

皮秒脉冲激光远程测距应用探讨及系统初步设计

康民强 邓颖 王方 李富全 张永亮 王少奇 朱启华

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 对于皮秒脉冲激光器作为测距光源在激光远程测距系统中的应用进行了探讨。通过对脉冲激光测距现状及远程测距发展需求的分析,提出了皮秒脉冲激光在远程激光测距系统中的应用方案。简要介绍了皮秒脉冲激光在卫星激光测距系统中的应用情况,进而分析了皮秒脉冲激光在远程测距系统的应用可行性。设计了一种简单的皮秒脉冲激光远程测距系统。

关键词 测量; 光学设计; 远程激光测距; 皮秒脉冲激光; 卫星激光测距

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.102203

Discuss and Design of Picosecond Laser Pulse Applied in Long-Distance Ranging

Kang Minqiang Deng Ying Wang Fang Li Fuquan Zhang Yongliang
Wang Shaoqi Zhu Qihua

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Regarding to picosecond pulse laser as the laser source used in long-distance ranging, a detail discussion is addressed. With the review of laser pulse ranging and the development of remote laser ranging, we present an idea that picosecond laser pulse is used in long-distance ranging. We briefly introduce the application of picosecond pulse laser in satellite laser ranging, and then analysis the possibility of picosecond laser pulse to be used in long-distance range finder. We design a simple picosecond laser pulses remote laser rangefinder system.

Key words measurement; optical design; remote laser ranging; picosecond laser pulse; satellite laser ranging

OCIS codes 140.7090; 280.3400; 220.2740

1 引言

脉冲激光测距具有测程远、测速快、精度高、无需合作目标等优点,主要用于大地测量、天体测量、靶场试验^[1-5]。随着激光测距技术的不断发展成熟,其广泛应用于地形和战场的测量、坦克和飞机对目标的测距,以及对导弹、飞机和人造卫星的测量等领域。此外,体积小、重量轻、性能可靠的微型脉冲激光测距仪还被广泛应用于港口、矿山、工业测控等领域。脉冲激光输出瞬时功率大、平均功率小,可同时满足输出高激光功率和低系统能耗的要求,是当前中远程测距的主要光源,一直是国内外研究的热点。

在现有的地物目标激光测距系统中,一般采用纳秒脉冲激光输出的半导体激光器和调Q固体激光器分别作为近程和中远程激光测距光源,然而其测程和精度受激光脉冲宽度和探测器精度的限制^[6]。超短脉冲激光技术的快速发展^[6-7]以及半导体光电探测器材料的进步,使得皮秒脉冲激光输出的超短脉冲激光器在地面远距离目标测距系统中的应用逐渐成为可能。皮秒脉冲激光具有高的峰值功率和短的脉冲宽度,使得测距系统的测程和测量精度得到数个量级的提升。这将给地物目标远程测距技术带来革命性的改进,使得超短脉冲激光测距在民用和军事领域具有更加广泛的应用价值和重要意义。本文设计了一种简单的皮秒脉冲激光远程测距系统。

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-06; 网络出版日期: 2015-08-18

基金项目: 国家自然科学基金

作者简介: 康民强(1986—),男,硕士,研究实习员,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。

E-mail: kangmq@163.com

2 远程测距对皮秒脉冲激光的需求

激光测距的主要优势在于精度,关键技术是提高最大可测距离,即测程,它是表征整机性能的重要参数。随着测量技术的不断发展,对测距仪器的要求越来越高^[2-3]。在脉冲激光测距系统中,脉冲激光器作为核心部分,基本决定了测距系统的测程、精度、体积和重量等重要规格参数。提高测程主要方法有提高激光发射功率、减小束散角、增大接收口径等。在满足系统紧凑需求下,提高激光发射功率是一种较为可行的方法。但随着发射功率的增加,特别是对现有的纳秒脉冲激光,由于其脉宽较宽,需要非常大的脉冲能量,并伴随着更大能源消耗和系统体积的增加。同时较宽的脉冲宽度也限制了测距精度的进一步提高。

现有脉冲激光远程测距系统中,一般采用纳秒脉宽、毫焦脉冲能量输出的调Q固体激光器作为测距光源,其输出脉冲激光峰值功率约为兆瓦量级。随着应用需求的不断提高,激光脉冲宽度已成为影响测程和精度的一个重要因素。相较于纳秒脉冲激光器,皮秒脉冲激光器输出脉宽为皮秒量级、输出能量可达亚毫焦甚至毫焦,其脉冲激光峰值功率可达兆瓦到百兆瓦量级^[6]。随着峰值功率数量级的增加,激光的传输距离(即测距距离)可以得到数量级的提高。同时皮秒脉冲宽度窄,时间分辨率高,使得测距精度也可得到显著提升。因而,皮秒超短脉冲激光器可以作为理想测距光源的选择。

超短脉冲激光(皮秒或者飞秒)在大气传输过程中,由于高输出峰值功率,会产生与纳秒脉冲激光所不同的非线性效应,如非线性自聚焦、受激拉曼散射、多光子及隧道电离、电离引起的能量损耗效应以及激光成丝和白光等^[7-9]。这些非线性效应的存在使得高功率、超短脉冲难以进行远距离的大气传输。但是研究表明,非线性效应的产生需要足够的功率密度,空气中连续波激光产生自聚焦的临界功率估计在1~2 GW的范围内,非线性自聚焦的阈值光强为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。而在激光测距系统中,所需要的皮秒脉冲激光所能达到的输出功率为兆瓦到百兆瓦之间,远未达到非线性效应产生的阈值;同时,激光发射扩束系统的设计可采用伽利略结构,通过负透镜进行光束发散,避免正透镜会聚而产生的空气击穿现象和透镜的损伤;扩束过程中没有光束的会聚,且其发射出去的准直光束口径非常大,使得激光功率密度约为 10^6 W/cm^2 ,从而可以避免非线性效应的产生。因而,测距系统中的超短强激光可实现远距离大气传输,满足测距要求。

近年来,随着短脉冲激光技术的快速发展,采用锁模技术的皮秒脉冲激光器在性能上得到很大提升,其成本大幅下降,国内外已有小型化的成熟产品推向市场。采用皮秒脉冲激光输出的超短脉冲激光器作为测距光源的脉冲激光测距系统已逐渐成为可能,并将成为测距技术研究领域的研究热点。

3 皮秒脉冲激光在卫星测距中的应用

卫星激光测距是通过测量激光脉冲在卫星与地面测站往返飞行时间来确定卫星至测站距离,从而对卫星飞行轨道进行精密跟踪的一种技术。在卫星激光测距系统中,皮秒脉冲激光器已逐步替代纳秒脉冲输出的调Q固体激光器成为了主要测距光源^[10-13]。采用皮秒超短激光脉冲,有利于减小由于脉宽较长而造成的测量误差,同时可以降低激光反射器对激光信号的展宽效应,提高测距精度,使整个测距系统获得数个量级的性能提升。

中国科学院上海天文台采用美国 Photonics Industries 公司生产的半导体抽运皮秒激光器作为测距光源^[10];该激光器由半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模皮秒种子源、隔离系统、再生放大系统及倍频系统组成,其激光输出参数为:脉冲宽度 25 ps,单脉冲能量 3 mJ,重复频率 1 kHz。同时,采用拉脱维亚研制的分辨率为 1 ps、计时精度小于 10 ps 的 A032-ET 事件计时器,作为精确时间计量。其卫星激光测距系统的测量距离已达 38000 km,标靶和 Lageos 卫星平均测量精度分别提高到 4 mm 和 11 mm,其地靶精度为全球第三。

中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站采用北京工业大学的皮秒激光器成功进行了卫星测距实验^[14]。激光器参数为:脉冲宽度 15 ps,单脉冲能量 3 mJ,重复频率 0.5~10 kHz,光束质量 $M^2 < 1.3$;其承担的中国科学院国家天文台南美站的千赫兹激光测距系统改造项目,采用“北京国科”的千赫兹全固态皮秒激光器,地靶精度约为 5 mm,单次测距精度约为 10 mm。

中国科学院云南天文台卫星激光测距系统使用 1411 所研制的皮秒 Nd:YAG 固体激光器^[12-13],其输出单脉冲能量 100 mJ、脉冲宽度 200 ps、重复频率 1~8 Hz;采用用斯坦福大学研制的 SR620 时间间隔计数器,其测时分分辨率为 25 ps;主波信号探测选用 GT106 型快速 PIN 光电二极管,回波探测采用捷克技术大学研制的

C-SPAD 单光子探测器;整机系统测量精度可达厘米量级。该皮秒卫星激光测距系统还可用于空间碎片的测量,中国科学院上海天文台和中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站均已成功开展了相关工作^[14-15]。中国科学院上海天文台采用高功率皮秒激光器在国内首次实现了空间碎片目标的激光测距实验,测量距离大于 900 km,测距精度为 60 cm;随后中国科学院上海天文台在中国科学院装备建设项目的支持下,成功地对多颗空间碎片目标进行了测距,测量精度为 50~80 cm,最远距离为 1200 km。中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站基于其 60 cm 卫星激光测距平台,开展了高重复频率空间碎片激光测距研究,实现对空间碎片目标的观测,最小精度为 21.5 cm。

4 皮秒脉冲激光在地物目标激光测距中的应用分析

在皮秒脉冲激光卫星测距系统中,由于测量距离远(800~38000 km)、精度要求高(毫米量级),因而采用锁模种子谐振腔加多级放大结构的大能量皮秒脉冲激光器作为测距光源,采用单光子雪崩光电二极管对微弱皮秒脉冲回波信号进行探测。整个系统复杂、体积大、成本高。如此复杂昂贵的系统,很难以在其他测距应用中进行推广。

然而,不同于卫星测距,地物目标测距对测程和精度要求相对较低,这使得其对激光器和探测器的要求也相较于卫星测距要低,较低功率输出的皮秒脉冲激光器和常用的雪崩光电二极管(APD)即能满足需求。随着超短脉冲激光技术的快速发展以及半导体光电探测器的进步,皮秒脉冲激光器在地物目标中远距离测距系统中的应用逐渐成为可能。

低功率输出的皮秒脉冲激光器可由 SESAM 锁模皮秒光纤振荡器和光子晶体光纤放大器组成的全光纤结构实现,可获得皮秒脉冲宽度、微焦耳脉冲能量及远程测距所需的兆瓦级峰值功率输出,且整个系统稳定、结构紧凑、成本较低、可模块化。利用 APD 和 PN 探测器快速响应的特性,且随着其精度和灵敏度的不断提高,可以实现更高时间精度的分辨率,获得更高测量精度。随着芯片技术的发展以及高速计算的实现,可以进行更多数据的处理。采用高重复频率、超短脉冲激光进行实时、快速、高精度测量的技术,可适用于靶场导弹、飞行器发射的测量需求。

5 皮秒脉冲激光远程测距系统设计

为对超短脉冲激光器在地物目标远程测距系统中的应用进行实验研究,结合纳秒脉冲激光测距系统结构,设计了一种简单的皮秒脉冲激光远程测距系统,如图 1 所示,主要包括:激光光源、激光发射系统、主波脉冲取样、激光接收系统、光电探测器以及信号处理系统。

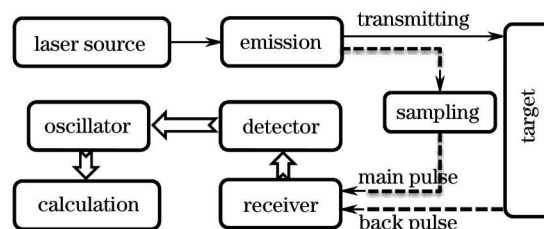


图 1 皮秒脉冲激光远程测距系统原理框图

Fig.1 Diagram of picosecond pulse remote laser ranging

激光光源发射皮秒脉冲激光,通过发射系统的扩束、准直后,得到大口径、小发散角的激光光束射向测距目标方向;部分光束通过取样作为主波脉冲激光被激光接收系统接收;绝大部分光束经过大气传输后到达测距目标,被测距目标反射,反射后的激光脉冲信号再次通过大气传输后作为回波脉冲被接收光学系统接收;接收的主波脉冲和回波脉冲均会被会聚至光电探测器光敏表面;然后被转换为电脉冲信号,再经过示波器显示出脉冲波形,最后根据波形时间相对分布分析得出测量距离。

激光光源采用 SESAM 锁模皮秒光纤激光器,其发射光路和接收光路如图 2 所示。激光发射系统为两个透镜组成的伽利略结构,一个为小口径短焦负透镜,另一个为大口径长焦正透镜。输出的皮秒脉冲激光为圆对称的发散光束,其发散角为 0.03 rad,通过其后方 150 mm 处焦长 35 mm 的负透镜后光束口径为 4 mm,发散角被放大;传输 150 mm 后通过焦长 197 mm 正透镜,最后得到光束直径为 80 mm 的准直光束。输出光

束在口径放大的同时,其发散角被大幅度地压缩。输出光束的口径和发散角可以通过调节负透镜和正透镜的参数及其放置的相互位置来进行灵活设置。这里采用负透镜进行光束发散,避免了正透镜会聚而产生的空气击穿和透镜损伤,发射光束口径也足够大,从而避免了超短脉冲大气传输过程中非线性效应的发生。

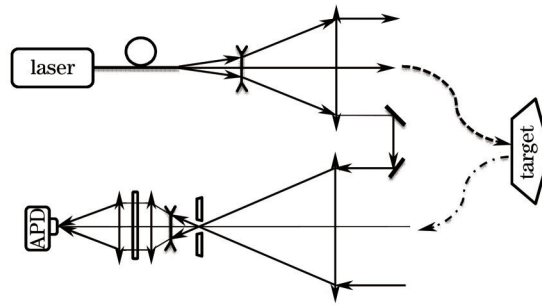


图2 发射和接收光学系统图

Fig.2 Schematic of transmitting and receiving optical system

激光接收系统由一个大口径的正透镜(设计直径为 100 mm)和一组变换物镜组成,为减小长度还设计有一负透镜。光电探测器采用带温度控制和内部电放大的 APD,其光敏面积为 0.2 mm^2 ,最小可探测功率为 0.08 nW ,灵敏度非常高。为增强信噪比,防止其他方向的杂散光的影响,在接收透镜焦点位置放置一小孔光阑来进行空间滤波;同样为了避免其他波段光束的干扰,在两变换物镜之间的水平光路上设计有只允许信号激光波段通过的窄带滤光片进行光谱滤波。光脉冲信号经过 APD 转换为电脉冲信号,再经过放大后接入高带宽示波器,从而可以得到其时间分布波形显示。

皮秒光纤激光器非常重要的一个特点是可实现高重复频率脉冲激光输出,一般在兆赫兹以上,比现有的脉冲激光测距系统中所用的重复频率高几个数量级。利用高重复频率脉冲激光进行测距,能够增加测量数据量、提高系统的可靠性,可实现实时快速高精度测量;结合脉冲串测距技术和多脉冲测距技术^[16-17],可进一步提升整个测距系统的测程和精度。高重复频率皮秒脉冲激光测距,特别是对高重复频率回波脉冲的信号处理及其算法和相关软件的研究,将是激光测距技术新的发展方向。

6 结 论

本文分析探讨了皮秒脉冲激光器作为测距光源在激光远程测距系统中的应用,介绍了脉冲激光测距的现状 & 远程测距的发展趋势,详细分析了远程激光测距对皮秒脉冲激光应用需求,简要介绍了在卫星激光测距系统中皮秒脉冲激光的应用情况,综合论述了皮秒脉冲激光在远程测距系统的应用可行性,最后设计了一种简单的皮秒脉冲激光远程测距系统。高重复频率皮秒脉冲激光远程测距技术的研究,对测距系统的性能提升具有重大意义,是测距技术发展的新方向。

参 考 文 献

- 1 Zheng Ruitong, Wu Guanhao. Infrared pulsed semiconductor laser range finder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(s): 134-138.
郑睿童, 吴冠豪. 红外半导体脉冲激光测距系统[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(s): 134-138.
- 2 Yang Yi, Lu Zukang, Hu Leili, *et al.*. Numerical simulation of ranging performance for an airborne laser ranger finder [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(1): 75-78.
羊毅, 陆祖康, 胡磊力, 等. 机载激光测距机测距性能数值仿真[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 75-78.
- 3 Zhao Kai. The Researching Based on Short Pulse and High Energy Laser Ranging System[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2012.
赵凯. 基于窄脉冲大功率半导体激光器的激光测距系统的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2012.
- 4 Lei Linjun, Yang Yan, Chen Weibiao. High-accuracy time-interval-unit for spaceborne laser range finder[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(10): 1422-1426.
雷琳君, 杨燕, 陈卫标. 星载激光测距仪的高精度时间间隔测量单元[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1422-1426.
- 5 Chen Ruiqiang, Jiang Yuesong. Method of measurement on time-interval in pulse laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212004.

- 陈瑞强, 江月松. 脉冲激光测距的时间间隔测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0212004.
- 6 Xu Dangpeng, Wang Jianjun, Lin Honghuan, *et al.*. High peak power large mode area all fiber pulse amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 589-592.
- 许党朋, 王建军, 林宏奂, 等. 高峰值功率大模场全光纤脉冲放大器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 589-592.
- 7 Josef Blazej, Ivan Prochazka, Lukas Kral. Picosecond laser pulse propagation delay fluctuation through atmosphere [C]. SPIE, 2011, 7924: 79240A.
- 8 Zhang Ning. Propagation of Intense Ultra-Short Laser Pulses in the Atmosphere [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- 张 宁. 超短脉冲强激光在大气中的传输特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- 9 Hu Xueyuan, Zhong Fangchuan, Deng Jian, *et al.*. Ultra-short intense laser pulse propagating in atmosphere: behavior of self-focusing[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(6): 640-646.
- 胡雪原, 钟方川, 邓 建, 等. 超短强激光脉冲在大气传播中的自聚焦行为[J]. 光学学报, 2001, 21(6): 640-646.
- 10 Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, *et al.*. kHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(15): 1177-1183.
- 张忠萍, 张海峰, 吴志波, 等. 高精度千赫兹重复频率卫星激光测距系统及实测结果[J]. 科学通报, 2011, 56(15): 1177-1183.
- 11 Dell' Agnello S, Currie D G, Delle Monache G O, *et al.*. Next generation lunar laser ranging and its GNSS applications [C]. 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010: 1-9.
- 12 Zheng Xiangming, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. 1.2 m telescope satellite co-optical path kHz laser ranging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512002.
- 郑向明, 李祝莲, 伏红林, 等. 云台 1.2 m 望远镜共光路千赫兹卫星激光测距系统[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0512002.
- 13 Li Zhulian, Xiong Yaoheng, He Miaochan, *et al.*. Principle of 1.2 m telescope satellite laser ranging system[J]. Astronomical Research and Technology, 2008, 5(3): 248-252.
- 李祝莲, 熊耀恒, 何妙婵, 等. 云南天文台人造卫星激光测距系统原理[J]. 天文研究与技术, 2008, 5(3): 248-252.
- 14 Dong Xue. Research of High Repetition Space Debris Laser Ranging System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 董 雪. 高重复频率空间碎片激光测距系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- 15 Li Yuqiang, Li Zhulian, Fu Honglin, *et al.*. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908001.
- 李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908001.
- 16 Zhong Shengyuan, Li Songshan. Study of multi-pulsed laser ranging technology[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(s): 797-799.
- 钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(s): 797-799.
- 17 Ni Xuxiang, Hu Kai. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1112005.
- 倪旭翔, 胡 凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1112005.

栏目编辑: 何卓铭