



量子保密通信标准化现状与发展分析

赖俊森, 吴冰冰, 汤瑞, 赵文玉, 张海懿

(中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要: 基于量子密钥分发的量子保密通信具有高安全性的特点, 是未来保障信息安全的有效解决方案之一。近年来, 我国量子保密通信试点应用及产业化逐步启动, 相关标准化制定需求日益明显。对量子保密通信国内外相关标准的布局、制定现状及发展趋势进行分析, 同时, 对我国量子保密通信标准化工作进行分析展望, 进一步提出未来相关标准化策略建议。

关键词: 量子密钥分发; 量子保密通信; 标准化

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018034

Analysis on the status and development of quantum secure communication standardization

LAI Junsen, WU Bingbing, TANG Rui, ZHAO Wenyu, ZHANG Haiyi

Technology and Standards Research Institute, China Academy of Information and Communication Technology (CAICT), Beijing 100191, China

Abstract: Quantum secure communication based on quantum key distribution, which can provide theoretically unconditional security, is one of the effective solutions to ensure information security in the future. Recently, the application and industrialization of quantum secure communication in China has developed gradually, the demand for standardization has become increasingly apparent. The worldwide project plan, research status and development trend of quantum secure communication standardization were investigated, the problems and prospects of China's standardization research were analyzed, and further suggestions to accelerate the standardization development were also proposed.

Key words: quantum key distribution, quantum secure communication, standardization

1 引言

量子通信利用微观粒子系统的量子态或纠缠

效应等进行信息或密钥传输, 由量子力学原理保证信息传输的绝对安全性, 主要包括量子隐形传态 (quantum teleportation, QT) 和量子密钥分发

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61471128, No.61671159); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2015AA015502)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61471128, No.61671159), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2015AA015502)



(quantum key distribution, QKD) 两类^[1]。量子隐形传态基于通信双方的纠缠分发、贝尔态测量和幺正变换,实现信息的直接传输。其中,量子态信息的传输仍需借助传统通信方式辅助才能完成。目前,量子隐形传态技术尚不成熟,是量子信息领域理论研究和实验探索的前沿热点^[2]。量子密钥分发通过量子态的传输和测量,首先,在收发双方实现无法被窃听的安全密钥共享;之后,再与传统保密通信技术相结合,实现经典信息的加密传输。基于量子密钥分发的保密通信称为量子保密通信(quantum secure communication, QSC),作为量子通信领域中率先进入实用化的技术,近年来,量子保密通信在技术研究、试点应用和产业化推广等方面均取得一定成果,发展较为迅速^[3]。

我国面临的信息安全形势日益复杂,需要在政务、金融和关键基础设施等领域进一步提高网络信息安全的保障能力,量子保密通信的试点应用和产业推广呈现较快发展趋势^[4]。2017年,量子保密通信“京沪干线”项目建成并通过验收,“沪杭干线”“宁苏干线”和“武合干线”等项目也相继开始建设,全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”实验研究同步推进。量子保密通信初步形成集技术研究、系统集成、建设运维和安全应用为一体的产业链,上下游企业积极探索基于量子保密通信的信息安全防护市场化应用。总体而言,我国量子保密通信技术的研究与应用发展处于世界先进水平,有望成为保障未来网络信息安全的有效解决方案之一。但是,其应用与产业化发展同样面临一些困难和瓶颈。其中,量子保密通信系统的协议、器件、设备和网络缺乏相应的技术规范 and 标准体系,已对其推广和规模化部署形成了制约^[5]。

目前,世界各国已经开展了量子保密通信技术的标准化研究工作,以欧洲电信标准化协会(ETSI)、美国云安全联盟(CSA)和电气与电子

工程师学会(IEEE)等为代表的国外研究机构在该领域率先布局,并已取得一定研究成果^[6]。中国通信标准化协会(CCSA)也于2017年6月成立了量子通信与信息技术特设任务组,开始启动量子保密通信技术标准的研究工作。本文对国内外量子保密通信标准化研究的发展趋势和最新进展进行研判分析,并对我国量子保密通信标准化工作进行展望以及提出发展策略建议。

2 国外量子保密通信标准化情况

在量子保密通信标准化研究方面,欧洲起步较早。ETSI于2008年9月牵头成立了包括16家成员单位在内的ISG-QKD标准化工作组,展开前瞻性的标准化研究。ISG-QKD的研究包括4个方面,一是研究技术规范,包括对QKD系统的不同协议方案、主要器件、性能参数、设备接口和工作环境等方面进行定义和规范;二是提出测试方法,包括对QKD设备的光学器件、密钥系统和协议参数进行可溯源的测试评估;三是推动安全认证,包括对实际QKD系统的器件属性、安全漏洞和侧信道进行分析和攻防测试,并推出安全可靠的认证要求;四是提出应用需求,包括对QKD技术的应用场景、与现有网络设备的集成以及应用接口的规范等方面的内容进行研究。

从2010年起,ISG-QKD标准组陆续发布了6项框架性的技术标准,为QKD技术标准化奠定了初步基础。其中,应用案例标准(GS-002)提出QKD技术在数据链路层、网络层、传输层和应用层中的使用模式以及数据中心、城域网、基础设施控制、骨干网保护、高安全接入和长途业务6种应用场景^[7]。物理接口标准(GS-003)对弱相干光源QKD系统实现方案进行规范,提出基于单光子相位调制的单向和双向系统、基于纠缠光子对的QKD系统及基于连续变量的QKD系统的实现方案,并对QKD光源、调制器和探测器的原理及指标参数进行分析^[8]。应用接口标准

(GS-004)提出了上层安全加密应用程序与 QKD 密钥管理层之间的应用接口协议,并对分布式 QKD 网络中的密钥交换、存储、保护、同步和使用等环节进行规范^[9]。安全验证标准(GS-005)对 QKD 的协议安全性与系统现实安全性的差异进行分析,对 QKD 设备的安全性级别进行划分,并给出基于量化参数的不同 QKD 系统的安全性证明^[10]。模块安规标准(GS-008)规定了 QKD 系统的安全要求、光学模块性能要求、系统物理与逻辑接口、协议后处理算法和软件安全性、操作环境和身份认证等方面内容^[11]。光器件特性(GS-011)提出 QKD 系统中的光学元器件,主要包括弱相干光源和单光子探测器的关键指标参数,并且对光学器件参数的测试方法进行规范^[12]。目前,ISG-QKD 标准组正在进行 3 项标准项目的研究^[13],包括 QKD 系统特洛伊木马攻击防护(GS-10)、QKD 发射机物理层参数规范(GS-013)以及 QKD 设备通信信道规范(GS-012),预计未来两年内陆续发布。

近年来,美国也开始布局 and 开展量子保密通信的标准化研究工作。CSA 于 2014 年成立量子安全防护工作组,发布了多项 QKD 技术与应用研究报告,对量子计算安全威胁、量子密钥分发技术、量子安全加密算法以及基于 QKD 的量子保密通信技术与系统方案等问题进行研究与探讨。IEEE 也于 2016 年成立了软件定义量子通信项目组(P1913),对量子通信技术在未来网络中的应用层控制协议、配置方式和接口等问题展开研究并给出定义。总体而言,欧美等国家和地区在 QKD 技术标准化方面整体上仍处于起步阶段,以 ETSI 为代表的欧洲研究机构在 QKD 技术规范和系统测试方面具有较好的研究基础,发展相对较快。

3 我国量子保密通信标准化进展

随着我国量子保密通信试点应用和产业化快速发展,其系统设备与网络架构、技术规范和测

试评价等方面的标准化需求也日益明显。首先,通过对 QKD 系统接口、应用协议和服务应用的标准化的,简化 QKD 系统设备的研制开发流程,与现有的通信基础设施和信息安全设备及其应用进行灵活集成,促进 QKD 应用部署。其次,对技术协议、系统器件和网络架构的标准化,可以在不同的 QKD 系统设备供应商之间实现量子信号物理层或密钥管理层的互操作,促进量子保密通信产业链和上游供应链的发展和成熟。最后,通过对 QKD 系统可靠性和现实安全性的验证证明,提出具体量化的安全性指标要求和认真评估方法,为终端用户的量子保密通信设备、系统和网络的信息安全应用提供保障。

2017 年 6 月,CCSA 成立了量子通信与信息技术特设任务组(ST7),下设量子通信和量子信息处理两个工作组。ST7 任务组集中了量子保密通信产业链和相关技术领域的 44 家成员单位,基本涵盖了我国量子保密通信技术研究和产业应用的主要力量。包括科大国盾量子、安徽问天、九州量子等 QKD 设备供应商,国科量子、亨通问天量子、神州量子等 QSC 网络运营商,中国电信、中国移动、中国联通和華為、中兴通讯、烽火网络等传统通信企业,中国信息通信院、济南量子技术研究院、中国科学技术大学、北京邮电大学、上海交通大学等相关研究机构以及中创为量子、中经量通等量子保密通信安全应用初创企业。

现阶段,CCSA-ST7 的量子保密通信标准研究的主要方向和内容:一,针对量子保密通信系统设备和网络的量子传输层、密钥管理层和加密应用层中的核心协议、关键器件、主要设备和管理技术进行技术规范,为构建具备互操作性,与经典光通信系统能够融合的标准化量子保密通信系统提供支撑;二,研究量子计算攻击对现有安全加密体系的威胁以及现实 QKD 系统中的非理想特性等因素引入的现实安全性问题,提出量



子保密通信系统的安全性量化分析和评价标准,为量子保密通信设备系统和网络应用提供安全性保障;三,研究 QKD 系统和网络架构、运维管理、支撑系统和加密业务应用技术和相关标准规范,为量子保密通信技术与现有通信系统和信息安全应用基础设施的集成与融合发展提供支撑;四,对量子保密通信系网络中的可信中继、密钥池管理和端到端密钥共享等组网技术以及未来可能实用化的量子存储、纠缠纯化和量子中继等其他技术进行研究,提出量子保密通信网络组网架构和节点技术方案的标准规范。

目前,CCSA-ST7 任务组已经立项并正在开展 2 项国家标准的编写制定和 4 项行业标准研究课题的研究工作。其中,《量子通信术语和定义》国家标准项目通过对广义和狭义的量子通信技术以及量子通信所涉及的量子信息处理技术相关术语进行定义,以消除业界内部和外界对于量子通信行业中模糊概念的混淆和误解,对量子通信技术所涉及的相关术语概念及其定义进行统一规范^[17]。《量子保密通信应用场景和需求》国家标准项目对量子保密通信的应用场景、业务需求及其与现有信息通信系统进行集成的方案进行研究和规范,为 QKD 系统的集成应用提供参考^[18]。《量子保密通信网络架构研究》标准课题对量子保密通信网络中的量子密钥分发、管理和应用的功能模型、体系架构和交互接口进行定义和标准规范相关研究^[19]。《量子密钥分发安全性研究》标准课题对基于 BB84 协议和诱骗态调制方法的 QKD 系统现实安全性进行研究,并对协议、算法和器件等环节的安全威胁进行分析,对量化安全性评价方法提出参考建议^[20]。《量子保密通信系统测试评估研究》标准课题对 QKD 系统的设备技术架构、关键参数指标以及系统功能与性能开展相关测评技术研究,并对后续的 QKD 系统技术要求和测试方法等相关标准规范的制定提供建议^[21]。《量子密钥分发与经典光通信系统共纤传输研究》标

准课题对量子光信号与经典光通信强光信号共纤传输的应用场景、总体架构、关键技术及组网方案等内容开展研究,为 QKD 设备与现有光网络通信设备的集成融合提出相关标准化建议^[22]。下一步,ST7 进行 QKD 标准化研究的重点方向是开展 QKD 设备技术要求和测试方法的标准制定;同时,针对 QKD 网元管理和网络管理的基本功能和性能要求进行规范,在加密应用层面对密钥中继、存储管理和加密协议接口等内容进行定义与标准化,实现不同厂商 QKD 设备在密钥管理层和加密应用层的兼容互通。随着 ST7 的成立和相关标准制定与研究课题等工作的逐步推进,基于 QKD 的量子保密通信技术应用将按需逐步从器件、系统、组网、测评、应用等方面开始进行标准规范,后续将有力支撑我国量子保密通信产业的健康快速发展。

同时,CCSA 也在传送网与接入网领域(TC6)的传送网工作组(WG1)立项了《支持量子波道的 WDM 系统技术要求》标准研究课题,将对 QKD 系统与波分复用系统的共纤混合传输的组网模式、波长分配、信号隔离度、光信号功率等方面问题展开研究与测试验证^[23]。光器件工作组(WG4)立项了《量子密钥分发关键器件和模块技术要求研究》标准研究课题,研究 QKD 应用场景需求、关键器件与模块、技术实现方案及其技术要求,为 QKD 系统的技术指标要求和测试评价规范标准化提供分析建议^[24]。网络与信息安全领域(TC8)的安全基础工作组(WG4)立项了《量子密钥分发技术及应用研究》标准研究课题,研究 QKD 技术基本原理、组网方案和应用场景,对应用和产业化发展以及 QKD 技术在通信运营商领域的推广发展进行研究分析^[25]。通过 QKD 技术在不同领域和多个技术方向的研究和标准化努力,有望形成技术研究与标准规范的发展合力,进一步加快量子保密通信技术与产业标准化发展进程。

4 量子保密通信与后量子安全加密

近年来,具备巨大信息携带量和超强并行计算处理能力的量子计算技术发展迅速,实用化通用量子计算机的研发可能在未来获得突破性进展。量子计算技术于对现有的基于计算复杂度保证安全性的公钥加密体制将构成严重威胁^[14]。在应对量子计算带来的安全威胁方面有两种解决思路,一种是基于量子密钥分发和对称加密的量子保密通信(QSC)方案^[15],另一种是基于对现有加密体制进行升级,使其具备抗量子计算破解能力的后量子加密(post-quantum cryptography, PQC)方案^[16]。QSC和PQC两种路线在未来的量子安全信息加密应用中存在技术体制、演进路线和标准化的竞争。

对于QSC技术方案,其优点是QKD能够基于量子力学原理保证密钥交换安全性,通过采用一次一密的对称加密体制对传输信息进行加/解密,从而实现理论上绝对安全的信息传输。但QSC方案的问题在于,首先,对称加密体制并不适用于所有的信息安全加密应用,例如互联网中广泛应用基于身份认证和数字签名的非对称加密应用;其次,QKD系统自身存在应用局限,例如传输距离和安全密钥速率有限,量子中继技术尚不成熟,现实安全性可能存在漏洞,系统成本和维护要求高等;最后,QKD只解决了密钥传输过程中的安全性问题,并不保证对称加密体制和整个保密通信系统的整体安全性。

对于PQC技术方案,其优点是通过对现有的加密体制算法进行升级改进,例如网格编码算法和椭圆曲线算法等,提供抵抗量子计算破解的新型信息加密技术,能够与现有的信息安全系统实现兼容和平滑升级演进。但其最关键的问题在于,基于加密算法的改进和创新属于阶段性的解决方案,仍然只能提供可证明的信息安全性,无法应对未来可能出现的新型破解算法和进一步的算力

提升,仍然可能面临计算破解威胁。

在上述两种技术路线的标准化发展方面,以美国国家标准技术研究院(NIST)为代表的标准化组织,在PQC方案算法和加密体制研究和标准化方面进展较快。2016年开始公开征集PQC算法进行评估对比验证,计划在2025年左右完成PQC算法标准体系,在量子计算技术实用化之前取代现有的信息安全加密标准体系。NIST的PQC标准研究计划在全球信息安全业界产生重要影响,并推动PQC技术研究和发展的提速。以CCSA为代表的标准化组织,主要关注基于QKD的QSC技术方案的研究应用和标准化,希望通过建立QKD网络基础设施,从根本上解决信息安全领域面临的威胁。总体而言,美国在PQC技术研究和标准化方面处于领先,在QSC应用和标准化方面的公开报道较少,中国在QSC研究和应用方面的发展相对迅速。

5 我国量子保密通信标准化工作策略建议

标准化是引导和促进技术与产业发展的重要驱动力之一,也是新兴技术产业发展成熟的必经之路^[26]。在未来的全球量子保密通信技术与产业竞争中,相关技术要求和测评规范的制定以及标准化体系建设推广能力和话语权对于国家科技实力竞争、企业生存发展和产业链做强做大都至关重要^[27]。未来,随着量子保密通信产业应用的进一步推广以及相关技术研究机构、系统设备厂商和建设运营单位的发展壮大,量子保密通信以兼容互通、灵活集成和安全可靠为目标的标准研究工作将呈现加速发展趋势,在完成目前基础性标准项目制定和课题研究之后,未来有望在设备和系统技术要求规范、安全性证明和评价以及组网和加密应用体制等方面逐步发展,形成较为完整的标准规范体系。

需要指出的是,现阶段我国量子保密通信标准化研究中,仍然面临一些问题瓶颈。首先,基于QKD的量子保密通信属于量子物理学、光学、通信和信息安全等多个学科相互交叉的前沿技术



领域,技术标准化研究的难度较高。其次,QKD技术目前仍然处于不断研究和发展阶段,新型协议技术、系统器件和架构方案不断涌现,现实系统安全性证明,系统漏洞攻击技术和相应的防御解决方案也是研究领域的前沿热点,技术方案的快速发展和迭代对于标准化研究的方向选择和工作推进也提出很高的要求。最后,目前的量子保密通信设备和系统传统通信设备相比,在实用化及工程化水平方面还较为有限,功能性能指标和设备集成度与可靠性等方面还需进一步提升,对技术要求、测试方法和安全性验证等标准的研究和制定也会产生一定影响。

未来,进一步促进我国量子保密通信技术标准化工作的策略建议包括以下3个方面。一,依托国家重大科技项目和重点研究专项平台的支持,进一步加强与各学科领域研究机构的交流与合作,将基础研究领域的先进成果引入标准化研究工作,提升我国量子保密通信技术标准研究的自主创新能力。二,进一步整合量子保密通信产业中的产学研用各方面的技术资源和研究能力,形成合力重点突破量子保密通信应用中的系统技术指标要求、测试评价规范和组网应用架构等关键性标准体系,为推动应用和产业发展做出实质性贡献。三,通过体制机制设计和产业政策引导,进一步鼓励传统通信设备制造商和网络运营商积极参与量子保密通信技术标准化研究,从传统通信技术领域借鉴成熟的标准体系架构和研究工作方法,提升量子保密通信技术标准化研究的工作质量和效率。

6 结束语

量子保密通信作为从理论上保证信息传输绝对安全性的通信技术,是未来保障网络信息安全的有效解决方案之一。近年,我国量子保密通信技术的研究、试点应用和产业发展较为迅速,而技术应用与产业化的快速发展需要标准化工作的支撑和引导,世界多国都已开始布局量子保密通

信技术标准化研究,我国在该领域的工作也已经展开。未来,在产学研用各界的密切配合和共同努力下,量子保密通信技术的标准化工作有望快速开展,为我国量子保密通信技术的研究推进、规模应用以及产业发展提供重要支持和保障。

参考文献:

- [1] LO H K, CURTY M, TAMAKI K, et al. Secure quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 595-604.
- [2] 周正威, 陈巍, 孙方稳, 等. 量子信息技术纵览[J]. *科学通报*, 2012, 57(17): 1498-1525.
ZHOU Z W, CHEN W, SUN F W, et al. A survey on quantum information technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 1498-1525.
- [3] 吴华, 吴健健, 任准政, 等. 量子通信现状与展望 [J]. *中国科学:信息科学*, 2014, 44(3): 296-311.
WU H, WU J J, REN Z Z, et al. Quantum communication: status and prospects [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2014, 44(3): 296-311.
- [4] 赖俊森, 吴冰冰, 李少晖, 等. 量子保密通信研究进展与安全性分析 [J]. *电信科学*, 2015, 31(6): 39-45.
LAI J S, WU B B, LI S H, et al. Progress and security analysis of quantum cryptography communication [J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(6): 39-45.
- [5] 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.
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.
- [6] ALLEAUME R, DEGIOVANNI I, MINK A, et al. Worldwide standardization activity for quantum key distribution [C]// *Globecom Workshops*, December 8-12, 2014, Austin, TX, USA. Piscataway: IEEE Press 2015: 656-661.
- [7] European Telecommunications Standards Institute. Quantum key distribution use cases:ETSI-GS-QKD-002[S/OL]. [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/qkd/001_099/002/01.01.01_60/gs_qkd002v010101p.pdf.
- [8] European Telecommunications Standards Institute. Quantum key distribution components and internal interfaces: ETSI-GS-QKD-003[S/OL]. [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/003/01.01.01_60/gs_QKD003v010101p.pdf.
- [9] European Telecommunications Standards Institute. Quantum key distribution application interface: ETSI-GS-QKD-004 [S/OL]. [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/004/01.01.01_60/gs_QKD004v010101p.pdf.
- [10] European Telecommunications Standards Institute. Quantum key distribution security proofs: ETSI-GS-QKD-005[S/OL].

- [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/005/01.01.01_60/gs_QKD005v010101p.pdf.
- [11] European Telecommunications Standards Institute. Quantum key distribution QKD module security specification: ETSI-GS- QKD-008 [R/OL]. [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/008/01.01.01_60/gs_QKD008v010101p.pdf.
- [12] European Telecommunications Standards Institute. Characterizing optical components for QKD systems: ETSI-GS-QKD-011 [R/OL]. [2017-11-15]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/QKD/001_099/011/01.01.01_60/gs_qkd011v010101p.pdf.
- [13] ETSI-QSC-Workshop: Industry Specification group in quantum key distribution [R/OL]. [2017-11-15]. https://docbox.etsi.org/Workshop/2017/201709_ETSI_IQC_QUANTUMSAFE/TECHNICAL_TRACK/S02_JOINT_GLOBAL_EFFORTS/TOSHIBA_Ward.pdf.
- [14] MOHSENI M, READ P, NEVEN H, et al. Commercialize quantum technologies in five years [J]. Nature, 2017, 543(7644): 171-174.
- [15] Mark P. ETSI-QSC-Workshop: Working group for quantum safe cryptography [R/OL]. (2017-06-08)[2017-11-15]. https://docbox.etsi.org/Workshop/2017/201709_ETSI_IQC_QUANTUMSAFE/TECHNICAL_TRACK/S02_JOINT_GLOBAL_EFFORTS/QSC_PECEN.pdf.
- [16] PENG C Z. ETSI-QSC-Workshop: Quantum communication in china satellite QKD and beyond[R/OL].(2017-06-08) [2017-11-15]. https://docbox.etsi.org/Workshop/2017/201709_ETSI_IQC_QUANTUMSAFE/TECHNICAL_TRACK/S01_WORLD_TOUR/USTC_PENG.pdf.
- [17] China Communications Standards Association. Quantum communication terminologies and definitions : CCSA-ST7- WG1 [R/OL]. (2017-12-27)[2017-12-30]. <http://www.ccsa.org.cn>.
- [18] China Communications Standards Association. Quantum secure communication use cases and requirements: CCSA-ST7-WG1 [R/OL]. (2017-12-27)[2017-12-30]. <http://www.ccsa.org.cn>.
- [19] China Communications Standards Association. Quantum secure communication network architecture: CCSA-ST7-WG1 2017B66 [R/OL]. (2017-12-27)[2017-12-30]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=6259.
- [20] China Communications Standards Association. Research on security proof and criteria of quantum key distribution: CCSA-ST7-WG2 2017B67 [R/OL]. (2017-09-26)[2017-12-30]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=6260.
- [21] China Communications Standards Association. Test and evaluation of quantum secure communication system: CCSA-ST7-WG1 2017B65 [R/OL]. (2017-12-27)[2017-12-30]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=6258.
- [22] China Communications Standards Association. Research on the co-fiber transmission of quantum key distribution and classic optical communication systems: CCSA-ST7-WG1 2017B64 [R/OL].(2017-12-27)[2017-12-31]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=6257.
- [23] China Communications Standards Association. Technical specification of WDM systems with the support of QKD: CCSA-TC6-WG1 2017-YDB-09 [R/OL]. (2017-11-27) [2017-12-15]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=5987.
- [24] China Communications Standards Association. Research on QKD device and module Technology requirements: CCSA-TC6-WG4 2017B23 [R/OL]. (2017-11-27)[2017-12-15]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=6015.
- [25] China Communications Standards Association. Research on quantum key distribution technology and application: CCSA-TC8-WG4 2016B72 [R/OL]. (2017-11-21)[2017-12-15]. http://www.ccsa.org.cn/workstation/project_disp.php?auto_id=5677.
- [26] 陈晓贝, 魏克军. 全球5G研究动态和标准进展[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 16-19.
- CHEN X B, WEI K J. Global research and standardization progress of 5G[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 16-19.
- [27] 朱浩, 项菲. 5G 网络架构设计与标准化进展[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 126-132.
- ZHU H, XIANG F. Architecture design and standardization progress of 5G network [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 126-132.

[作者简介]



赖俊森 (1983-), 男, 博士, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为高速光传输、WDM/OTN、物理层监测、量子通信新技术。

吴冰冰 (1984-), 女, 博士, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为光传输系统、高速光传输与光网络、量子通信与量子信息技术。

汤瑞 (1984-), 男, 中国信息通信研究院高级工程师, 主要研究方向为高速光传输、WDM/OTN、光网络技术等。

赵文玉 (1973-), 男, 博士, 中国信息通信研究院主任工程师, 主要研究方向为高速光纤通信网、WDM/OTN、量子通信等光网络新技术、标准制订和系统测试评估等。

张海懿 (1972-), 女, 中国信息通信研究院高级工程师、宽带网络研究部主任, 主要研究方向为高速光纤通信网、自动交换光网络、SDN 和量子通信等新技术、体制标准制定、运营商技术咨询等。