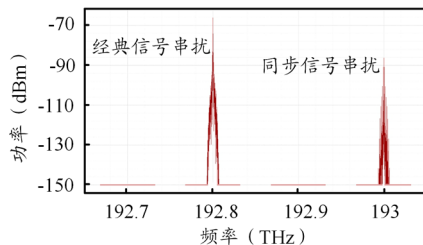


图 7 用户 2 原本的量子信号所在端口处测得的光谱图

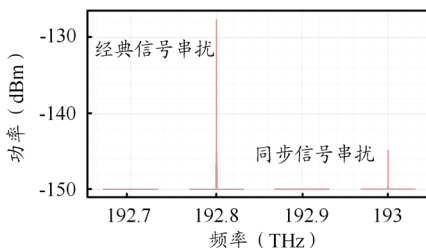


图 8 用户 2 原本的量子信号所在端口处加入光滤波器后测得的光谱图

器, 仿真得到的光谱图如图 8 所示, 串扰信号的功率是 -127 dBm, 该值小于量子信号的功率值。

通过上述对交换节点的仿真可以看出, 同一组用户的 3 个信号的频率会造成串扰, 由于串扰会使误码率增大, 因此在实际应用时应尽可能地增大量子信号和经典信号之间的频率间隔, 并采用光滤波器来滤除串扰, 达到降低噪声信号对量子信号干扰的目的。

5 结束语

基于 FSL、BSL 和 WSL 的多粒度量子交换节点结构, 不仅能够实现量子信号、同步信号以及经典电力信号的同节点交换, 而且具备了多粒度的信号交换功能来支持各种不同承载方式的电力业务的加密传输。通过对多粒度量子交换节点进行扩展性、损耗性和串扰性的分析, 证明了多粒度量子交换节点结构在电力通信城域网中应用的可行性, 并为其具体应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 全源. 浅谈电力通信的现状与发展前景 [J]. 科技风, 2018 (4): 155-155.
- [2] ISLAM N T, LIM C C W, CAHALL C, et al. Securing quantum key distribution systems using fewer states[J]. Physical Review A, 2018, 97(4): 042347-042347.
- [3] DIAMANTI E, LO H K, QI B, et al. Practical challenges in quantum key distribution[J]. NPJ Quantum Information, 2016(2): 16025-16025.
- [4] SHENOY H, PATHAK A, SRIKANTH R. Quantum cryptography: key distribution and beyond[J]. Quanta, 2017, 6(1): 1-47.
- [5] ZHANG T, MO X F, HAN Z F, et al. Extensible router for a quantum key distribution network[J]. Physics Letters A, 2008, 372(22): 3957-3962.
- [6] CIURANA A, MART NEZ-MATEO J, PEEV M, et al. Quantum metropolitan optical network based on wavelength division multiplexing[J]. Optics express, 2014, 22(2): 1576-1593.
- [7] KIM S, URATA Y, KOIZUMI Y, et al. Power-saving NDN-based message delivery based on collaborative communication in disasters [C] // The 21st IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, April 22-24, 2015, Beijing, China. Beijing: IEEE, 2015.
- [8] 兰军健. 支持量子密钥的多粒度光网络交换节点设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [9] 卢利锋, 周静, 贺礼超, 等. 多用户量子密钥分配组网中的节点研究 [J]. 光通信技术, 2015, 39(7): 51-53.
- [10] 周林杰, 陆梁军, 郭展志, 等. 集成光开关发展现状及关键技术 (特邀)[J]. 光通信研究, 2019, (1): 13-30.
- [11] 王兴龙. 基于 3D-MEMS 光子开关技术在电网通信的应用[J]. 数字通信世界, 2018(12): 22-23.
- [12] 马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 陈巍. 光纤 QKD 的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.