



星地量子通信光链路的建立与在轨验证

张亮¹, 贾建军^{1,3}, 廖胜凯², 闻冠华^{1,3}, 舒嵘^{1,3}, 王建宇^{1,2,3*}

1. 中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

2. 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院, 中国科学技术大学, 上海 201315

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通信作者. E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期: 2018-03-07; 接受日期: 2018-03-27; 网络出版日期: 2018-09-07

中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (批准号: XDA04030000)、国家自然科学基金 (批准号: 61302181) 和中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室基金 (批准号: CXJJ-16S056) 资助项目

摘要 星地高精度光链路的建立是进行星地量子通信科学实验的必要条件, 相比常规激光通信, 星地量子科学实验卫星需解决量子光和信标光能量差异极大, 卫星要同时和两个地面站建立高精度光链路等特殊要求. 论文基于星地量子通信的科学需求, 提出了卫星对站指向和载荷自主寻的相结合的一星两站光链路建立的总体方案, 采用凝视-凝视的捕获方法, 实现星地的快速捕获; 采用粗跟踪和精跟踪相结合的多级跟踪架构, 满足星地高精度光学跟踪的需求; 采用星地联合扫描和系统修正的方法, 实现了星地量子光束的高精度对准. 最后论文给出墨子号量子科学实验卫星在轨验证结果, 实验数据表明量子科学实验卫星光链路建立的各项指标均达到和超过预期要求.

关键词 量子通信, 光链路, 捕获方法, 跟踪系统, 扫描, 在轨测试

1 引言

量子通信利用量子力学原理对量子态进行操控, 在两个地点之间进行信息交互. 量子通信通常采用单光子作为物理载体, 最为直接的方式是通过光纤或者近地面自由空间信道传输, 但这两种信道的损耗都随着距离的增加而指数变大. 光纤介质中的量子通信距离仅在百公里量级, 通过卫星则可实现更远距离甚至覆盖全球的量子通信^[1]. “墨子号”量子科学实验卫星是中国科学院空间科学战略性先导专项的首批科学卫星之一, 通过在卫星与量子光学地面站之间建立量子信道完成了多个星地量子科学实验任务, 包括星地高速量子密钥分发实验^[2]、超过 1200 公里的量子纠缠分发实验^[3]和地星量子隐形传态实验^[4]. 该卫星为太阳同步轨道, 轨道高度 500 km, 量子光学地面站分布在兴隆、新疆南山、青海德令哈、云南丽江与西藏阿里, 卫星与地面站共同构成天地一体的量子科学实验系统.

引用格式: 张亮, 贾建军, 廖胜凯, 等. 星地量子通信光链路的建立与在轨验证. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1183–1197, doi: 10.1360/N112018-00047

Zhang L, Jia J J, Liao S K, et al. Establishment and in-orbit test of optical link in satellite-to-ground quantum communication (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1183–1197, doi: 10.1360/N112018-00047

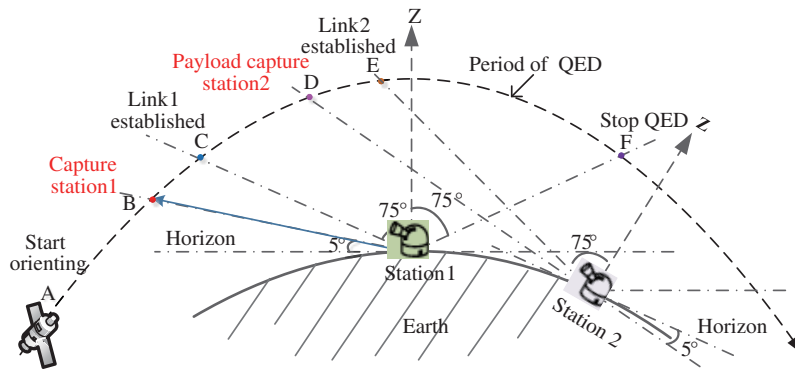


图 1 (网络版彩图) 星地量子通信链路建立与保持过程

Figure 1 (Color online) The construction and maintenance of quantum communication link

为了降低链路损耗, 星地量子通信中量子信号的发散角非常窄, 在 $10 \mu\text{rad}$ 左右. 由于卫星平台相对地面站的高速运动以及平台中的微振动干扰, 如何将微弱的量子信号精确地瞄准地面站是其中的关键问题. 星地量子通信光链路的建立需采用捕获、跟踪与瞄准 (acquisition tracking and pointing, ATP) 技术, 在星地及星间激光通信中采用了类似技术并已开展了多次在轨验证^[5~8]. 但相比常规卫星激光通信, 星地量子通信链路建立有如下的特殊要求: 一是在星地量子纠缠分发实验中, 需要卫星同时对两个地面站建立高精度的通信光链路; 二是信标光和信号光无法复用, 且量子通信中量子信号非常微弱, 仅为信标光强度的 -60 dB ; 三是收发波段复杂, 激光通信中通常为一发一收, 星地量子通信中则配置了多波段量子光源、信标光源和同步光源, 需满足多个发射、接收波段的光轴配准和精确指向.

高精度光链路的建立始终是卫星光通信系统中风险最高、最值得关注的问题之一. 本文根据星地量子通信链路的特殊要求, 提出了一种可靠性高、架构简洁的链路建立技术. 在总体方案上将卫星对站指向和载荷自主寻的结合, 并采用粗跟踪和精跟踪复合的多级跟踪架构, 以满足卫星同时与两个地面站的高精度光学跟踪. 在捕获方面采用凝视-凝视的捕获方法实现星地的快速捕获, 采用优化的捕获速度变值约束实现弱信标下的鲁棒性. 在高精度瞄准方面, 采用跟踪参考点自动调整以及星地联合扫描的系统修正方法, 实现超前瞄准实时补偿, 以及星地量子光束的高精度对准. 星地量子通信链路建立中采用的技术方法在“墨子号”量子科学实验卫星上得到了在轨验证.

2 星地量子链路的建立需求

量子卫星为低轨道卫星, 在一轨实验过程中对地面站的可视时间小于 10 min . 以双站量子纠缠分发任务为例, 说明卫星同时对两个地面站的量子链路建立过程, 如图 1 所示. 当卫星位于地面站 1 水平线以下时开始调整姿态, 在飞行到地面站 1 的 5° 仰角时 (B 点) 完成卫星对站指向; 在地面站 1 的 15° 仰角 (C 点) 前, 要求卫星与地面站 1 完成量子光链路的建立并保持. 相对于地面站 2, 当卫星到达地面站 2 的 5° 仰角 (D 点) 以上时开始链路建立, 在地面站 2 的 15° 仰角 (E 点) 前完成与地面站 2 的量子光链路建立并保持. 当卫星位于两个地面站 $\pm 75^\circ$ 天顶角的交叉区域 (E~F) 时进行量子通信, 当卫星飞行出实验区域时中断链路. 由于低轨卫星过站时间短, 要求卫星载荷对地面站的捕获时间小于 3 s , 并满足实验过程中的跟踪范围要求.

星地量子光链路的建立精度直接影响到量子通信效率. 量子链路建立误差包括两部分, 一部分为

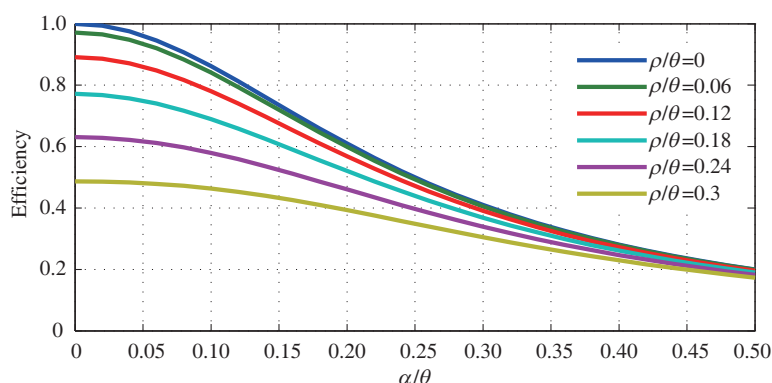


图 2 (网络版彩图) 不同链路建立误差下的信号效率

Figure 2 (Color online) Signal efficiency under different link establishment errors

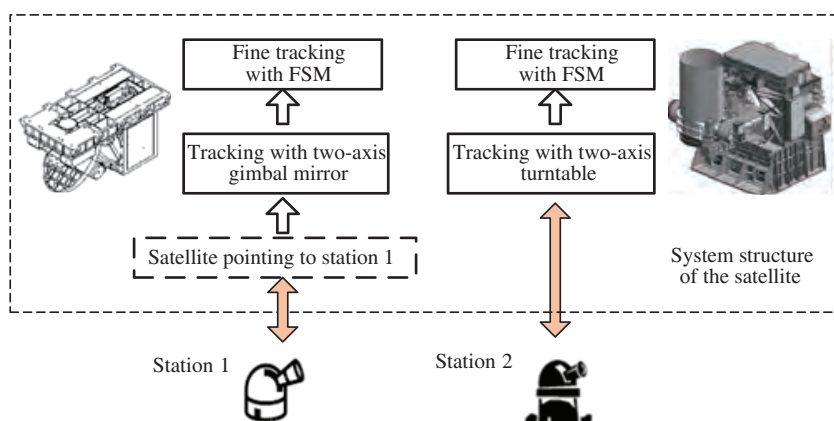


图 3 (网络版彩图) 系统架构

Figure 3 (Color online) System architecture

随机误差, 代表跟踪光轴的稳定性, 用光轴抖动标准差 α 表示; 一部分为系统偏差, 代表光轴指向平均位置与目标实际位置的偏差, 用 ρ 表示. 误差概率分布符合 Rice 分布^[9], 对 Gauss 出射光束可推导得出链路对准引起的平均量子信号效率为

$$M(\alpha, \rho) = \frac{\theta^2}{\theta^2 + 16\alpha^2} \exp \left[-\frac{8\rho^2}{\theta^2 + 16\alpha^2} \right], \quad (1)$$

其中, θ 为量子信号发散角. 图 2 为不同系统误差及随机误差下对量子链路效率的影响. 定义跟瞄误差为 $\sqrt{\alpha^2 + \rho^2}$, 可见当 $\sqrt{\alpha^2 + \rho^2} < \theta/4$ 时, 链路对准误差造成的损失小于 50%, 以此作为链路建立精度的最低要求. 对星地量子通信, 量子信号发散角小于 $15 \mu\text{rad}$, 要求链路跟瞄误差小于 $3.5 \mu\text{rad}$.

3 系统架构与载荷配置

为了实现卫星同时对两个地面站的链路建立, 采用卫星对站指向和载荷粗、精跟踪相结合的多级跟踪架构, 如图 3 所示. 卫星平台具备对地面站姿态机动能力, 指向角度根据卫星轨道位置与地面站位置计算得出, 指向精度优于 0.5° . 卫星配置两个光机载荷, 分别基于二维指向镜形式与二维转台形

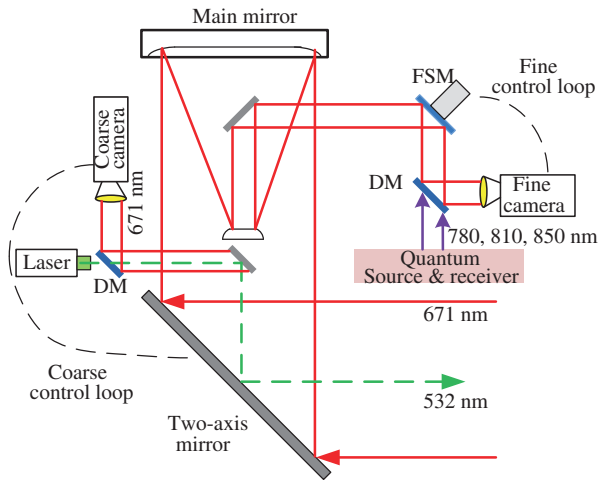


图 4 (网络版彩图) 二维指向镜载荷框图

Figure 4 (Color online) The sketch of payload with two-axis mirror

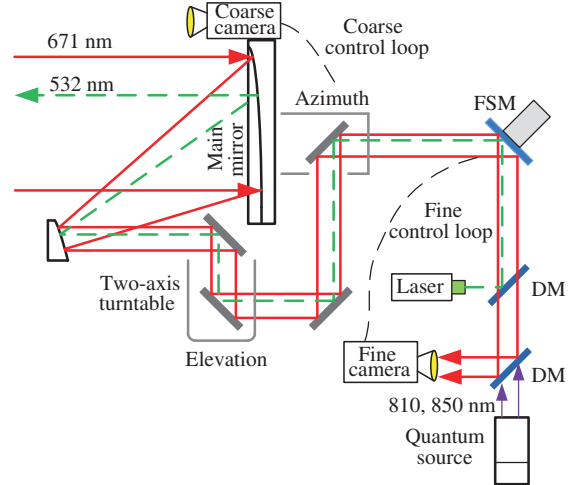


图 5 (网络版彩图) 二维转台载荷框图

Figure 5 (Color online) The sketch of payload with two-axis turntable

式. 基于二维指向镜的载荷在卫星姿态指向地面站 1 基础上, 对地面站 1 进行粗跟踪与精跟踪, 二维指向镜跟踪范围 $\pm 5^\circ$, 精跟踪范围大于 ± 0.4 mrad. 基于二维转台的载荷具备独立大范围对站指向能力, 将载荷望远镜指向地面站 2, 二维转台跟踪范围方位轴 $\pm 90^\circ$ 、俯仰轴 $-30^\circ \sim +75^\circ$, 精跟踪范围大于 ± 0.4 mrad.

两种跟踪构型的载荷均采用粗-精跟踪的复合轴跟踪方式. 二维指向镜载荷、二维转台载荷原理分别如图 4 和 5 所示. 二维指向镜或二维转台与粗跟踪相机 (coarse camera) 构成粗跟踪光闭环系统, 实现对地面站信标光 (671 nm) 的捕获及粗跟踪, 将光束引入望远镜及后光路. 压电陶瓷快速反射镜 (fast steering mirror, FSM) 与精跟踪相机 (fine camera) 构成精跟踪光闭环系统, 对粗跟踪的残差进一步抑制, 量子发射及接收则通过分光合束器件与跟踪单元共光路. 载荷跟踪地面站信标光后, 将发射本地信标光 (532 nm), 由地面站进行跟踪. 载荷性能参数如表 1 所示.

4 技术方法与手段

空间光链路建立可分为捕获、跟踪及瞄准 3 个过程. 捕获即通信链路一方搜索到另一方位置的过程; 跟踪即双方根据探测器提供的视轴偏差, 控制跟踪机构使接收视轴相互跟随入射光的视轴变化; 瞄准就是双方将发射视轴正确指向对方位置. 本节讨论适用于星地量子通信光链路建立的技术方法与手段.

4.1 捕获方法

星地量子通信捕获过程需重点解决两个问题: 卫星同时与两个地面站的快速捕获; 低仰角弱信标下的捕获鲁棒性.

4.1.1 卫星与两个地面站的快速捕获

为了提高捕获速度, 并能在受云层等障碍影响中断后快速恢复链路, 星地量子通信链路建立采用

表 1 载荷 ATP 系统性能参数
Table 1 Performance of the ATP system

Components		Transmitter 1	Transmitter 2
Coarse pointing mechanism	Type	Two-axis gimbal mirror	Two-axis turntable
	Tracking range	Azimuth: $\pm 5^\circ$ Elevation: $\pm 5^\circ$	Azimuth: $\pm 90^\circ$ Elevation: $-30^\circ \sim +75^\circ$
	Telescope size	300 mm	180 mm
	Tracking speed	$>1^\circ/\text{s}$	$>2^\circ/\text{s}$
Coarse camera	Type	CMOS	CMOS
	Field of view	$2.3^\circ \times 2.3^\circ$	$2.3^\circ \times 2.3^\circ$
	Size & frame	512×512 & 40 Hz	512×512 & 40 Hz
Fine tracking Mechanism	Type	PZT FSM	PZT FSM
	Range (int.)	± 5 mrad	± 5 mrad
Fine camera	Type	CMOS	CMOS
	Field of view (ext.)	0.64×0.64 mrad	0.64×0.64 mrad
	Size& frame	60×60 & 2 kHz	60×60 & 2 kHz
Beacon laser	Power	110 mW	50 mW
	Divergence	1.2 mrad	0.65 mrad

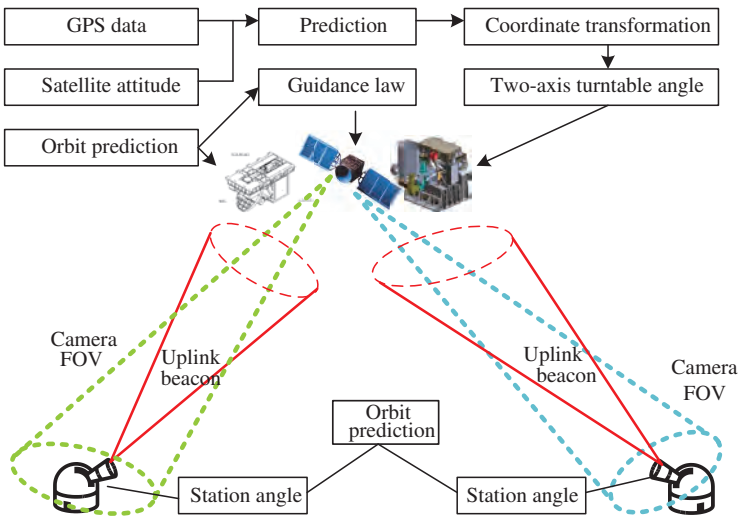


图 6 (网络版彩图) 凝视 - 凝视捕获方法及信息流

Figure 6 (Color online) Stare-stare capture method and information flow

凝视 - 凝视的捕获方式, 如图 6 所示. 地面站根据卫星轨道预报计算指向角度, 将大发散角 (~ 1.5 mrad) 的信标光覆盖卫星所在不确定区域. 卫星平台按照由轨道预报生成的导引律进行姿态调整, 以优于 0.5° 的精度指向一个地面站. 在此基础上, 二维指向镜载荷将 $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ 视场 (field of view, FOV) 的粗跟踪相机对准该地面站, 相机视场覆盖地面站的不确定位置. 二维转台载荷将卫星姿态信息、星上 GPS 信息及地面站位置进行综合计算, 并采用数据预测技术弥补数据源传输的时间差, 经过坐标变换后得到转台的方位与俯仰角, 通过转台转动将 $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ 视场的粗跟踪相机对准地面站, 相机视场覆盖地面站的不确定位置.

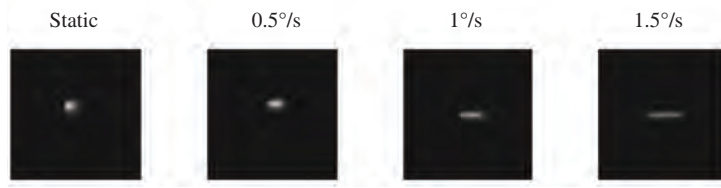


图 7 捕获过程中的信标光斑拉长现象

Figure 7 The elongated phenomenon of the beacon spot in the capture process

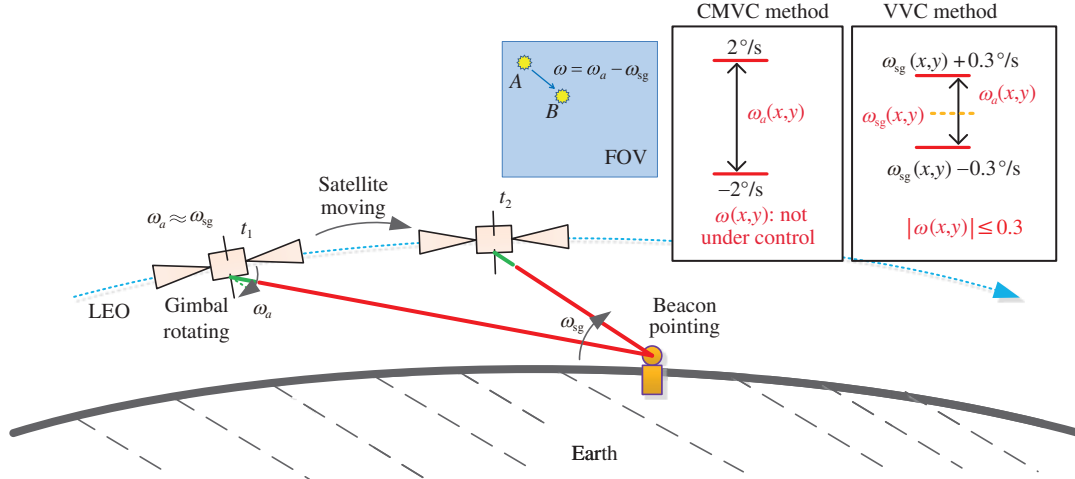


图 8 (网络版彩图) 变值约束捕获方法

Figure 8 (Color online) VVC capture method

4.1.2 低仰角弱信标下的捕获鲁棒性

星地量子通信卫星轨道低, 为了充分利用通信时间, 要求卫星位于地面站 $5^\circ \sim 10^\circ$ 低仰角时进行捕获. 受大气斜程衰减及链路距离的影响, 信标光接收功率非常微弱. 实验结果表明, 在捕获过程可能出现不稳定现象, 捕获机构出现反复震荡, 无法正常完成捕获动作. 问题的原因为捕获动作执行过程中, 探测器一帧曝光时间内光斑在探测器视场内的相对运动造成光斑拉长, 导致信号能量密度下降. 若光斑信噪比 SNR 小于阈值时会导致目标脱靶, 需重新捕获, 重复以上过程便产生震荡现象. 图 7 为实测捕获过程中不同相对角速度下信标光成像光斑的拉长现象, 相对角速度越快光斑拉长越明显, 同时信噪比也越低.

研究表明, 单纯通过增大曝光时间对 SNR 的提高是非常有限的, 更有效的方法是限制相对角速度 ω . 由于在捕获过程中地面站相对卫星有基础角速度 ω_{sg} , 因此考虑将常规恒定最值速度约束 (constant maximum velocity constraint, CMVC) 方法更改为变值约束 (variable velocity constraint, VVC), 即根据当前轨道位置将执行机构运动速度 ω_a 限制在基础角速度 $\omega_{sg} \pm 0.3^\circ/\text{s}$ 范围内, 如图 8 所示. 实验结果表明捕获过程可接受的最小信标光功率降低了 5.5 dB, 达到 $3.5 \text{ pW}^{[10]}$.

4.2 跟踪方法

4.2.1 基于 CMOS 探测器的复合轴跟踪控制架构

如第 3 节所述, 星地量子通信中采用粗跟踪与精跟踪结合的复合轴跟踪控制架构, 关于复合轴跟

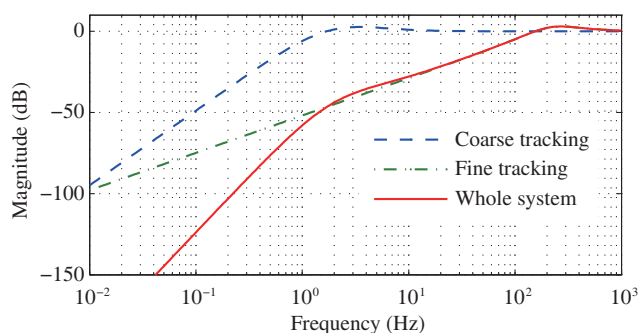


图9 (网络版彩图) 复合轴跟踪系统误差传递函数曲线

Figure 9 (Color online) The error transfer function curve of the compound axis tracking system

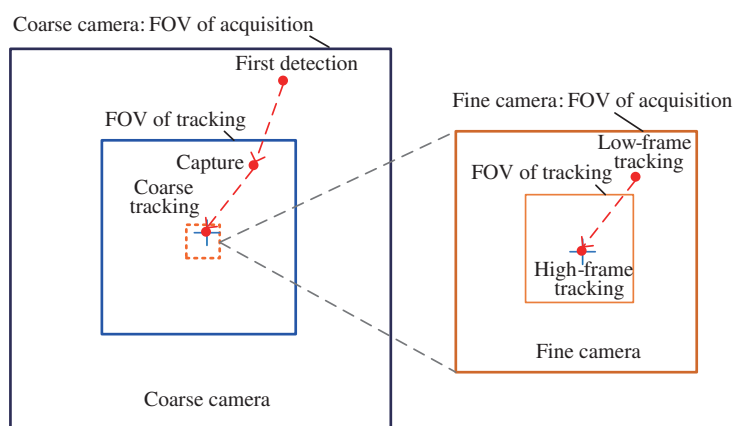


图10 (网络版彩图) 不同模式下跟踪相机视场关系

Figure 10 (Color online) The FOV relationship under different modes

踪方法国内外已有相当多的研究^[11~13],其主要特点是可实现大范围、高带宽的跟踪能力.跟踪控制系统的性能通常以干扰抑制带宽来衡量,图9为星地量子通信复合轴跟踪系统的误差传递函数设计结果,粗跟踪干扰抑制带宽大于1 Hz,精跟踪干扰抑制带宽大于150 Hz,对低频段(<1 Hz)的干扰具备-60 dB/10倍频程的抑制能力.

星地量子通信中需卫星平台对一个地面站进行高速姿态指向,相比常规星间及星地激光通信载荷的捕获视场要求更大(卫星激光通信中捕获视场通常在 0.5° 左右^[12,14],而在量子通信中卫星对站指向误差 0.5° ,再考虑其他不确定因素,捕获视场需大于 2°),但系统跟踪性能又要求探测器帧频高、分辨率高.因此需解决探测器大视场与高分辨、高帧频的矛盾.CMOS面阵探测器由于其灵活的开窗处理能力为这些需求提供了解决方案.根据表1中的工作参数,在捕获时粗跟踪相机为 1000×1000 开窗,可提供 $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ 的捕获视场,足以覆盖卫星指向误差范围;捕获目标后引入到中心附近,粗跟踪相机切换为 512×512 开窗,可提供40 Hz的高探测帧频.同样,捕获阶段精跟踪相机为 128×128 开窗,探测视场 0.64 mrad ;捕获目标后精跟踪相机切换为 60×60 开窗,可提供2000 Hz的探测帧频.图10为不同模式下的相机视场关系.

4.2.2 探测精度的优化

跟踪系统中采用质心算法对目标信标光成像光斑进行处理得到目标位置,探测器的本底噪声及填

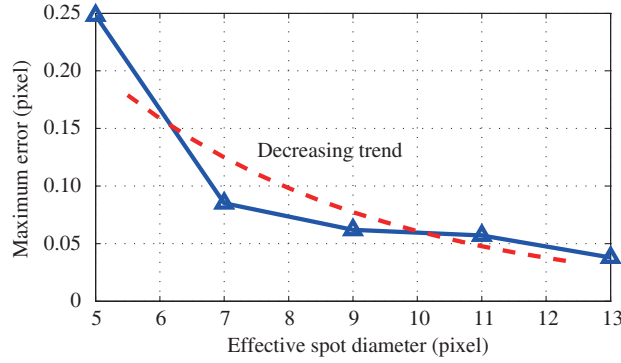


图 11 (网络版彩图) 光斑直径对探测精度的影响

Figure 11 (Color online) The influence of spot diameter to the detection precision

充因子是影响目标探测精度的两个主要因素. 探测器噪声可通过非均匀性校正以及低噪声电路设计来降低. CMOS 探测器相对 CCD 的主要不足是占空比偏低, 会导致附加的探测误差. 降低占空比影响的主要措施是增加光斑的有效直径^[15], 理论分析及实验结果表明, 落在探测阵面上的有效光斑直径从 5 像元变大为 13 像元时, 定位误差将从 0.25 像元降至 0.038 像元, 对于单个像元对应 $5 \mu\text{rad}$ 的探测系统来说, 定位精度可提升到 $0.19 \mu\text{rad}$ 以内. 图 11 为最大探测误差随光斑直径变化的实测统计曲线, 可见光斑直径越大探测误差越小.

4.2.3 卫星微振动的抑制

卫星平台微振动是对跟踪系统的主要外部干扰源之一, 主要来源于太阳能电池组、推进器、姿控机构等. ESA 给出的 Olympus 卫星角振动功率谱密度拟合函数被广泛参考使用^[16]:

$$S(f) = \frac{160 \mu\text{rad}^2}{1 + f^2}. \quad (2)$$

卫星微振动给控制系统带来的误差可表示为

$$\theta_{\text{rms}} = \sqrt{\int S(f) |R(f)|^2 df}, \quad (3)$$

其中, θ_{rms} 为跟踪误差均方根, $R(f)$ 为跟踪系统误差传递函数.

不同卫星平台的微振动形式是不尽相同的, 为了对星地量子通信中卫星角振动功率谱及影响进行评估, 采用悬吊实验进行了实物测试, 通过弹性绳将卫星吊起后隔离地基的中高频段干扰, 测试卫星平台动量轮工作时对系统跟踪精度的影响. 测试结果如图 12 所示, 可见量子卫星的角振动功率谱从低频到高频呈逐渐降低趋势, 在动量轮转速对应的频段 (如 2400 转/min 对应 40 Hz) 存在较窄的峰值点.

实验测试了卫星微振动造成的跟踪误差频段分布, 如表 2 所示, 卫星微振动在全带宽范围内造成的光轴抖动为 $7.6 \mu\text{rad}$, 启用精跟踪后将抖动降低到 $0.38 \mu\text{rad}$. 因此对星地量子通信系统, 高带宽的精跟踪控制可将卫星微振动影响抑制到可接受的范围内, 无需采取其他主动隔振措施.

4.2.4 大气影响及抑制

大气影响是星地量子通信链路建立中不可忽略的因素, 可分为大气衰减、大气折射与大气湍流 3 种影响方式. 前两种对量子链路造成平均能量损失及光轴相对偏置, 影响可控, 本小节主要讨论大气湍

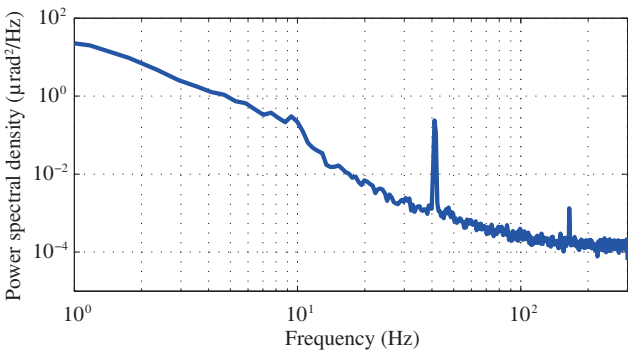


图 12 (网络版彩图) 量子卫星角振动功率谱密度
Figure 12 (Color online) Angular vibration power spectral density of the quantum satellite

表 2 卫星微振动造成的跟踪误差
Table 2 Tracking error caused by micro vibration of the satellite

	Full-band	1~10 Hz	10~20 Hz	20~35 Hz	35~45 Hz
No tracking (μrad)	7.6	5.13	0.38	0.21	0.48
Fine tracking (μrad)	0.38	0.17	0.07	0.07	0.19

流影响. 大气湍流是一种随机的空气运动状况, 由于大气中风力、温度差异, 以及压强变化相互影响而形成随机变化的气体旋涡, 大气湍流导致大气折射率的起伏, 从而造成光束的闪烁、弯曲、分裂、扩展等现象^[17]. 大气湍流对上、下行光链路的影响是不尽相同的: 对下行光链路, 激光束首先经过长距离的真空再进入大气层, 此时光束的直径已足够大. 因此, 对下行链路而言, 几乎没有光束抖动, 主要影响是地面接收信号的到达角起伏, 经理论仿真分析, 中等湍流下星地量子通信中下行链路到达角起伏标准差为 6.23 μrad^[18]. 对上行链路, 激光出射后便受到大气湍流影响, 主要造成激光束的扩展与光束抖动, 由于上行激光到达星载接收端时已经过了数百公里的真空信道, 因此上行光链路到达角起伏很小, 理论分析结果仅为 0.44 μrad^[18].

在星地量子通信中, 通常采用星上发射量子信号、地面接收的方式. 根据上述分析, 大气对下行量子信号光束抖动影响较小, 到达角起伏较大, 可通过适当增大地面站的接收视场来降低影响. 但大气对上行信标光探测会造成较大的光强起伏, 光强的起伏将影响星上跟踪精度.

上行信标光的光强起伏会造成探测质心的抖动, 如图 13 所示, 光斑过度饱和造成光斑信息的丢失, 导致质心输出发生变化. 一种有效的方法是使用自适应曝光技术, 该方法尤其适合于 CMOS 探测系统, 通过数字控制更改每像素复位信号与读出信号的时间差, 可在不影响帧频、噪声的情况下实现曝光时间的自动调节. 实验验证表明, 采用自适应曝光技术后可将质心抖动由 0.3 pixel 降低到 0.05 pixel.

4.3 瞄准方法

瞄准是在跟踪的基础上将量子信号精确地指向目标, 需解决超前瞄准与收发光轴配准两个主要问题.

超前瞄准是由于通信终端之间的高速相对运动, 在光束传输时间内终端间的相对位移使得出射光轴需偏离跟踪光轴一定的角度. 超前瞄准量为 $\theta = 2V_r/c$, 其中 c 为光速, V_r 为接收端相对发射端在两

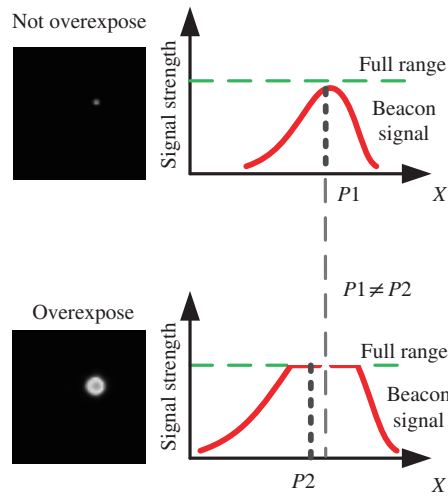


图 13 (网络版彩图) 过度曝光对质心计算的影响

Figure 13 (Color online) The effect of overexposure on centroid calculation

者连线方向上的垂直速度分量. 对 500 km 轨道的卫星, 通信期间超前瞄准量在 $20\sim 52\ \mu\text{rad}$ 之间变化. 收发光轴配准是解决跟踪光轴与量子发射光轴之间的偏差, 该偏差的出现是不可避免的, 是造成瞄准误差的主要因素之一.

已报道的星间/星地激光通信系统普遍采用独立的超前瞄准机构^[19], 发射激光首先经过超前瞄准机构再进入跟踪光路, 从而将发射光轴偏离接收光轴一定角度. 在星地量子通信中未采用此方法, 而是利用 CMOS 面阵探测器的灵活性, 通过实时更改精跟踪的基准点, 使得跟踪光轴偏离发射光轴, 同样达到超前瞄准的作用. 如图 14 所示, 图中右下角为超前瞄准时精跟踪基准点相对静态时基准点的二维偏置量. 同时为了弥补静态情况下本地发射光轴与跟踪光轴的系统偏差, 采用角锥棱镜自校正方法, 将与量子信号同轴输出的校正光引入到精跟踪相机内, 通过自校正光斑的位置变化判断发射光轴相对精跟踪相机光轴的变化, 同步调整精跟踪的基准点. 对经过自校正后仍存在的光轴残差, 则通过星地联合扫描来精确修正, 具体可见第 5 节的在轨验证结果.

5 在轨验证

墨子号量子科学实验卫星发射后, 截止 2018 年 2 月 12 日已成功建立星地量子光链路 653 次, 其中星地双站链路 162 次.

5.1 星地双站链路建立情况

星地双站链路的建立是量子纠缠分发的主要特点, 图 15 为实测双站通信时的链路建立过程, 图 15(a) 纵坐标为跟踪相机质心输出, 输出 1000 代表无有效光斑, 跟踪参考点在 500 左右. 由于两个地面站相距上千公里, 二维指向镜载荷 T1 先与地面站 1 建立链路, 二维转台载荷 T2 再与地面站 2 建立链路. 当 T2 建立链路后进入双站量子光链路同时保持阶段, 在该阶段开展双站量子通信. 当卫星飞出实验区时, 两个站均停止跟踪. 启动捕获动作时卫星与地面站链路捕获过程小于 2 s, 单次通信过程中双站链路同时保持时间达到 400 s 以上.

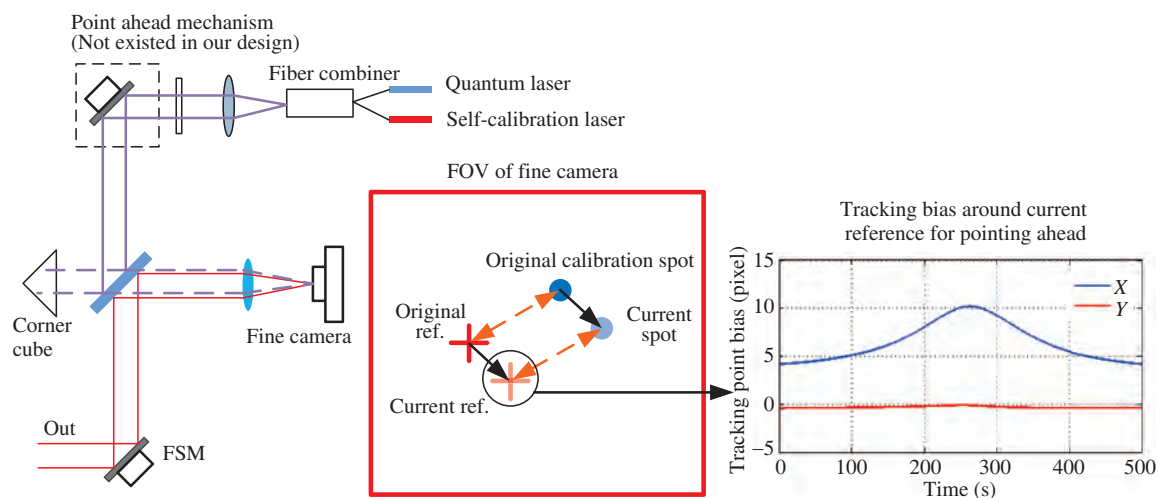


图 14 (网络版彩图) 超前瞄准与收发光轴自配准方法

Figure 14 (Color online) The method of pointing ahead and self-calibration

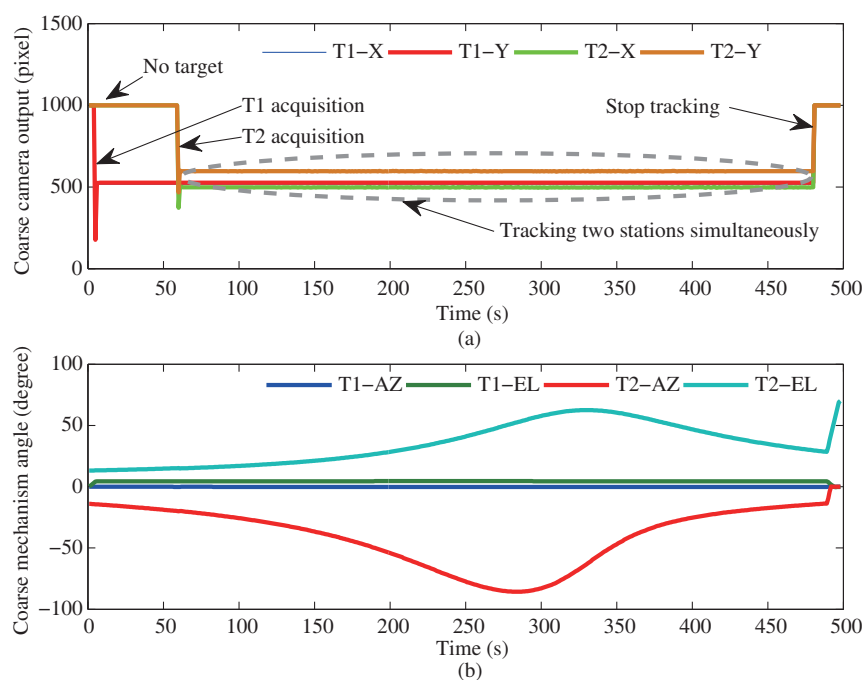


图 15 (网络版彩图) 实测一星对双站的链路建立过程

Figure 15 (Color online) The link building process of one satellite to two stations. (a) The coarse camera centroid of the two payloads; (b) the azimuth and elevation angle of the two payloads during the process

5.2 跟踪精度

以跟踪过程中精跟踪相机的质心变化作为评判依据, 星地量子通信中卫星对地面站的跟踪精度最优小于 $0.5 \mu\text{rad}$ (1σ), 如图 16 所示. 为验证自适应曝光对大气影响的抑制效果, 测试了不进行自适应曝光时的链路跟踪情况, 如图 17 所示, 两轴误差分别达到了 $1.5 \mu\text{rad}$ (1σ) 与 $2.0 \mu\text{rad}$ (1σ), 相比自适

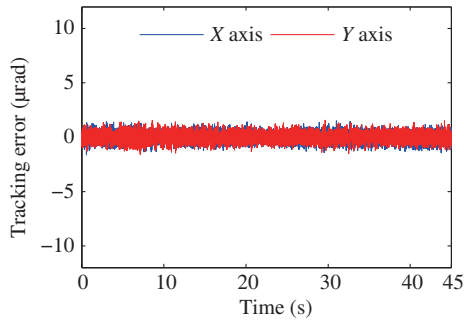


图 16 (网络版彩图) 在轨跟踪误差

Figure 16 (Color online) In-orbit tracking error

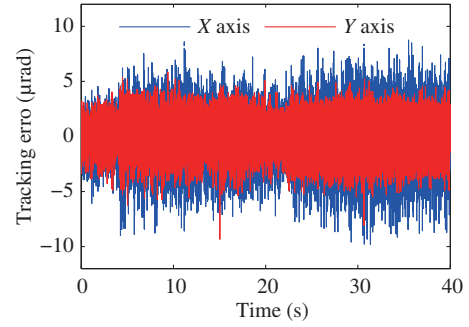


图 17 (网络版彩图) 不进行自适应曝光时跟踪误差

Figure 17 (Color online) The tracking error without adaptive exposure

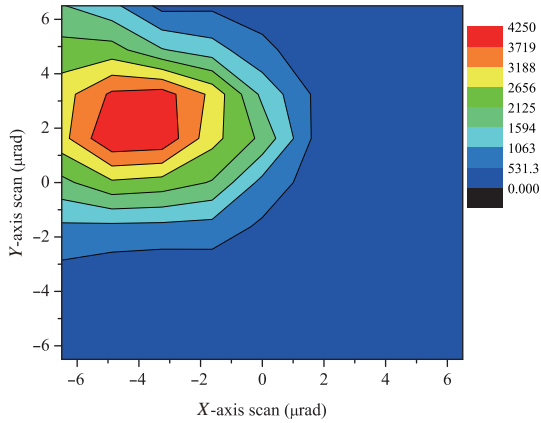


图 18 (网络版彩图) 未修正系统误差时量子光扫描情况

Figure 18 (Color online) The quantum light scanning without systematic error correction

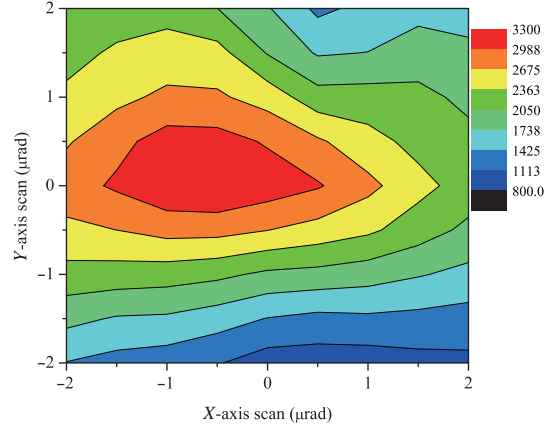


图 19 (网络版彩图) 偏差修正后的量子光扫描情况

Figure 19 (Color online) The quantum light scanning after systematic error correction

应曝光时误差明显变大。

5.3 瞄准指向精度

卫星在轨初期, 通过星地联合量子光扫描, 发现受发射阶段及在轨工作环境的影响, 发射光轴相对跟踪光轴偏差达到 $4 \mu\text{rad}$, 如图 18 所示. 星地联合扫描是通过在超前瞄准基础上叠加二维偏置曲线, 测试量子光不同角度偏置下地面接收到的单光子数目而得出的. 同时也可评估出卫星发射的量子信号发散角小于 $12 \mu\text{rad}$. 根据星地联合扫描结果更改精跟踪的基准位置, 对发射光轴与接收光轴的系统偏差进行修正, 重新测试表明量子光指向偏差减小到 $1.5 \mu\text{rad}$ 以内, 如图 19 所示 (图中扫描图像微形变是由于超前瞄准执行误差、大气随机扰动等引起的).

5.4 量子链路单光子计数

完成量子光指向系统偏差修正后, 测试一整轨量子通信过程中地面量子信号计数情况. 如图 20 所示, 蓝色实线为地面接收到的光子计数值, 红色虚线为考虑距离衰减后的地面光子计数预期曲线. 可

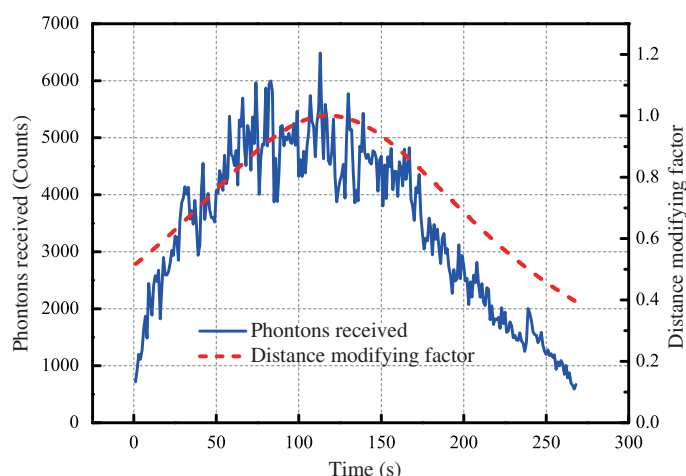


图 20 (网络版彩图) 一轨通信过程中的量子信号计数情况

Figure 20 (Color online) The photons received in one communication process

见整体计数情况与预期吻合,在远离过顶位置时大气透过率会造成附加影响,从而使得实际计数相比预期进一步降低。

6 结语

本文讨论了星地量子通信光链路的建立技术,采用卫星对站指向和载荷粗精跟踪复合的多级跟踪系统架构,并采取了适合于星地量子通信的快速可靠捕获与高精度跟踪瞄准方法。经过在轨验证,系统鲁棒性强,实现了一星对两站的链路建立,捕获时间小于 2 s,跟踪精度优于 $0.5 \mu\text{rad}$ (1σ),量子光瞄准指向精度优于 $1.5 \mu\text{rad}$,量子链路效率在预期范围内,各项指标达到和超过预期要求。未来星地量子通信的重要发展趋势是基于中高轨卫星的万公里通信距离以及全天时的工作环境,为了弥补链路损耗,量子信号发散角需压窄到 $3 \mu\text{rad}$ 以下,因此将对星地量子通信光链路的建立带来新的挑战。

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. *Nat Photon*, 2013, 7: 387–393
- 2 Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature*, 2017, 549: 43–47
- 3 Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 2017, 356: 1140–1144
- 4 Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation. *Nature*, 2017, 549: 70–73
- 5 Toyoshima M, Arimoto Y. Ground-to-ETS-VI narrow laser beam transmission. *Proc SPIE*, 1996, 2699: 71–80
- 6 Toyoshima M, Reyes M, Alonso A, et al. Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS. *Proc SPIE*, 2004, 5338: 1–15
- 7 Nielsen T T. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX. *Proc SPIE*, 2002, 4635: 1–15
- 8 Jono T, Takayama Y, Sodnik Z. OICETS on-orbit laser communication experiments. *Proc SPIE*, 2006, 6105: 13–23
- 9 Toyoshima M, Araki K. Far-field pattern measurement of an onboard laser transmitter by use of a space-to-ground optical link. *Appl Opt*, 1998, 37: 1720–1730

- 10 Bai S, Qiang J, Zhang L, et al. Optimization of spatial acquisition systems for low-light-level robustness in space optical communications. *Opt Lett*, 2015, 40: 3750–3753
- 11 Yu S Y, Gao H D, Wang L S, et al. Multiple-axis pointing control in intersatellite optical communication. *Laser Technol*, 2002, 26: 114–116 [于思源, 高惠德, 王立松, 等. 卫星光通信复合轴跟瞄控制方法研究. *激光技术*, 2002, 26: 114–116]
- 12 Jono T, Toyoda M, Nakagawa K, et al. tracking, and pointing systems of OICETS for free space laser communications. *Proc SPIE*, 1999, 3692: 41–50
- 13 Ortiz G G, Lee S, Monacos S P, et al. Design and development of a robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5-Gbps demonstration. *Proc SPIE*, 2003, 4975: 103–114
- 14 Nielsen T T. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX. *Proc SPIE*, 1995, 2381: 194–205
- 15 Qian F. Research on the high precision ATP system in satellite-to-earth quantum communications. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014 [钱锋. 星地量子通信高精度 ATP 系统研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2014]
- 16 Manfred E, Holtz L, Tunbridge D, et al. In-orbit measurements of micro accelerations of ESA's communication satellite Olympus. *Proc SPIE*, 1990, 1218: 205–214
- 17 Rong J, Chen Y, Hu Y. Simulation study of optical propagation in turbulent atmosphere. *Opt Commun Technol*, 2003, 27: 44–46 [荣健, 陈彦, 胡渝. 激光在湍流大气中的传输特性和仿真研究. *光通信技术*, 2003, 27: 44–46]
- 18 Yang S J. Research of the effects of channels and its suppression methods in quantum key distribution. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012 [杨世骥. 量子密钥分发中的信道作用及其抑制措施的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2012]
- 19 Liu L R. Laser communications in space I optical link and terminal technology. *Chinese J Lasers*, 2007, 34: 3–20 [刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术. *中国激光*, 2007, 34: 3–20]

Establishment and in-orbit test of optical link in satellite-to-ground quantum communication

Liang ZHANG¹, Jianjun JIA^{1,3}, Shengkai LIAO², Guanhua WEN^{1,3}, Rong SHU^{1,3} & Jianyu WANG^{1,2,3*}

1. *Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. *Chinese Academy of Sciences (CAS) Center for Excellence and Synergetic Innovation Center in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Shanghai 201315, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

* Corresponding author. E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

Abstract The establishment of a high-precision optical link is a necessary condition for satellite-to-ground quantum communication experiments. Compared with conventional laser communications, a quantum experimental satellite needs to solve special requirements such as the great difference between the energy of quantum light and beacon light, and the establishment of optical links between one satellite and two ground stations. Based on the scientific demands of satellite-to-ground quantum communication, this paper proposes an overall scheme for an optical link establishing system with a combination of satellite pointing and load autonomous searching. By using a multiple-axis pointing control method, the requirements of high-precision optical tracking are met. We use the stare-stare capture method to achieve fast capture between the satellite and the ground stations. The high-precision alignment of the satellite and ground quantum beams is realized by using a method of joint scanning and system correction. Finally, in-orbit test results of the Mo-tse quantum experimental satellite are given. The experimental data show that all parameters in the establishment of optical links meet or exceed the expected requirements.

Keywords quantum communication, optical link, capture method, tracking system, scan, in orbit test



Liang ZHANG was born in 1985. He received the B.S. degree from the University of Science and Technology of China in 2006, and the Ph.D. degree from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2011. Currently, he is an associate research fellow at the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include space quantum communication systems and photon communication technology.

communication technology.



Shengkai LIAO was born in 1983. He received the B.S. degree from the University of Science and Technology of China in 2005, and Ph.D. degree from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2010. Currently, he is a research fellow at the CAS Center for Excellence and the Synergetic Innovation Center in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China. His research

interests include system design and electronics technology in quantum communications.



Jianjun JIA was born in 1971. He received the B.S. and M.S. degrees from Xi'an Technological University and the Ph.D. degree in material processing engineering from Shanghai Jiao Tong University in 1999. He is currently a professor and supervisor of the Ph.D. program in the School of University of the Chinese Academy of Sciences. His research interests include optomechanical system design and thermal control design of space instruments.



Jianyu WANG was born in 1959. He received the B.S. degree from Hangzhou University in 1982, and the M.S. and Ph.D. degrees from the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, in 1987 and 1990. Currently, he is a research fellow at the Shanghai Institute of Technical Physics. His research interests include optical remote sensing, space quantum communication, and quantum information technology.

He is an academican of the Chinese Academy of Sciences, and chairman of the Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics.