

量子通信技术发展现状与趋势¹

■文 / 刘乃乐（中国科学技术大学）
吴 根（科技部高技术研究发展中心）
王 兵（西南交通大学）
于笑潇（科技部高技术研究发展中心）

量子通信是已被国际上认为事关国家信息安全的战略性必争领域，并作为世界主要发达国家优先发展的科技高地。本报告在对量子通信领域国内外研究动态和前沿趋势分析的基础上，进一步对我国如何巩固和发挥优势，在新一轮竞争中继续领跑，并最终形成产业优势提出了对策建议。

一、关于量子通信技术

1. 定义与特点

单个光子不可分割和量子不可克隆原理的奇特性质，为我们提供一种新型的安全通信方式，我们称为量子密钥分发、量子保密通信，简称量子通信。

在量子通信过程中，发送方和接收方采用单光子的状态作为信息载体来建立密钥，可能遇到的窃听方法有三种：第一种是将信息载体分割成两部分，让其中一部分继续传送，而对另一部分进行状态测量获取密钥信息。但由于信息载体是单光子，不可分割，因此这种方法不可行。第二种是窃听者截取单光子后，测量其状态，然后根据测量结果发送一个相同状态的光子给接收方，以使其窃听行为不被察觉。但由于窃听者的测量行为会对光子的状态产生扰动，其发送给接收方的光子的状态与其原始状态会存

在偏差。这样，发送方和接收方可以利用这个偏差来探测到窃听行为。第三种是窃听者截取单光子后，通过复制单光子的状态来窃取信息，但按照前面所讲的量子不可克隆原理，未知的量子态不可能被精确复制。

因此，量子通信的安全性受到量子力学基本原理的充分保障。无论破译者掌握了多么先进的窃听技术、多强大的破译能力，只要量子力学规律成立，量子通信就无法被破解。

2. 作用与意义

由于通信终端、传输信道、服务器等多个环节均存在着安全隐患，网络信息安全面临着严重的威胁。通常，人们可以采用身份认证（确保是授权用户）、传输加密（确保传输过程中的安全）、数字签名（确保数据不被篡改）等手段来确保信息安全。在传统信息安全体系中，这些手段都是通过依赖于计算复杂度的加密算法来实现。然而一旦拥有足够强大的计

算能力，所有依赖于计算复杂度的加密算法都可能会被破解。

量子通信克服了经典加密技术内在的安全隐患，能够确保身份认证、传输加密以及数字签名等技术手段的无条件安全，可以从根本上解决国防、金融、政务、商业等领域的信息安全问题。量子通信是最早走向实用化和产业化的量子信息技术，普遍被国际上认为是事关国家信息安全的战略性必争领域。

3. 发展目标

发展量子通信技术的终极目标是构建全国乃至全球范围的量子通信网络体系。量子通信通常可采用在光纤中传送单光子来实现。但这存在一个严重的缺点：根据量子力学原理，量子信号不能被复制，所以不能像经典信号那样被放大；而光子易被光纤吸收，导致随着光纤传输距离的增加，光子能够达到终端的可能性将越来越低。所以仅仅利用光纤难以实现远距

离的量子通信。

为了解决这个问题，有两种可行的途径：一种是利用所谓的中继器（包括可信中继和量子中继两种），形象化的说法即“量子接力”，将相距较远的通信线路分为数段，每一段的损耗比较小，然后在中继器的帮助下，把光子携带的信息一段段如同接力赛一样向前传递，从而实现远距离的量子通信；另一种是自由空间单光子传输，由于大气对某些波长的光吸收有限，而且大气层越到高空越稀薄，光子在穿透整个垂直大气层过程中的损耗，仅相当于在靠近地面的水平大气中飞行 10 公里左右的损耗，到了外层空间则几乎没有光损耗，因此可以突破大气层，通过卫星中转实现数千公里甚至是全球化的量子通信。

量子通信技术的发展路线是：通过光纤实现城域量子通信网络，连接一个中等城市内部的通信节点；通过可信中继 / 量子中继，实现邻近两



个城市之间的连接；通过卫星与地面站之间的自由空间光子传输和卫星平台中转，实现遥远两个区域之间的连接，以此实现实用化的广域量子通信体系。

二、世界发展现状与趋势

上世纪九十年代以来，随着相关重大基础科学问题的解决和实验技术

的迅猛发展，量子信息科技已进入到深化发展、快速突破的新阶段，量子通信技术已经处于系统集成、工程化和产业化攻关阶段，呈现出重大产业革命的先兆。各科技强国都在积极整合研究力量和资源，力争在量子信息技术大规模应用方面占据先机。

量子通信作为世界主要发达国家优先发展的科技高地，有望成为支撑国民经济可持续发展和保障国家战略

安全的核心资源。继中国之后，美国、德国、意大利、加拿大、日本等国均准备实施星地量子通信计划。

欧盟在 2008 年发布了《量子信息处理与通信战略报告》，提出了欧洲量子通信的分阶段发展目标，包括实现地面量子通信网络、星地量子通信、空地一体的千公里级量子通信网络等。欧盟集中 12 个国家的 40 余个研究小组共同攻关，开展实施“基于量子密码的安全通信”工程，2008 年建成了多节点的量子通信试验

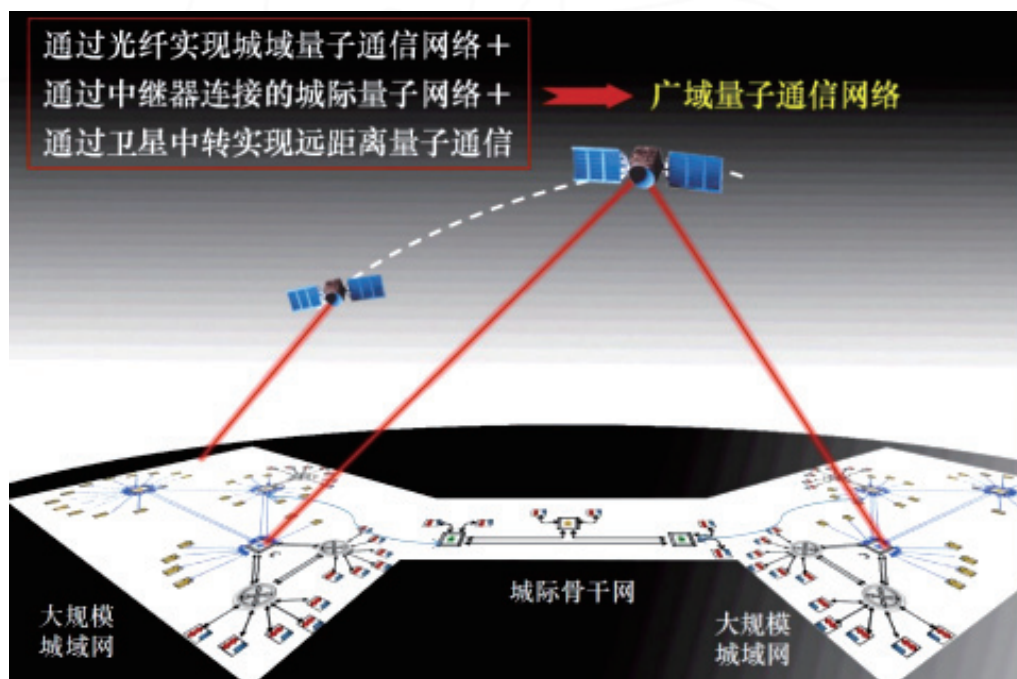


图 1 广域量子通信技术的发展路线

示范网络,展示了量子通信技术转化为应用技术的能力。这是继欧洲核子中心和国际空间站后又一大规模的国际科技合作。欧洲电信标准研究院联合了世界上水平最高的二十多个研究组,开展量子保密通信技术标准制定,目前已经发布了多项技术标准。

日本防卫省将量子通信列为未来的技术储备。2010年,日本联合欧洲多个研究组在东京建设了东京量子密码网络,集中展示最新成果,在90公里的现场光纤上实现了量子密钥分发和通信应用。

美国 DARPA 和 Los Alamos 国家实验室于 2009 年分别建成了两个多节点量子通信互联网络,与空军合作进行了基于飞机平台的自由空间量子通信研究。2014 年初,美国航空航天局(NASA)正式提出了在其总部与喷气推进实验室(JPL)之间建立千公里量级量子通信干线的计划。

量子通信潜在的商业价值吸引了来自 AT&T、Bell 实验室、IBM、惠普、西门子、日立、东芝等世界著名公司的大量资本投入。例如,全球最大的独立科技研发机构美国 Battelle 公司于 2014 年提出了商业化的广域量子通信网络规划,考虑建造环美国的

万公里量子通信骨干网络,为谷歌、IBM、微软、亚马逊等公司的数据中心之间提供量子通信服务。

三、我国发展现状与水平

经过二十多年的发展,我国在量子信息领域成为具有国际优势的研究领域,形成了很强的理论和实验技术储备,培育了一批优秀的研究团队,在量子通信、量子计算等研究方向上产生了一批具有重要国际影响的研究成果²。

“十三五”期间,国家重点研发计划“量子调控与量子信息”重点专项瞄准我国未来信息技术和社会发展的重大需求,特别对我国有优势和引领作用的量子通信领域强化支持力度。

在量子通信领域,我国在国际上首次实现了安全距离超过百公里的光纤量子通信和首个全通型量子通信网络,建成了首个规模化城域量子通信网络,首次将自由空间量子通信的距离突破到百公里量级。我国自主研发的量子通信装备为 60 周年国庆阅兵、党的“十八大”、纪念抗战胜利 70 周年阅兵等国家重要政治活动提供了信息安全保障。

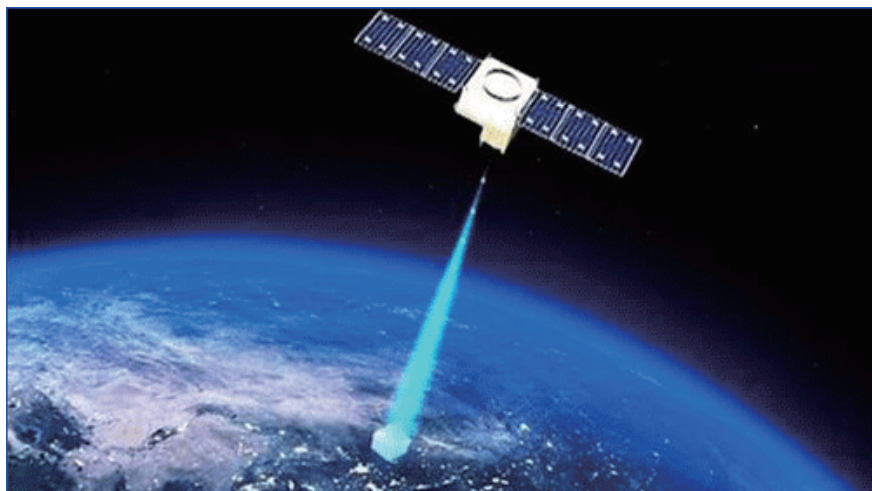
2016 年 8 月 16 日,国际上首颗量子科学实验卫星“墨子号”在酒泉卫星发射中心成功发射,为我国引领世界量子通信技术发展,开展检验量子物理基本问题前沿研究,奠定了坚实的科学与技术基础。

2016 年底,连接北京、上海的高可信、可扩展、军民融合的光纤量子保密通信骨干网“京沪干线”全线贯通,将推动量子通信技术在国防、政务、金融等领域的应用,带动相关产业发展。“墨子号”量子卫星与“京沪干线”结合,将初步构建我国天地一体的广域量子通信基础设施,全面服务于国家信息安全。

量子通信是中国具有世界领先水平的尖端技术。英国《自然》杂志在专门报道我国量子通信研究成果的长篇新闻特稿“数据隐形传输:量子太空竞赛”中指出:“在量子通信领域,中国用了不到十年的时间,由一个不起眼的国家发展成为现在的世界劲旅,将领先于欧洲和北美”。2016 年 4 月 26 日,习近平总书记视察中国科大先进技术研究院量子卫星总控中心和“京沪干线”总控中心时,对量子通信研发工作给予充分肯定并指出:“很有前途、非常重要,国家一定会支持”。

四、我国进一步发展重点和对策建议

随着量子信息技术进入深化发展阶段,特别是量子通信技术逐步走向实用化,国际竞争日益激烈,西方发达国家的政府、科研机构 and 产业资本正在加速进行战略部署,大幅度增加研发投入,依靠其长期形成的强大工业基础、人才资源储备、精密仪器设备制造能力和高效的科技成果转化链



条,对我国的领先优势构成强烈冲击。

为进一步巩固和发挥优势,使我国在新一轮竞争中继续领跑,并最终形成产业优势,建议在实施好量子调控与量子信息重点专项的前提下,进一步推进以下方面工作:

1. 组建量子信息国家实验室,实施量子技术重大科技项目

与国际传统科技强国相比,我国在科技资源整合上还有明显不足之处。一方面,由于科技体制改革红利尚未充分释放,各项机制仍需不断探索完善,科技产品市场发育较为滞后,我国高新技术企业研发能力和投入不足,在战略性科技投入方面与发达国家相比差距很大;另一方面,改变单一的短期项目资助模式尚需时日。虽然近年来国家有关部门为此进行了初步的尝试和探索,例如在量子信息领域相继成立了教育部协同创新中心和中科院卓越创新中心,但支持力度有限,仅能以“有限目标、重点突破”

的方式维持少数优势方向的研究,与该领域国际上日益加大的科技资源整合力度和支持力度差距甚大。

建议尽快启动组建量子信息国家实验室,以该实验室作为总体单位统筹实施相关量子技术重大科技项目,发挥市场经济条件下新型举国体制优势,统筹全国高校、科研院所和企业的相关创新要素和优势资源,着力突破推动第二次量子革命的前沿科学问题和核心关键技术,培育形成量子通信等战略性新兴产业,抢占国际竞争和未来发展制高点。

2. 大力推进量子通信基础设施建设,完善量子通信技术创新链

基于现有量子通信技术积累,我国已经基本具备量子通信设备的自主、可控。为了加快量子通信技术的推广应用,需要在量子保密通信“京沪干线”骨干线路建成的基础上,进一步组织有关管理部门和技术力量,在相关技术和设备系统通过相关部门

组织的安全性评测之后,尽快推进区域级的量子通信网络建设和试运营,推进量子通信技术在金融、党政、国防等重要部门的先行先试,在应用中积累工程与运营经验,形成全面、系统的量子通信网络技术标准,形成量子通信战略性新兴产业。

建议在“十三五”期间启动全国骨干量子数据网的建设,其主要内容包括:拓展、升级经过“京沪干线”验证的关键技术和定型设备应用,使之满足全国网络结构的需求;新型网络结构下,量子网络的室内联调和工程建设;部署实施覆盖全国多纵多横的量子骨干网络;探索全国骨干网络的运行维护模式;针对国防、政务、金融、互联网等多个行业应用,有针对性的定制服务模式;组建全国骨干量子数据网的建设运营主体,与相关方展开合作,开展全国网络运营,保障国家信息安全。[科技](#)

注:

¹ 本报告为科技创新战略研究专项项目“重点科技领域发展热点跟踪研究”(编号:ZLY2015072)研究成果之一。

² 在过去十余年间,我国量子调控与量子信息研究团队2次获得国家自然科学一等奖(2013年、2015年),17次入选两院院士评选的年度中国十大科技进展新闻,3次入选英国《自然》杂志或美国《科学》杂志评选的年度国际十大科技进展,13次入选美国或英国物理学会评选的国际物理学重大进展。

本文特约编辑:姜念云