

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311270

空基平台量子通信现状与展望^{*}

郑德智^{1,2,3}, 郑金雄^{2,3,4}, 李中翔^{1,2,3}, 王国俨^{2,3,5}, 胡 纯^{1,2,3}

(1. 北京理工大学前沿交叉科学研究院 北京 100081; 2. 北京理工大学长三角研究院 嘉兴 314019;
3. 北京理工大学复杂环境智能感测技术工信部重点实验室 北京 100081; 4. 北京理工大学信息与电子学院 北京 100081; 5. 北京理工大学机电学院 北京 100081)

摘 要:随着信息技术的不断发展,信息安全问题日益凸显。在军事、金融、政府、企业等领域,信息的安全和可靠性至关重要。传统通信技术已被广泛应用,包括互联网、光纤通信和无线电等。同时量子计算相关技术的进展与应用,让传统通信的安全性面临严峻挑战。基于量子的不可克隆定理与海森堡测不准原理,量子通信理论上可以达到信息论可证安全。因此,超远距离量子通信及空基平台已成研究的重点。综述了近十几年空基平台量子通信的研究进展,介绍了其出现、重要发展节点以及取得的主要成果,总结了基于自由空间量子通信以及空基平台量子中继的远距离量子通信研究现状,并基于目前量子中继存在的高度空白问题,提出了临空飞艇作为量子中继的设想。

关键词:空基平台;量子通信;光纤通信;自由空间;卫星通信

中图分类号: TN92 TH743 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Current status and prospect of quantum communication on space-based platforms

Zheng Dezhi^{1,2,3}, Zheng Jinxiong^{2,3,4}, Li Zhongxiang^{1,2,3}, Wang Guoyan^{2,3,5}, Hu Chun^{1,2,3}

(1. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314019, China;
3. MIIT Key Laboratory of Complex-field Intelligent Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
4. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
5. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the continuous development of information technology, the issue of information security has become increasingly prominent. In the military, finance, government, enterprise and other fields, the security and reliability of information is of paramount importance. Traditional communication technologies have been widely used, including the Internet, optical fiber communication and radio. Meanwhile, the progress and application of quantum computing related technologies have made the security of traditional communication face severe challenges. Based on the quantum non-cloning theorem and Heisenberg's uncertainty principle, quantum communication can theoretically achieve provable security in information theory. Therefore, ultra-long-distance quantum communication and space-based platforms have become the focus of research. This article reviews the research progress of space-based platform quantum communication in the past ten years, introduces the emergence of space-based platform quantum communication, important development nodes and main achievements, and summarizes the research status of long-distance quantum communication based on free space quantum communication and space-based platform quantum relay. Based on the current problem of high gap in quantum relay, the idea of airship as quantum relay is proposed.

Keywords: space-based platform; quantum communication; optical fiber communication; free space; satellite communication

0 引 言

早在 20 世纪 60 年代,有学者提出了利用量子力学进行光通信的理论过程,这标志着量子信息理论的诞生^[1]。随着不断发展,21 世纪 10 年代,第二次量子革命利用量子纠缠等规律发展了量子信息技术,在信息处理速度、信息安全与信息容量等方面发挥了极大作用^[2]。其中,量子密钥分发技术 (quantum key distribution, QKD) 利用量子的不可克隆定理与海森堡测不准原理,理论上可以达到信息论可证安全^[3],能够满足当下不断增长的信息安全需求。因此,量子信息技术成为了各个国家研究与发展的热点,基于量子信息技术的通信平台成为了各国研究的重点。

量子通信从出现发展至今,其传输介质从开始的光纤传输发展到自由空间传输。我国“十四五”时期提出了建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的信息基础设施的发展目标。天地一体化网络是我国当下正在建设和发展的重要基础设施,空基平台作为实现量子通信的一部分,同时也能够充当量子中继,实现地面站与地面站之间的超远距离量子通信,其重要性不言而喻^[4]。因此要实现完备的量子通信网,空基平台是不可或缺的重要组成部分^[5]。

1 空基平台自由空间量子通信

量子通信从出现发展至今,研究的热点问题一直都是如何实现更远距离的量子信息传输。在起步阶段,各研究人员都以光纤为传输媒介进行研究,他们使用不同方法减小损耗以拓展传输距离。同时,大家将目光投向了自由空间,这是由于量子信号对损耗以及噪声的敏感性,光纤作为有损信道,其传输距离存在极限^[6]。在没有地面中继的情况下,光纤量子通信不可能实现更远距离的量子通信,同时由于地理环境的限制,仅凭地面中继也无法实现全球范围的量子通信。而空基平台自由空间量子通信则是为突破量子通信的距离极限进而实现全球量子网提供了可能。

1.1 自由空间量子通信

光纤量子通信过去十几年的发展如表 1 所示^[7-15]。目前,光纤量子通信的传输距离的极限达到 1 002 km,此外光纤的铺设以及地面中继的建设会受限于全球范围内复杂的地理环境。由此可见,光纤量子通信很难实现全球范围内的通信网络覆盖^[16]。这也就促使了自由空间量子通信的出现,以大气为传输媒介,其灵活性高、损耗低,能够实现更远距离的传输,逐渐成为了研究热点^[17]。

表 1 光纤量子通信突破历程
Table 1 Development history of optical fiber quantum communication distance

年份	文献	距离/km	意义
2005	[7]	125	系统长期误码率低于 6% ;并实现了动态图像的加密传输
2006	[8]	107	基于诱骗态方案,实现能够保证绝对安全的 107 km 光纤量子通信实验
2009	[9]	250	突破通信距离,但安全通信速率低
2014	[10]	200	利用探测效率超过 40% 的超导纳米单光子探测器进行测量设备无关量子密钥分发实验 (measurement-device-independent quantum key distribution, MDI-QKD)
2016	[11]	404	实现超低损耗光纤下的 MDI-QKD
2018	[12]	421	利用诱骗态协议的三态 Time-bin 编码方案实现光纤信道的 QKD 实验
2019	[13]	509	实现超低损光纤下的“发送-不发送”双场量子密钥分发协议 (sending-or-not-sending twin-field quantum key distribution, SNS-TF-QKD)
2022	[14]	658	实现极远距离双场量子密钥分发 (twin-field quantum key distribution, TF-QKD), 成功进行光纤传感测试
2023	[15]	1 002	突破光纤量子通信距离极限

从自由空间量子通信出现以来,各国研究人员都在致力于利用它实现全球量子通信网。与光纤量子通信的研究趋势相同,自由空间量子通信的传输距离在不断突破。2015 年,Herbst 等^[18]实现了距离 144 km 两岛间的量子通信,通过实验验证了两岛量子之间存在量子纠缠,

但这是基于两个互相可视的地点。
当前,全球量子通信网的重要组成部分包括地-地光纤量子通信、地-地自由空间量子通信以及星-地自由空间量子通信,其各方面对比如表 2 所示。可以看出,由于地球曲率的存在,仅依靠地-地自由空间量子通信也无法实现

全球范围的量子通信。地面光纤量子通信虽发展较为成熟,可实现精细化的网络覆盖,但受到复杂地形以及光纤高损耗的限制。地面两种量子通信方式的结合也无法实现量子通信网的大范围覆盖,全球量子通信网的实现需要

依赖星-地量子通信的发展。但当下星-地量子通信还存在诸多挑战,需要地-地自由空间量子通信以及光纤量子通信的细化补充。因此,针对空基平台中的卫星平台与地面间量子通信所存在挑战的研究逐渐成为发展的重点^[19]。

表 2 3 种量子通信方式对比
Table 2 Comparison of three quantum communication methods

通信方式	地-地自由空间量子通信	星-地自由空间量子通信	地-地光纤量子通信
传输介质	大气	大气	光纤
目前无中继传输距离极限	144 km	4 600 km	1 002 km
距离限制主要的影响因素	地球曲率以及大气传输损耗	大气传输损耗与星-地系统损耗	光纤信道传输损耗
通信时间	选择合适光源能够实现全天通信	只能在固定时间窗内实现通信	可以实现全天通信
地形影响	受地形影响小	受地形影响小	无法适应复杂地形
当下发展所存在的主要挑战	受地球曲率限制,发展需依靠量子中继	通信时间受限,链路系统损耗,极端环境	复杂地形限制光纤信道损耗
优势	借助合适中继可实现更远距离的全天候量子通信	通信距离远,覆盖范围广,外太空光信号损耗小	发展最成熟,可量子通信实现精细化覆盖

星-地自由空间量子通信的发展主要受到通信时间有限、高干扰和极端环境 3 大挑战。对于通信时间有限的方面,由于地球自转与除静止卫星以外的其他卫星轨道角速度不同,无法实现全天候的通信。处于近地轨道的卫星只能在非常精确的时间窗内与地面站进行通信^[20]。十分有限的传输时间限制了 QKD 在短时间间隔内获取足够信息的能力。针对这一限制,近些年部分学者对更高轨道卫星与地面站进行 QKD 的可行性进行了理论分析以及部分模拟实验验证^[21-22]。

对于高干扰的挑战,主要表现在两个方面,即星-地链路系统本身存在的损耗以及大气所带来的各种噪声与干扰。卫星与地面站之间的通信链路系统的损耗问题最大的影响因素来源于光衍射所造成的光束发散。光束发散导致最终到达接收器的光束光斑比接收器望远镜的尺寸大上数倍,且与链路长度的平方成正比^[23]。对此,许多团队通过对望远镜的尺寸进行改良,并使用星跟踪器等建立指向跟踪系统对地面站望远镜进行指向,以此降低因衍射所带来的损耗^[20,24-25]。同时,链路中接收器与发射器的效率也会直接影响整个系统的损耗,随着单光子探测器的不断发展,其探测效率越来越接近理想效率^[26],探测效率的提高为损耗的减小起到正向作用。

大气中各因素对星-地量子通信带来的影响主要分为 3 方面,分别是大气湍流、大气噪声以及恶劣天气的影响。首先对于大气湍流而言,在星-地链路中,由于大气折射率随机起伏变化所产生的湍流会对光信号产生不同程度的影响。链路中的光信号在受到大气湍流效应影响

时,会出现振幅闪烁、光束扩展、漂移以及相干衰减等负面影响^[27]。这些都会增加链路损耗,对于大气湍流效应的研究是减小损耗的关键。因此一些学者对大气湍流进行研究^[27-30],为星-地自由空间量子通信系统的设计提供理论支持。而大气噪声主要是背景噪声,在自由空间中,任何背景辐射都可以作为噪声进入系统,尤其是背景光的影响最大。背景光主要有两类,一类是太阳与月亮等辐射或反射的光,另一类人为的环境光^[31]。对于人为环境光,能够较为容易地实现人为控制。而对于自然辐射光,近些年学者的研究通常通过增加不同滤波器来降低影响。除此之外,还有学者利用 1 550 nm 波长的特殊性降低了背景噪声的影响^[32-33]。

恶劣天气对星-地链路的影响主要是其对量子信号有着很强的衰减作用,几种常见的恶劣天气包括雾霾、降雨、降雪、大雾等。针对这些恶劣天气许多学者根据不同的天气类型展开了各自的研究,对不同天气下量子通信的干扰进行分析,为不同环境下的星-地量子通信正常运行提供了理论依据^[34-37]。其中刘涛等^[34]经过研究分析发现在长距离传输的情况下,1 550 nm 波长具有更强的抗干扰能力,并经过对比实验,得出降雨天气相较而言影响最小的结论。除了这些对不同天气下干扰的分析外,Mastriani 等^[19]利用无人机作为量子存储器穿越云层与地面站进行通信来减小天气所带来的影响。

此外,星-地自由空间量子通信中的卫星所处太空的极端环境也是一大挑战。用于星-地量子通信的卫星需要具备足够的抗冲击以及抗干扰能力,在有限载荷条件下实现更高性能是实现星-地量子通信的基础。

近年来许多国家与团队都进行了用于星-地量子通信卫星的研究发展,我国在量子卫星的研究方面走在了世界前列。

综上所述,自由空间量子通信的发展是实现全球量子通信网的关键,星-地量子通信的优化更是重中之重。与光纤量子通信以及地-地自由空间量子通信相比,卫星空基平台的发展存在诸多大挑战。针对这些挑战,利用不同方法进行优化解决至关重要,这是空基平台自由空间量子通信主要的发展方向。

1.2 空基平台自由空间量子通信发展

自由空间量子通信的快速发展对空基平台提出了需求,大量学者针对上述挑战进行了研究探索,已经取得了不少卓越的成果。2017 年,我国科学家借助所发射的“墨子号”量子实验卫星实现了 1 200 km 距离的星-地量子密钥分发与 1 400 km 距离的上行链路量子隐形传

态^[38-39],这标志着星-地量子通信逐渐发展成熟。

星-地量子通信的发展分为 3 个阶段。第 1 阶段,科学家们进行了一系列的固定地基平台模拟实验,验证了实现星-地量子通信距离上的可能性;第 2 阶段,一些学者利用热气球、无人机等天基平台与移动平台进行模拟实验,展示了与卫星运动状态相仿平台的量子通信性能,证明了可移动卫星平台与地面站量子通信的可行性,并针对大气噪声以及望远镜指向问题进行了研究分析;第 3 阶段,各个国家与研究组织以前两阶段的研究成果为基础逐步进行星基平台的直接实验,在这期间不断优化星-地链路系统,减小系统损耗,采用不同方法减小大气中诸多干扰因素的影响,最终实现了星-地间的量子通信。表 3 所示为星-地量子通信这 3 个阶段各自的发展以及每阶段的研究重点和研究成果,罗列了其工作在星-地量子通信发展中的意义。

表 3 星-地量子通信发展历程				
Table 3 The development history of satellite-ground quantum communication				
平台	年份	文献	距离/km	意义
固定地基平台	1999	Hughes 等 ^[40]	1	提出第 1 个卫星到地面的量子密钥分配方案
	2002	Kurtsiefer 等 ^[41]	23. 4	高海拔自由空间 QKD 验证
	2005	Peng 等 ^[42]	13	首次证明穿透大气厚度的嘈杂环境后期望的纠缠仍存在
	2007	Ursin 等 ^[43]	144	岛间密钥交换,突破距离
	2010	Jin 等 ^[44]	16	实现自由空间量子隐形传态
天基平台移动平台	2013	Wang 等 ^[45]	20	浮空平台随机运动、姿态变化和振动模拟 QKD 实验
	2013	Wang 等 ^[45]	96	远距离高损耗 QKD 实验
	2013	Wang 等 ^[45]	40	快速移动平台 QKD 实验
	2013	Nauerth 等 ^[46]	-	地面站与飞机之间的 QKD
	2015	Bourgoin 等 ^[25]	-	克服主动纠正光束指向、光子偏振以及飞行时间的挑战
星基平台	2008	Villoresi 等 ^[47]	-	实现低轨卫星单光子交换
	2009	Bonato 等 ^[48]	-	对低轨道卫星与地面站 QKD 可行性进行新的分析
	2012	Yin 等 ^[49]	97	证明基于卫星的超长距离量子隐形传态的可行性。
	2015	Vollone 等 ^[21]	-	实现第一个卫星量子比特传输与反向反射器
	2016	Elser 等 ^[50]	-	相位编码量子通信协议成为一种可行的方案。
	2016	Dequal 等 ^[51]	7 000	实现中轨卫星单光子交换
	2016	彭承志等 ^[52]	-	“墨子号”量子卫星发射
	2017	Oi 等 ^[53]	-	证明纳米卫星作为卫星量子通信研究平台的可行性
	2017	Liao 等 ^[38]	1 200	实现卫星与地面千赫兹密钥率的诱骗态 QKD
	2017	Ren 等 ^[39]	1 400	实现上行链路隐形传态,待传送态的置信度超过 99. 7%
	2018	Calderaro 等 ^[22]	20 000	扩展长距离自由空间单光子交换的距离极限
	2020	Yin 等 ^[24]	1 120	借助墨子号双向下行链路,实现地面站间的 QKD
	2022	Li 等 ^[54]	1 200	利用墨子号先验分布纠缠,验证远程量子态传输可行性

1) 地基平台与天基平台模拟实验

(1) 固定地基平台模拟实验

星-地量子通信研究的开始于 1999 年, Hughes 等^[40]提出了第 1 个卫星到地面的 QKD 方案, 受限于技术水平, 当时的传输距离只有 1 km。随着学者们的努力, 传输距离不断增加。Kurtsiefer 等^[41]在 2002 年对高海拔地区相距 23.4 km 自由空间 QKD 的可行性进行了验证, 但星-地量子通信还需要考虑星-地链路中高噪声的大气环境所带来的高损耗问题。2005 年, Peng 等^[42]通过实验证明了所期望的量子纠缠在穿过 13 km 的高噪声大气环境后依旧存在。这个距离超过了大气圈的有效厚度, 有效证明了实现星-地量子通信的可能性。但传输距离的限制仍存在, 2007 年, Ursin 等^[43]实验性地证明了 Canary 岛到 Tenerife 岛的单向自由空间量子纠缠分发, 两岛之间的距离超过 144 km。这些地面实验为实现星-地量子通信打下了良好基础^[40-43]。

(2) 天基平台与移动平台模拟实验

固定地基实验无法验证运动状态下的卫星与地面站 QKD 的可行性。针对这一问题, 后续研究中出现一些学者利用地面设备或飞行平台对卫星的移动等状态进行模拟, 通过研究设备或平台与地面站之间的 QKD 性能验证星-地间 QKD 的可行性。

2013 年, Wang 等^[45]利用诱骗态 QKD 系统分别通过距离 40 km 转盘上的移动平台验证卫星在快速运动时的性能; 利用距离 20 km 的热气球浮空平台验证卫星在姿态变化、振动以及随机运动状态下的性能; 利用 97 km 高噪声通道实验验证高损耗状态下的性能。相关参数如表 4 所示。

表 4 实验参数与实验结果^[45]

Table 4 Experimental parameters and results			
参数	转盘上的 移动平台	浮空平台 (热气球)	高损耗通道 (96 km, 50 dB 损耗)
N	2.7×10^{10}	3.15×10^{10}	1.59×10^{11}
Q_{μ}	5.34×10^{-5}	5.90×10^{-5}	4.41×10^{-6}
Q_v	2.17×10^{-5}	2.42×10^{-5}	2.36×10^{-6}
Y_0	3.00×10^{-6}	2.69×10^{-6}	4.30×10^{-7}
$E_{\mu}/\%$	2.73	2.35	4.04
K_{μ}/T	159.41	268.87	48.03

表 4 中 N 表示总脉冲数, 即来自信号状态(诱骗态)的计数速率; Y_0 表示真空状态的计数速率, 即信号状态的量子比特误码率(quantum bit error ratio, QBER), 表示从原始密钥中提取出来的最终密钥数; T 为时间。由实验结果可知, 3 个实验中的 QKD 都良好运行, 量子比特误码率都在较低范围, 说明系统具有较好稳定性和抗干扰能力。

2013 年, Nauerth 等^[46]首次证明了 BB84 协议在飞机和地面站之间 QKD 传输的可能性, 飞机上的光学器件位置以及飞行轨迹如图 1 所示。飞机轨迹是以地面站为圆心, 半径为 20 km 的大致圆周, 飞行速度为 290 km/h。他们实现了平均信号脉冲强度为 0.5 光子/脉冲条件下 4.77% 的 QBER。这一实验利用移动的飞行平台进行低轨卫星高速以及圆周运动状态的模拟, 证明了高速圆周移动下的光学器件能够与地面站建立起较为稳固的通信链路。

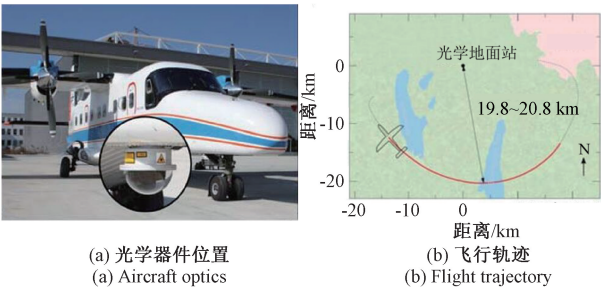


图 1 飞机光学器件与飞行轨迹图^[43]
Fig. 1 Diagram of aircraft optics and flight trajectory

前面两个团队对移动平台高速运动下的 QKD 性能进行了实验验证, 并且 Nauerth 等^[46]还考虑了圆周运动状态, 提供了一定的运动角速度。但还未达到与卫星运动状态相比拟的运动角速度。基于此, 2015 年, Bourgoin 等^[25]利用近距离下的卡车运动实现高角速度, 该运动角速度值与典型 600 km 低轨卫星平台的角速度相当。实验的示意图如图 2 所示。卡车与地面站相距约 650 m, 测试期间行驶的距离约 80 m。采用了包含飞行时间校正的耦合算法, 实现货车上 QKD 接收器偏振漂移的自动校正。实验证明了使用高角速度移动接收平台进行 QKD 的可行性。这些移动平台与飞行平台的实验从不同方面对卫星运动状态进行模拟, 通过实验验证了高线速度与高角速度运动的卫星与地面站建立稳定通信链路的可行性。这是对星-地量子通信中望远镜指向跟踪性能挑战能够解决的一个验证。

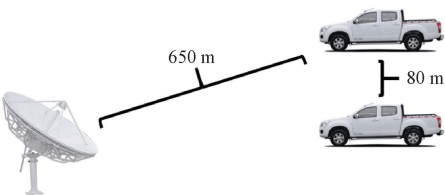


图 2 卡车模拟实验示意图^[25]
Fig. 2 Diagram of a truck simulation experiment

2) 星基平台直接实验

(1) 利用卫星角棱锥反射器实现单光子交换

地球层面上的相关模拟实验验证了星-地量子通信的可行性。但要实现星-地量子通信,必须对卫星层面进行研究。

早在 2008 年, Villoresi 等^[47]将目光投向了星-地间的直接实验。他们将地面站对准配有角棱锥反射器的低轨卫星并发射弱激光脉冲,利用意大利航天局的测距望远镜对透射的光子进行探测。他们探测到了轨道高度为 1 485 km 卫星的反射。虽然由于双向路径的高损耗无法实现星-地间的 QKD,但这项实验证实了星-地量子通信链路的存在与可行性。当时存在的主要问题在于信噪比以及偏振对准控制。2009 年, Bonato 等^[48]对去年的实验进行了新的分析,对实验的两个主要问题进行了讨论:对于信噪比问题,通过对大气湍流以及背景噪声的详细分析来改进上述实验的模型。而对于偏振控制方面,他们提出了不同波长的信道探测以及相同波长下探测脉冲的多路时分复用两种解决方案,并证明了采用上述方案误码率可以保持在较低水平。这些方案的提出正是针对上节中所提到的自由空间量子通信所存在的挑战中大气因素影响的解决方案。

2015 年, Vallone 等^[21]利用卫星角棱锥反射器作为轨道上的发射器,实验证明了从低轨道卫星到地面站的可靠传输,其错误率能够满足 QKD 传输要求。至此,人类第 1 次实现了星-地间的量子信息可靠传输,这是实现星-地间量子通信的重要里程碑, QKD 演示方案如图 3 所示,在意大利测距天文台产生一系列 100 MHz 的量子位脉冲并发射向指定卫星,并通过卫星以单光子形式反

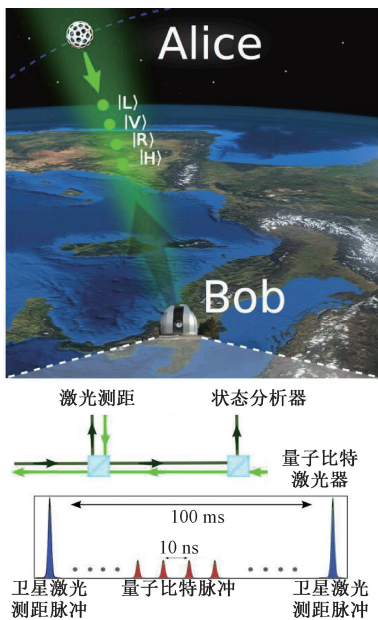


图 3 基于角棱锥反向反射器的卫星 QKD 演示方案^[21]

Fig. 3 Satellite QKD demonstration scheme based on corner-cube retroreflectors

射回来,用以模拟卫星的 QKD 源,使用 10 Hz 重复频率的卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 信号实现同步。紧接着,提出了一种反向反射器,并用其证明了卫星与地面间的诱骗态 BB84 协议是可实现的。

在低轨卫星与地面站的 QKD 实现后,由于量子力学领域的研究所需要的链路距离超过低轨链路的尺度^[55],同时更高轨道卫星能够提供与地面站更长时间的通信,尤其是静止轨道卫星能够实现一定范围区域内全天候的通信。特定的时间窗口的限制可以通过实现更高轨道卫星与地面站的量子通信解决,同时减小恶劣天气对星-地量子通信的影响。因此,探究更远距离的星-地量子通信是解决星-地量子通信中传输时间限制的挑战的关键,也是量子力学研究的需要。

2016 年, Dequal 等^[51]对中轨卫星的星-地量子通信进行研究,采用卫星角棱锥反向反射器,实现了中轨卫星 LAGEOS 与倾斜距离超过 7 000 km 地面站的单光子交换。双向协议原理如图 4 所示。同时,提出利用性能更优越的超导单光子探测器进行改进的可能,与中轨卫星 LAGEOS 同轨道卫星的 QBER 理论可达 0.5%。但超导单光子探测器比硅基探测器灵敏度面积较小,会因光耦合导致效率变低。随着单光子探测器的不断发展,探测效率的不断提高,星-地量子通信中系统本身所带来的损耗挑战将得到很好的解决。

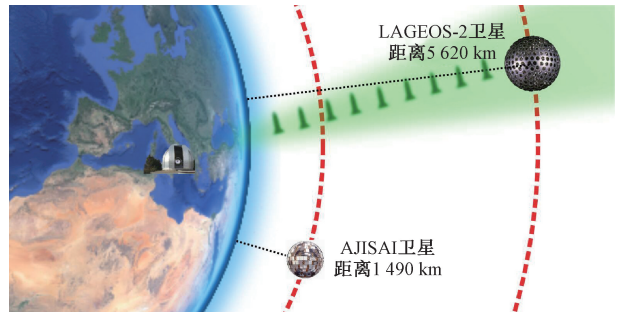


图 4 基于角棱锥反向反射器的双向协议原理^[51]

Fig. 4 Bidirectional protocol schematic based on corner cube retroreflectors

更高轨道卫星具有与地面站通信时间更长的优势。所以 Calderaro 等^[22]将目光投向了位于更高轨道的全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS), 在 2018 年利用先前用于实现中轨卫星单光子交换的卫星角棱锥反向反射器以及已有实验条件,首次实现了距离地面站与相距 20 000 km 全球导航卫星的少量光子交换。高度远高于近地轨道,近地轨道与全球导航卫星的距离差距如图 5 所示。通过评估实际信道损失,能够同时评估专用量子有效载荷与地面站的特性,证明了 GNSS 终端与地面站之间量子通信的可行性。随着系统损耗的减小以及针对大气损耗方案的不断创新,未来将实现 GNSS 终端与地面站的量子通信。

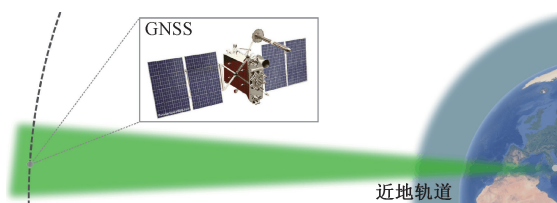


图5 地面终端与全球导航卫星典型距离^[22]

Fig. 5 Typical distance between ground terminals and global navigation satellites

实现全天时星-地量子通信还存在白天高背景噪声的挑战。对此,2017年,Liao等^[32]利用1 550 nm工作波长,结合自由空间单模光纤耦合技术以及超低噪声的上转单光子探测器克服了白天高背景噪声的影响。在白天演示了相距53 km两地的自由空间 QKD,其信道总损耗约为48 dB。证明了基于卫星量子通信在白天实现的可能性,为全天候的星-地量子通信奠定了基础。

(2) “墨子号”量子科学实验卫星

除利用卫星角棱锥反射器实现单光子交换,还可通过专用卫星进行量子通信。我国于2016年8月成功发射了世界上第一颗用于空间尺度量子科学研究的卫星——“墨子号”量子科学实验卫星。运行于高度约500 km的极地轨道。同时墨子号的发射有两个预定科学目标:进行星-地高速量子密钥分发实验,并以此为基础进行广域量子密钥网络实验;在空间尺度进行量子纠缠分发以及量子隐形传态实验^[48-50,52]。

自墨子号发射以来,我国科学家利用这颗卫星研究出了许多成果,其中包括了上述两项预定科学目标。2017年,Liao等^[38]利用墨子号实现了千赫兹密钥率的诱骗态 QKD,卫星与地面的距离为1 200 km。利用高信道损耗的弱相干脉冲检测光子数分裂窃听,保证了密钥的安全性。同时在1 200 km的距离上,星-地 QKD 的传输效率要比等距的光纤通信高20个数量级。2017年,Ren等^[39]利用墨子号实现了距离为1 400 km的上行链路量子隐形传态。其6个待传送态的置信度均超过了99.7%,提高这种置信度是未来实现量子信息处理网络的关键。远距离量子隐形传态作为分布式量子信息处理网络的基本单元,这一成果为未来关于量子的各项研究奠定了坚实基础。

完成预设科学目标后,我国科学家利用墨子号实现了新的成绩。2020年,Yin等^[24]演示了相距1 120 km的两个地面站之间基于纠缠的 QKD。实验的示意图如图6所示。

两地面站通过两条下行链路接收墨子号的纠缠光子。实验采用BBM92协议,并通过贝尔测试来验证两个地面站之间的纠缠。实现了0.12 bps的有限密钥率。这

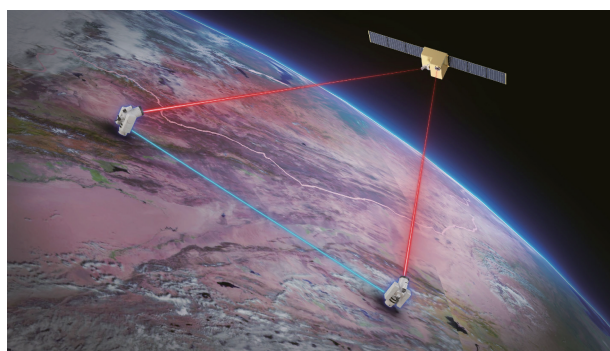


图6 相距1 120 km两地面站 QKD 示意图^[24]

Fig. 6 Diagram of two ground stations QKD at a distance of 1 120 km

一实验不但将地面上不使用其他中继的量子传输距离提高了10倍,还将 QKD 的实际安全性提高到了新的高度。

2022年,Li等^[54]在两个地面站与墨子号卫星的先验分布纠缠的辅助下,验证了这两个相距1 200 km地面站远程量子态传输的可行性。6个转移的不同量子态的平均置信度为 0.82 ± 0.01 ,超过了量子比特单拷贝经典极限的 $2/3$ 。这些成果标志着我国在卫星量子通信方面已经走在了世界前列。

(3) 纳米卫星

我国所发射的墨子号协助实现了量子技术上的多个突破,但这是基于国家层面的研究支持,其开发时间长,投入成本高^[53],其他研究者大多没有条件发射这样大型的量子科学实验卫星。这对于较小组织或者个人对量子通信方面的研究显然是不利的。因此,部分学者提出了利用纳米卫星进行量子通信相关实验的构想。近年来,纳米卫星由于其开发时间短、成本低的优势得到了广泛应用,各个国家也着手进行纳米卫星量子通信的研究。

2016年,Chandrasekara等^[56]利用纳米卫星进行在轨光子计数实验,演示了太空条件下光子对的产生与偏振相关,在轨光子实验结果与地面测试相匹配,表现出 $97\% \pm 2\%$ 的相关性。这证明了纳米卫星用作卫星量子通信的可行性。

而利用纳米卫星实现星-地量子通信的关键在于纳米卫星携带的微型光子源的成功运行,即克服极端环境挑战。需要光子源承受纳米卫星的发射应力并在有限的能量下运行。2020年,Villar等^[57]成功演示了低轨纳米卫星上偏振纠缠光子源的工作,在 $16^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 的温度范围内成功生成了纠缠光子对。这是实现纳米卫星量子通信的关键一步。在将来的几年,许多国家计划发射新的纳米卫星实现基于纳米卫星的星-地量子通信^[58]。

2 空基平台量子中继

随着星-地量子通信的不断发展,其传输距离与性能也不断优化,为实现全球量子通信网提供了坚实基础。但由于现阶段星-地自由空间量子通信的限制,实现全球量子通信网还需要地面站之间的远距离自由空间量子通信进行补充。这种远距离通信需要借助量子中继实现。而在现今的量子通信网中,空基平台其作为量子中继扮演着不可或缺的角色。目前,空基平台量子中继大致分为两种,基于卫星的量子中继和基于无人机的量子中继。

2.1 卫星量子中继

星-地量子通信的性能与传输距离随着发展不断优化,学者们利用卫星作为量子中继在量子通信网的构建上取得了一定的成就。

墨子号自发射以来,不仅实现了远距离 QKD 以及量子隐形传态等,还为实现量子通信网提供了很大帮助。2018 年,Liao 等^[59]将墨子号作为可信中继,利用墨子号分别与兴隆以及奥地利的格拉茨建立安全密钥。墨子号处理来自两地的密钥信息,并将结果中继到其中的一个地面站,这样相距 7 600 km 的两地便产生出了用于洲际量子安全通信的密钥。这为超长距离的全球量子通信提供了有效方案,也是构建全球量子通信网的关键基础。

墨子号不仅为洲际通信提供解决方案,还协助我国科学家构建了全球首个星-地量子通信网。2021 年,Chen 等^[60]报告了我国通过已有的地面量子通信网与卫星链路相结合实现的星-地量子通信网。量子通信网中的两条卫星链路如图 7 所示。地面量子通信网由光纤网络覆盖了 2 000 km 的范围,在集成了卫星链路后,QKD 网络扩展到了 2 600 km 以外的远程节点,这便实现了全球首个星-地量子通信网,其总距离达到了 4 600 km。这

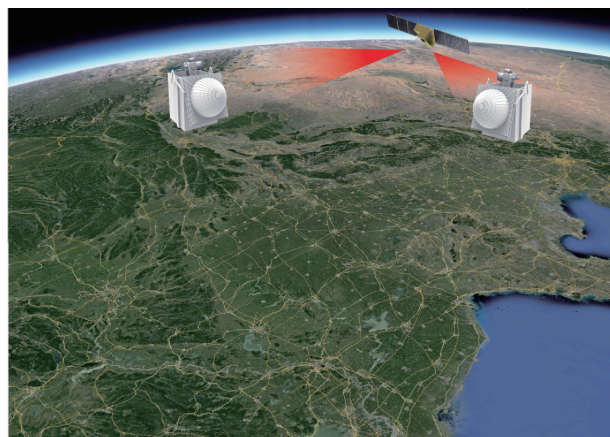


图 7 量子通信网中的卫星链路^[60]

Fig. 7 Satellite links in quantum communication networks

个星-地量子通信网的实现,标志着我国已经构建出天地一体化广域量子通信网的雏形,这为实现全球量子通信网打下了良好基础^[61]。

2.2 无人机量子中继

利用卫星作为量子中继可实现更大范围的量子通信网,但其还受限于恶劣天气以及通信时间有限等因素。无人机作为量子中继,起到了对卫星中继进行补充的作用,其能与卫星以及地面站都建立量子通信链路,解决了卫星建立多节点量子网络的成本以及难度问题,降低了上述因素的影响,其重要性不言而喻。

2019 年,Liu 等^[62]提出了一种基于无人机量子中继的可伸缩多节点量子网络,其架构如图 8 所示。无人机作为便携式量子节点与现有卫星和地面站进行连接,且不同大小无人机能够在不同空间尺度上按需建立合适规模的量子通信网,以此能够期望构建出一个覆盖全面且广泛的量子通信网。利用单模光纤耦合技术实现级联传输,使用高精度采集、指向以及跟踪系统来克服恶劣天气的影响,展现了 200 m 范围内的第一个基于无人机的量子通信网。

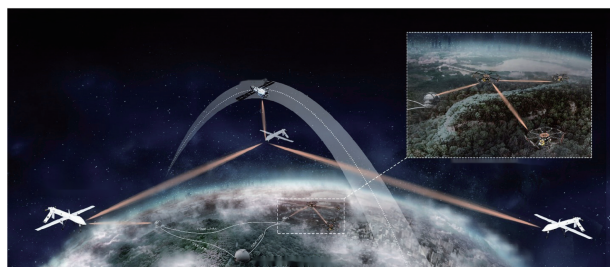


图 8 具有无人机链路节点的量子网络^[62]

Fig. 8 Quantum network with drone link nodes

无人机量子中继除了能够使量子网络更加灵活,还能够降低对量子中继卫星的要求。2021 年,Mastriani 等^[19]提出了一种基于无人机的量子通信网络,以更复杂的无人机中继实现对卫星中继的简化,降低了卫星的设计建造以及运行维护成本。利用无人机进行 3 步操作如图 9 所示,首先两架无人机位于云层之上与卫星形成通信链路,分别得到纠缠光子,而后无人机利用量子存储器携带纠缠光子穿越云层,最后在穿过云层后每架无人机产生纠缠对,保留一个,将另一个分配到最近的地面站。这同时也解决了量子通信受限于天气的问题。

两种量子中继由于其自身特点,适用于不同场景,在量子通信网中所发挥的作用也不尽相同,对比如表 5 所示。

卫星量子中继覆盖范围广,但灵活性低且一次的通信时间短,同时也容易受到恶劣天气的影响。而无人机量子中继灵活性高,但其覆盖范围小,同时无人机自身的

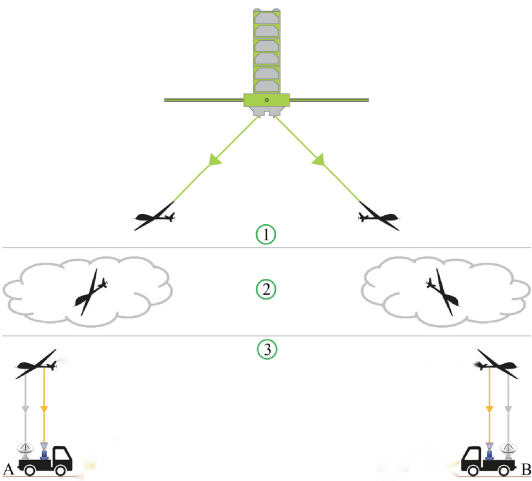


图 9 降低卫星成本的无人机架构^[17]

Fig. 9 UAV architecture to reduce the cost of satellites

表 5 两种量子中继比较

Table 5 Comparison of two quantum relays

参数	卫星量子中继	无人机量子中继
工作时间	仅能在特定时间窗口内发挥作用,一般仅有几分钟	数十分钟持续工作时间
覆盖范围	数千千米	典型覆盖范围数百米
飞行高度	约为 500 km	最高 17 km
灵活性	低,由于轨迹固定,基本无法调整中继位置姿态	高,无人机能轻松进行位置与姿态变化
载荷能力	>200 kg	数十千克
发展挑战	有效工作时间的提高,恶劣天气与系统损耗的优化	无人机续航能力与灵活程度的提升与平衡

载荷能力有限,需要在保证灵活度的前提下提高其载荷与续航能力。

与此同时,在低轨卫星高度以及无人机飞行高度之间还存在很大空域。该部分高度为临近空间,如果在这段空间内增加量子中继,将为量子通信网的构建以及性能提升提供巨大助力。临空飞艇的工作高度介于常规航空器的最高飞行高度和航天器的最低轨道高度之间,同时具有良好的续航以及载荷能力^[63]。具备弥补上述两种量子中继不足的可能,临空飞艇可以作为新型量子中继平台,与卫星、地面站等组成更为完备的天地一体化量子通信网。

3 结 论

量子通信从提出至今已经有数十年的时间,在这段时间内,各国各界学者都从不同的方面贡献出自己的力量。量子通信的发展包括光纤量子通信、地面自由空间量子通信以及星-地量子通信 3 个不同方面。发展初期,光纤量子通信其传输媒介依靠光纤链路,研究人员也致力于提高光纤量子通信的传输距离。但由于量子对损耗以及噪声的敏感性,光纤信道其存在的反射等干扰就致使了光纤量子通信存在传输距离的极限。目前国家经过多次技术突破,光纤量子通信的极限距离高达 1 002 km,但无法单独依靠光纤量子通信实现全球量子通信网的构建。同时,光纤通信由于其传输介质的铺设极大受限于复杂地形,制约了全球范围通信网络的实现。而自由空间量子通信的提出是为了弥补上述不足,其发展也是围绕着不断延长传输距离进行的。但地面上的自由空间量子通信受到大气噪声、地球曲率等的限制,也存在着传输距离的极限,无法单独实现所需超远距离的网络覆盖。

卫星量子通信的提出解决了这一问题。但其发展是曲折的,自第一个星-地量子密钥分配方案提出以来,许多研究者围绕着其可行性做了一系列模拟实验,历经近十年努力,终于实现地面站与卫星的第一次单光子交换。迈出星-地量子通信的第一步。而后又历经近十年我国发射了第一颗量子科学实验卫星,是量子通信发展的重要里程碑。借助墨子号我国取得了相当大的成就,实现了全球首个星-地量子通信网,是迈向全球量子通信网的一大步。同时,纳米卫星也因体积小、成本低、投入时间小的优势逐渐成为了新的研究热点,各国科学家也借助纳米卫星进行了一定研究。

空基平台量子通信发展至今,其技术已经日渐成熟,大家所研究的最终目标都是实现全球量子通信网。不论是对更高轨道卫星的星-地量子通信的探索,还是利用无人机等平台细化量子通信网,其目的是最终搭建出更为完备的全球量子通信网。而针对目前量子中继存在的高度空白与其他不足,临空飞艇凭借自身独特的飞行高度与功能具有成为新型量子中继的潜力,其将为全球量子通信网的完善提供新思路。未来各国研究的方向与重点将继续拓展量子通信的极限距离并利用空基平台完善量子通信网的各项性能,实现量子通信网的全位置覆盖以及多节点建设。同时逐渐发展成熟的量子通信技术也将为各个领域的通信提供新的安全保障。若将其与当下先

进技术相结合,如户外无线通信系统所支持的扩展现实(extended reality, XR)技术,能够使得人们在享受科技的同时不必担心信息安全问题。

参考文献

- [1] WANG J Y, YANG B, LIAO S K, et al. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 387-393.
- [2] 郭光灿. 量子十问之十 第二次量子革命究竟要干什么? [J]. *物理*, 2019, 48(7): 464-465.
GUO G C. What exactly is the second quantum revolution going to do? [J]. *Physics*, 2019, 48(7): 464-465.
- [3] 张宸昊. 量子通信中两个关键技术研究[D]. 陕西: 西北大学, 2021.
ZHANG CH H. Research on two key technologies in quantum communication [D]. Shaanxi: Northwest University, 2021.
- [4] 张金刚, 周广铭, 张大铭, 等. 基于空基平台的激光通信技术研究和展望[J]. *宇航总体技术*, 2022, 6(4): 65-72.
ZHANG J G, ZHOU G M, ZHANG D M, et al. Research and prospect of laser communication technology based on air-based platform[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2022, 6(4): 65-72.
- [5] PIRANDOLA S. Capacities of repeater-assisted quantum communications[J]. *ArXiv: Quantum Physics*, 2016: 1601.00966.
- [6] PIRANDOLA S, LAURENZA R, OTTAVIANI C, et al. Fundamental limits of repeaterless quantum communications[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-15.
- [7] MO X F, ZHU B, HAN Z F, et al. Faraday-Michelson system for quantum cryptography[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2632-2634.
- [8] ROSENBERG D, HARRINGTON J W, RICE P R, et al. Long-distance decoy-state quantum key distribution in optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(1): 010503.
- [9] STUCKI D, WALENTA N, VANNEL F, et al. High rate, long-distance quantum key distribution over 250 km of ultra low loss fibres[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(7): 075003.
- [10] TANG Y L, YIN H L, CHEN S J, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over 200 km[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(19): 190501.
- [11] YIN H L, CHEN T Y, YU Z W, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [12] BOARON A, BOSO G, RUSCA D, et al. Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 190502.
- [13] CHEN J P, ZHANG C, LIU Y, et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: Secure twin-field quantum key distribution over 509 km[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(7): 070501.
- [14] CHEN J P, ZHANG C, LIU Y, et al. Quantum key distribution over 658 km fiber with distributed vibration sensing[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(18): 180505.
- [15] LIU Y, ZHANG W J, JIANG C, et al. Experimental twin-field quantum key distribution over 1 000 km fiber distance[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(21): 210801.
- [16] JIANG L, TAYLOR J M, NEMOTO K, et al. Quantum repeater with encoding[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(3): 032325.
- [17] NAMAZI M, VALLONE G, JORDAAN B, et al. Free-space quantum communication with a portable quantum memory[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(6): 064013.
- [18] HERBST T, SCHEIDL T, FINK M, et al. Teleportation of entanglement over 143 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(46): 14202-14205.
- [19] MASTRIANI M, IYENGAR S S, KUMAR L. Satellite quantum communication protocol regardless of the weather[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(4): 1-14.
- [20] LIM C W, XU F, PAN J W, et al. Security analysis of quantum key distribution with small block length and its application to quantum space communications[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(10): 100501.
- [21] VALLONE G, BACCO D, DEQUAL D, et al.

- Experimental satellite quantum communications [J]. Physical Review Letters, 2015, 115(4): 040502.
- [22] CALDERARO L, AGNESI C, DEQUAL D, et al. Towards quantum communication from global navigation satellite system[J]. Quantum Science and Technology, 2018, 4(1): 015012.
- [23] ROBERT B, JUAN M A, ALEXANDER L. Progress in satellite quantum key distribution [J]. npj Quantum Information, 2017, 3(1): 30.
- [24] YIN J, LI Y H, LIAO S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1 120 kilometers[J]. Nature, 2020, 582(7813): 501-505.
- [25] BOURGOIN J P, HIGGINS B L, GIGOV N, et al. Free-space quantum key distribution to a moving receiver[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33437-33447.
- [26] 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 278-295.
- ZHANG H Y, ZHAO X Y, ZHANG Y CH, et al. Research progress of single-photon lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 278-295.
- [27] 刘旭超, 李华贵, 孙时伦, 等. 湍流信道下光量子通信系统误码分析及优化 [J]. 光学学报, 2022, 42(3): 246-251.
- LIU X CH, LI H G, SUN SH L, et al. Bit error analysis and optimization of optical quantum communication system under turbulent channel[J]. Acta Optical Sinica, 2022, 42(3): 246-251.
- [28] 郭银芳, 李白萍. 多变性大气湍流对光通信系统性能的影响分析[J]. 电子技术, 2022, 51(7): 46-49.
- GUO Y F, LI B P. Analysis of influence of variable atmospheric turbulence on performance of optical communication systems [J]. Electronic Technology, 2022, 51(7): 46-49.
- [29] PIRANDOLA S. Limits and security of free-space quantum communications[J]. Physical Review Research, 2021, 3(1): 013279.
- [30] VASYLYEV D, VOGEL W, MOLL F. Satellite-mediated quantum atmospheric links [J]. Physical Review A, 2019, 99(5): 053830.
- [31] ER L M, ZHENG F H, SHUN-SHENG G, et al. Background noise of satellite-to-ground quantum key distribution[J]. New Journal of Physics, 2005, 7: 215.
- [32] LIAO S K, YONG H L, LIU C, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication [J]. Nature Photonics, 2017, 11(8): 116.
- [33] AVESANI M, CALDERARO L, SCHIAVON M, et al. Full daylight quantum-key-distribution at 1 550 nm enabled by integrated silicon photonics[J]. npj Quantum Information, 2021, 7(1): 1-8.
- [34] 刘涛, 朱聪, 孙春阳, 等. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(2): 173-180.
- LIU T, ZHU C, SUN CH Y, et al. Influence of different weather conditions on performance of free-space quantum communication systems [J]. Acta Optic Sinica, 2020, 40(2): 173-180.
- [35] 张秀再, 徐茜, 刘邦宇. 雾对自由空间量子通信性能的影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 165-170.
- ZHANG X Z, XU Q, LIU B Y. Influence of fog on performance of free-space quantum communication [J]. Acta Optic Sinica, 2020, 40(7): 165-170.
- [36] 聂敏, 赵新宇, 杨光, 等. 暴风雪对自由空间量子通信信道的影响及性能分析 [J]. 激光杂志, 2017, 38(3): 5-10.
- NIE M, ZHAO X Y, YANG G, et al. Influence and performance analysis of snowstorm on the free-space quantum communication channel [J]. Laser Journal, 2017, 38(3): 5-10.
- [37] 高锴, 聂敏, 杨光, 等. 降雨背景下自由空间量子通信的性能研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 268-275.
- GAO K, NIE M, YANG G, et al. Performance of free-space quantum communication in context of rainfall [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 268-275.
- [38] LIAO S K, CAI W Q, LIU W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution [J]. Nature, 2017, 549(7670): 43-47.
- [39] REN J G, XU P, YONG H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. Nature, 2017, 549(7670): 70-73.
- [40] HUGHES R J, BUTTLER W T, KWIAT P G, et al. Quantum cryptography for secure free-space communications [C]. Free-Space Laser Communication Technologies XI. SPIE, 1999, 3615: 98-103.

- [41] KURTSIEFER C, ZARDA P, HALDER M, et al. A step towards global key distribution [J]. *Nature*, 2002, 419(6906): 450-450.
- [42] PENG C Z, YANG T, BAO X H, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over a noisy ground atmosphere of 13 km[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 15(94): 150501-150504.
- [43] URSIN R, TIEFENBACHER F, SCHMITT-MANDERBACH T, et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(7): 481-486.
- [44] JIN X M, REN J G, YANG B, et al. Experimental free-space quantum teleportation [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(6): 376-381.
- [45] WANG J Y, YANG B, LIAO S K, et al. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 387-393.
- [46] NAUERTH S, MOLL F, RAU M, et al. Air-to-ground quantum communication [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 382-386.
- [47] VILLORESI P, JENNEWEIN T, TAMBURINI F, et al. Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and earth[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(3): 033038.
- [48] BONATO C, TOMAELLO A, DA DEPPO V, et al. Feasibility of satellite quantum key distribution[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(4): 045017.
- [49] YIN J, REN J G, LU H, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. *Nature*, 2012, 488 (7410): 185-188.
- [50] ELSER D, GÜNTNER K, KHAN I, et al. Quantum measurements of signals from the alphasat tdp1 laser communication terminal[C]. *International Conference on Space Optics—ICSO 2016*. SPIE, 2017, 10562: 1082-1087.
- [51] DEQUAL D, VALLONE G, BACCO D, et al. Experimental single-photon exchange along a space link of 7 000 km[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(1): 010301.
- [52] 彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星——“墨子号”[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(9): 1096-1104.
- PENG CH ZH, PAN J W. Quantum science experimental satellite “Micius” [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(9): 1096-1104.
- [53] OI D K L, LING A, GRIEVE J A, et al. Nanosatellites for quantum science and technology [J]. *Contemporary Physics*, 2017, 58(1): 25-52.
- [54] LI B, CAO Y, LI Y H, et al. Quantum state transfer over 1 200 km assisted by prior distributed entanglement[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128 (17): 170501.
- [55] RIDEOUT D, JENNEWEIN T, AMELINO-CAMELIA G, et al. Fundamental quantum optics experiments conceivable with satellites—reaching relativistic distances and velocities[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(22): 224011.
- [56] CHANDRASEKARA R, TANG Z, TAN Y C, et al. Generation and analysis of correlated pairs of photons on board a nanosatellite[C]. *Quantum Information Science and Technology II*. SPIE, 2016, 9996: 43-49.
- [57] VILLAR A, LOHRMANN A, BAI X, et al. Entanglement demonstration on board a nano-satellite [J]. *Optica*, 2020, 7(7): 734-737.
- [58] SIDHU J S, JOSHI S K, GÜNDÖĞAN M, et al. Advances in space quantum communications [J]. *IET Quantum Communication*, 2021, 2(4): 182-217.
- [59] LIAO S K, CAI W Q, HANDSTEINER J, et al. Satellite-relayed intercontinental quantum network [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(3): 030501.
- [60] CHEN Y A, ZHANG Q, CHEN T Y, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4 600 kilometers[J]. *Nature*, 2021, 589 (7841): 214-219.
- [61] 胡杨. 我国构建全球首个量子通信网[J]. *科学*, 2021, 73(1): 62.
- HU Y. China builds the world’s first quantum communication network[J]. *Science*, 2021, 73(1): 62.
- [62] LIU H Y, TIAN X H, GU C, et al. Drone-based entanglement distribution towards mobile quantum networks[J]. *National Science Review*, 2020, 7(5): 921-928.
- [63] 王柏林, 杨加春, 郭斌. 基于平流层飞艇的气象探测技术探索[J]. *气象科技进展*, 2019, 9(4): 6-13.
- WANG B L, YANG J CH, GUO X. Study of

meteorological observation technology based on stratospheric airship[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(4): 6-13.

作者简介



郑德智, 分别在 2000 年和 2006 年于北京航空航天大学获得学士学位和博士学位, 现为北京理工大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为临空信息探测、极端信号测量技术、传感器敏感机理。

E-mail: zhengdezhi@bit.edu.cn

Zheng Dezhi received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Beihang University in 2000 and 2006, respectively. He is currently a professor at Beijing Institute of Technology. His main research inserts include airborne information detection, extreme signal measurement technology, and sensor sensitivity mechanisms.



郑金雄, 2021 年于北京理工大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为复杂环境光量子感知与探测。

E-mail: 3220210805@bit.edu.cn

Zheng Jinxiong received his B.Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2021. He is currently a M.Sc. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research inserts include complex environmental light quantum sensing and detection.



李中翔 (通信作者), 2011 年于北京理工大学获得学士学位, 2014 年于北方工业大学获得硕士学位, 2022 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京理工大学博士后, 主要研究方向为极端环境物理量感知。

E-mail: lizhongxiang@bit.edu.cn

Li Zhongxiang (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2011, M.Sc. degree from North China University of Technology in 2014, and Ph.D. degree from Beihang University in 2022. He is currently a post-doctoral fellow at Beijing Institute of Technology. His main research interests include extreme environment physical quantity sensing.



王国俨, 2018 年于青岛科技大学获得学士学位, 2021 年于北京化工大学获得硕士学位, 现为北京理工大学博士研究生, 主要研究方向为 MEMS 传感器芯片, 量子激光雷达探测技术。

E-mail: 3220215050@bit.edu.cn

Wang Guoyan received his B.Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2018, and M.Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2021. He is currently a Ph.D. candidate at Beijing Institute of Technology. His main research interests include MEMS sensor chips and quantum lidar detection technology.



胡纯, 2009 年于中国地质大学 (武汉) 获得学士学位, 2015 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京理工大学副研究员, 主要研究方向为先进传感与智能仪器。

E-mail: huchun198@163.com

Hu Chun received his B.Sc. degree from China University of Geosciences in 2009, and Ph.D. degree from Beihang University in 2015. He is currently an associate researcher at Beijing Institute of Technology. His main research interests include advanced sensing and intelligent instruments.