

1 kHz 重复频率多脉冲皮秒激光器研制及其空间碎片激光测距应用

龙明亮¹, 邓华荣^{1*}, 张海峰^{1,2**}, 吴志波^{1,2}, 张忠萍^{1,2,3}, 陈檬⁴

¹中国科学院上海天文台, 上海 200030;

²中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008;

³华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

⁴北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 超短皮秒脉冲的峰值功率高、大能量输出困难。通过将单个脉冲分成多个相邻的脉冲, 可增大脉冲包络总能量, 提高激光输出功率。设计并获得光-光转化效率为 39.3% 的单路锁模皮秒种子激光输出, 提出将单脉冲分成多脉冲的方法, 利用布拉格体光栅 (VBG) 脉冲展宽、多脉冲生成、再生放大、行波放大及频率转换等激光技术获得脉冲间距为 1 ns、输出功率为 10 W、脉冲包络能量为 10 mJ、单脉冲脉宽约为 100 ps、光束质量为 1.67、重复频率为 1 kHz 的 532 nm 百皮秒四脉冲激光输出。通过激光模块泵浦产生的热透镜效应, 并通过调节泵浦电流实现对激光输出发射角的连续精确调节, 获得的最小发散角为 0.2 mrad。将所设计方法应用在上海天文台空间激光测距站平台上, 进行多颗空间碎片测距, 测距精度最优为 16.44 cm。该结果表明多脉冲可增大激光总输出能量、提高激光输出功率且可为空间碎片激光测距探测能力的提升提供有效的技术途径。

关键词 激光光学; 皮秒激光; 空间碎片激光测距; 多脉冲; 单光子探测

中图分类号 P412

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0614001

Development of Multiple Pulse Picosecond Laser with 1 kHz Repetition Rate and Its Application in Space Debris Laser Ranging

Long Mingliang¹, Deng Huarong^{1*}, Zhang Haifeng^{1,2**}, Wu Zhibo^{1,2},
Zhang Zhongping^{1,2,3}, Chen Meng⁴

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

²Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;

³State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

⁴Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The peak power of ultra-short picosecond pulses is high, and the realization of the large energy output is difficult. The single pulse is divided into multiple adjacent pulses, which can increase the total energy of the pulse envelope and increase the laser output power. A single-channel mode-locked picosecond seed laser output with an optical-to-optical conversion efficiency of 39.3% is designed and obtained, and a method of dividing a single pulse into multiple pulses is proposed. By using Bragg volume grating (VBG) pulse broadening, multiple pulse generation, regeneration amplification, traveling wave amplification, and frequency conversion, a laser output at 532 nm with four pulses, 1 ns pulse spacing, 10 W output power, 10 mJ pulse envelope energy, 100 ps pulse width

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-10-06; 录用日期: 2020-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(U1631240, 11903066, 12003056)、上海市自然科学基金面上项目(20ZR1467500)、新疆自治区引进高层次人才天池计划支持

* E-mail: dhr@shao.ac.cn; ** E-mail: hfzhang@shao.ac.cn

of the single pulse, 1.67 beam quality, and 1 kHz repetition frequency is obtained. Through the thermal lens effect pumped by the laser module, the laser output emission angle can be adjusted continuously and accurately by adjusting the pump current, and the minimum divergence angle is 0.2 mrad. The designed method is applied to the space laser ranging station of Shanghai Observatory to carry out the ranging of multiple space debris, and the ranging accuracy is 16.44 cm. The results show that multiple pulses can increase the total laser output energy and laser output power, which provides an effective technical way to improve the ability of space debris laser ranging detection.

Key words laser optics; picosecond laser; space debris laser ranging; multi pulses; single photon detection

OCIS codes 140.7090; 140.3280; 280.3400

1 引言

空间碎片的存在严重地影响着在轨运行航天器的安全,空间碎片的不断产生严重地浪费有限轨道资源,同时空间碎片陨落也对地面人员与财产造成严重影响^[1-2]。激光信号具有波长短、发散角小、方向性好、单色性好、抗干扰等特点,受大气传播延时影响小,适合远距离目标高精度测量,能显著提升空间碎片轨道测定精度,对增强航天器碰撞预警能力具有重要作用^[3-8]。激光测距技术在不断追求探测能力和测量精度的提升,对激光器输出能量和脉宽提出越来越高的要求。在空间碎片漫反射激光信号探测中,地面测量系统普遍采用百赫兹重复频率、纳秒脉宽、数十瓦输出功率的激光器系统。由于采用纳秒激光脉宽,最佳测距精度难以得到进一步提升^[4-7],因此需发展皮秒脉宽空间碎片激光测量技术。为验证皮秒激光在测距精度及测距能力方面的优势,中国科学院上海天文台分析了影响测距精度的来源,以及强激光在大气传输中的非线性效应,采用千赫兹双脉冲 532 nm 皮秒激光实现多颗空间碎片目标的激光测距,其中对部分目标的最佳测距精度可达到亚 dm 级。此测距能力表明强激光在大气传输中与大气分子之间的相互作用产生的非线性效应作用在激光光束上,激光光束的自聚焦使得光束传输发射角减小并逐渐达到衍射极限角^[8-9]。

大能量皮秒激光器为空间碎片激光测距提供一种新型的激光源,然而,皮秒激光器通常采用半导体可饱和吸收体(SASAM)锁模(ML)获取超短脉冲,而基于直接 SASAM 锁模得到的皮秒脉冲脉宽较窄,约 10 ps^[10-11],该方法难于实现对高能量皮秒激光的放大,激光能量越大也越容易造成光学器件的损坏,从而限制皮秒激光器高功率大能量的获得^[11-14]。采用多脉冲的方式将脉冲能量集中在一个比较近的包络里,这样可降低各脉冲的能量,有效避免器件的损伤,可进一步提高激光输出的能力。Siders 等^[15]采用类似迈克耳孙干涉仪分束的方法,

将单个脉冲分束为 16 个等间距的脉冲,再通过偏振合束的方法实现 100% 的能量转换,并以此提出将单脉冲分成 2^n (n 为自然数) 个脉冲的方法。Nebel 等^[16]通过对电光开关的高压信号进行控制,获得串内脉冲数为 2, 10, 20 的多脉冲,通过将多脉冲应用于微加工,发现多脉冲的加工速度及效果优于单脉冲。Rezaei 等^[17]采用腔匹配的方式且腔内无放大增益模块的结构,获得串内脉冲数、脉冲幅值可调的多脉冲飞秒激光输出,脉冲包络能量达 1 mJ。

本文以空间光程差的脉冲分束方法获得 4 脉冲激光输出,并结合锁模、布拉格体光栅(VBG)皮秒脉冲展宽、再生放大、行波放大及频率转换技术获得高功率多脉冲皮秒激光,通过控制泵浦电流来实现对热透镜的控制,从而达到对激光发散角的调节;将多脉冲应用于中国科学院上海天文台空间碎片激光测距,利用 6 倍扩束的发射望远镜、硅雪崩光电二极管(Si-APD)单光子探测器以及光谱滤波、空间滤波、距离门控滤波减小噪声对空间碎片激光回波信号的干扰,成功实现对多颗空间碎片目标的多脉冲皮秒激光测距。

2 多脉冲皮秒激光器

多脉冲皮秒激光器光路如图 1 所示,其中 I 为锁模,II 为 VBG 脉冲展宽与空间光程差脉冲分束,III 为再生放大器,IV 为行波放大器及倍频器。系统工作流程如下:皮秒脉冲种子光由锁模输出,经脉冲展宽及空间光程差脉冲分束获得 4 脉冲输出,利用再生放大器将脉冲能量放大,通过对 III 内各分束的调节可实现 4 脉冲选择及脉冲幅值输出,并由 IV 中的单通行波放大器增大输出功率,最后经倍频输出 4 脉冲重复频率为 1 kHz 的 532 nm 皮秒激光。

图 1 中各个组成部分的详细工作原理如下。锁模腔(I)输出皮秒种子脉冲,由 Nd:YVO₄ 晶体,平凹全反镜 R₁、R₂, 1/2 波片 HWP₁, 偏振片 P₁, 1/4 波片 QWP₁, 45°全反镜 M₂, 0°全反镜 M₁、M₃、M₄, 以及半导体可饱和吸收镜(SESAM)构成。QWP₁

与 P_1 组成输出功率可调的输出镜, 输出单路锁模激光。腔内部分锁模光从 P_1 另一侧出射, 由光电管接收。在泵浦功率为 3 W 时, 调节 QWP_1 获得最佳锁

模输出功率, 输出功率为 1.18 W, 光-光转化效率达 39.3%。测得的光谱如图 2 所示, 线宽为 0.26 nm, 中心波长为 1064.38 nm, 输出脉宽为 23 ps。

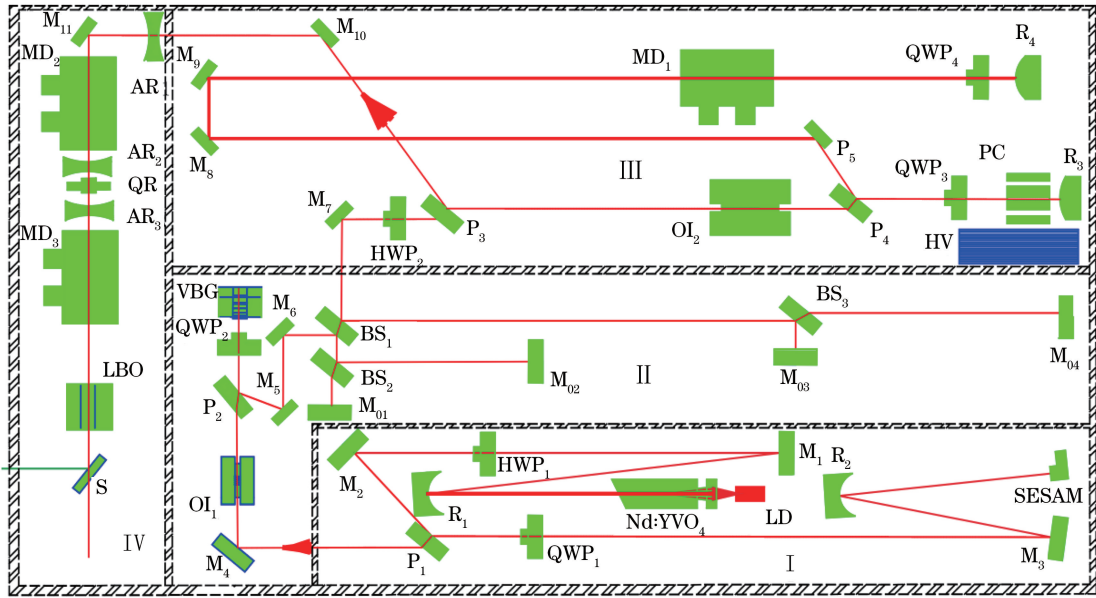


图 1 千赫兹重复频率多脉冲皮秒激光器光学原理图

Fig. 1 Optical principle diagram of multiple-pulse picosecond laser at kHz repetition rate

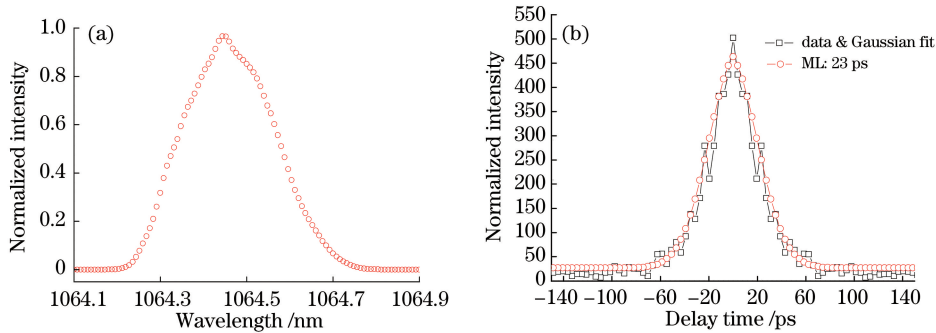


图 2 锁模激光输出。(a) 光谱线宽; (b) 脉宽

Fig. 2 Mode-locked laser output. (a) Spectral line width; (b) pulse width

对于 VBG 脉冲展宽与空间光程差脉冲分束部分 (II), BS_1 、 BS_2 、 BS_3 为半透半反镜, M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 、 M_{04} 为 0° 的 1064 nm 高反镜。经 VBG 展宽后的锁模脉冲入射到 BS_1 上, 强度为 I 的脉冲一半经 BS_1 反射, 另一半透过 BS_1 并分成 2 路光, 光强度降为 $0.5I$; 经 BS_1 反射与透射的脉冲分别在 BS_2 、 BS_3 处一半反射、一半透射, 每路光强度降为 $0.25I$ 。 BS_2 的透射脉冲与反射脉冲分别经 M_{01} 、 M_{02} 的全反射, 再次在 BS_2 、 BS_1 上一半反射、一半透射, 光的强度降为 $0.0625I$ 。 M_{03} 、 M_{04} 全反射回来的光脉冲在 BS_3 、 BS_1 上一半反射、一半透射, 每路光的强度降为 $0.0625I$ 。4 路光在 BS_1 处合束, 形成具有一定间距的多脉冲。在 M_{01} 与 M_{02} 全反射并透过 BS_1 的光

脉冲中, 两个光脉冲的光程差为 ΔL_1 , 第二个光脉冲将延迟, M_{01} 反射的脉冲在前, M_{02} 反射的脉冲在后, 两光脉冲的时间间隔 $\Delta t_1 = \Delta L_1 / c$ (c 为光速), 即 M_{02} 的反射光在 M_{01} 反射光的后面, 时间间隔为 Δt_1 。同理, BS_2 透射与反射的脉冲分别经 M_{03} 、 M_{04} 的全反射, 再次在 BS_3 、 BS_1 上一半反射、一半透射, M_{03} 反射的脉冲在前, M_{04} 反射的脉冲在后, 两个光脉冲的光程差为 ΔL_2 , 两光脉冲的时间间隔 $\Delta t_2 = \Delta L_2 / c$ 。 M_{02} 、 M_{03} 反射的光脉冲的光程差为 ΔL_3 , 两个光脉冲的时间间隔 $\Delta t_3 = \Delta L_3 / c$ 。通过调节 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 、 M_{04} 、 BS_1 、 BS_2 、 BS_3 相互之间的位置, 使得光程差 $\Delta L = \Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3$, 从而将单脉冲分成等间距 ($\Delta t = \Delta L / c$) 的 4 脉冲。各镜片反射光

经 BS_1 、 BS_2 、 BS_3 的透射及反射后,相互之间没有形成回路,互不影响,这保证了各脉冲的独立性。最后 4 路光的总能量降为原来的 $1/4$ 。通过此方法获得的脉冲间距精度能达到 ps 量级(3 ps)。而光程差 ΔL 的选择范围可以从毫米到几十厘米甚至更长,这样所获得的脉冲的间距范围可从几皮秒至几纳秒。利用展宽后的锁模种子脉冲生成的多脉冲结果如图 3 所示。受分束镜的分光比及每路光束重合度的影响,各幅值并不严格按分束过程均分。调试时取 $\Delta L=300$ mm,对应的脉冲间距为 1 ns。反射镜 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{03} 、 M_{04} 分别对应图 3 中多脉冲中的一个脉冲,通过遮挡各反射镜即可控制对应脉

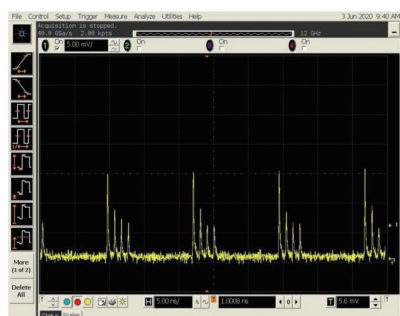


图 3 脉冲分束 4 脉冲(div: 5 ns)

Fig. 3 Pulse is splitted into four pulses (div: 5 ns)

冲的开启,实现对各脉冲的选择以及光束偏移调节。

III 为再生放大器,其中再生谐振腔由凸反镜 R_3 、 R_4 , 45° 全反镜 M_8 、 M_9 , 偏振片 P_4 、 P_5 , Nd:YAG 激光晶体组成,腔长为 1.4 m,对应腔周期为 9.3 ns。法拉第旋转器和 $1/2$ 波片组成光隔离器 OI_2 , 普克盒 PC 与 $1/4$ 波片 QWP_3 组成脉冲选择开关, $1/4$ 波片 QWP_4 补偿 Nd:YAG 激光晶体的热退偏。多脉冲透过光隔离器进入再生放大器中,在脉冲选择开关的控制下在腔内进行来回放大,最后输出重复频率为 1 kHz 的大能量皮秒激光脉冲。采用千赫兹侧泵浦模块,LD 侧泵 Nd:YAG 模块中 Nd:YAG 激光晶体的尺寸为 $\Phi 6$ mm \times 67 mm。侧泵浦模块中 LD 为 808 nm 半导体钇条,单个钇条的长度为 12 mm,钇条共有 12 个,将其分成 4 圈,每圈 3 个,有效泵浦长度为 48 mm。在泵浦电流为 50 A、泵浦脉宽为 200 μ s、重复频率为 1 kHz 的条件下,调节再生腔内的普克盒 PC,最终获得单脉冲能量为 7.0 mJ 的激光输出,此时普克盒上高压时间为 260 ns,即锁模种子脉冲在谐振腔内往返约 28 次,因此共有 28 个放大周期。测得光束质量 $M^2=1.45$,光斑直径约为 1.8 mm,脉宽为 110 ps,输出的 4 脉冲波形如图 4(a) 所示。再生放大过程中多脉冲的生长过程如图 4(b) 所示。

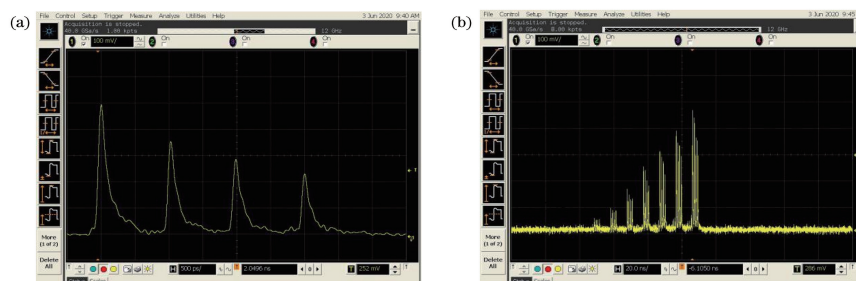


图 4 4 脉冲的再生输出脉冲波形。(a) 脉冲输出波形(div: 1 ns);(b) 脉冲生长波形(div: 20 ns)

Fig. 4 Waveforms of regenerative output pulse of four pulses. (a) Pulse output waveform (div: 1 ns); (b) pulse growth pulse (div: 20 ns)

从图 4(a) 可以看出,再生放大过程中先对前面的脉冲进行放大,消耗反转粒子数,再对后面的脉冲进行放大,此时的泵浦增益由于前面脉冲的消耗而减小,这样导致后面的脉冲放大比前面的脉冲放大慢,脉冲能量下降,输出脉冲的幅值降低,从而出现如图 4(a) 所示的多脉冲的幅值依次下降的现象。通过减小多脉冲种子光各个脉冲的强度或改变各个脉冲导入再生放大谐振腔时的偏移程度,实现各脉冲的放大输出能量调节。

图 1 中 II 部分含空间光程差脉冲分束过程,多脉冲内各脉冲可以通过对应的空间光程差脉冲分束

的反射镜被单独调节并导入再生放大谐振腔,同时可通过控制每一路脉冲在再生放大过程中的振荡强度,实现多脉冲串内各脉冲的幅值、能量调节,如遮挡图 1 中的 M_{02} 、 M_{03} , 输出 4 脉冲中的第一个与最后一个脉冲,如图 5 所示,测量到的两脉冲之间的间距为 3 ns。

对于双模块单通行波放大器及倍频器(IV),在高功率激光放大过程中,由于激光自身的强光作用,介质的折射率随光强的变化而变化。激光功率密度足够高或者作用距离足够长时,介质中会产生非线性的克尔效应。对于比较常见的高斯光束,在强激

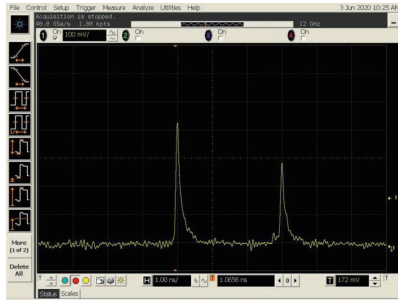


图 5 第一、第四脉冲的双脉冲输出

Fig. 5 Double pulse output of first and fourth pulses

光的作用下,光束中心部分折射率就会比边缘部分折射率高,导致了光束中心部分的传输速度比边缘低,产生相位延时,这使得光束在传播时产生相位畸变。这种畸变可以等效为在介质中加入了一个正透镜,使光束在传输过程中逐渐向中心聚焦。同时,在高峰值或高功率泵浦下,泵浦模块中的 Nd:YAG 激光晶体内部温度分布不均匀,产生应力分布,引起光线通过晶体棒中不同位置时的不同光程,形成折射率沿径向的梯度分布,产生热透镜效应。图 1 中 IV 中的 AR₁、AR₂、AR₃ 为凹透镜(曲率半径 R = -200 mm)用于补偿泵浦模块的热透镜及自聚焦效应;QR 为石英旋转器,用于补偿泵浦模块之间的热退偏;MD₂、MD₃ 为 808 nm 半导体 LD 侧泵模块,泵浦重复频率为 1 kHz,泵浦电流为 90 A,功率为 216 W。将再生放大输出的 7 W 多脉冲经此双模块单通行波放大器的放大后,可获得 20 W 的 1064 nm 输出。采用 LBO 晶体的 I 类角度匹配的倍频器,晶体相位匹配角为:θ = 90°,φ = 11.6°,尺寸为 4 mm × 4 mm × 11 mm,用铝箔包裹晶体并将其放置在 25 °C 恒温的热沉上,整个热沉可以左右、俯仰调节。倍频获得的输出功率为 10.2 W,即多脉冲包络能量为 10.2 mJ,输出单脉冲脉宽约为 100 ps,光束质量 M_x² = 1.71, M_y² = 1.624,即光束质量 M² 为 1.67,如图 6 所示。通过微调泵浦电流,可实现对发

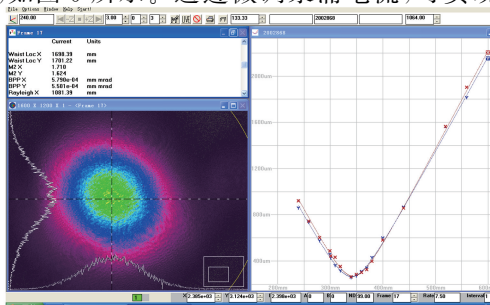


图 6 多脉冲双模块单通放大的光束质量

Fig. 6 Beam quality of multi-pulse two-module single-pass amplification

射角的微调,获得的最小发散角为 0.2 mrad。

3 多脉冲空间碎片激光测距及系统

3.1 多脉冲的探测能力计算分析

对于光电探测器,光电转换服从泊松分布,测距过程中采用窄带滤波器、空间小孔滤波等方法抑制噪声,探测器噪声及背景噪声低,特别在夜晚,可不考虑噪声影响。根据激光雷达方程,对于非等幅值的脉冲,假设第一个脉冲的光子数为 n_0 ,则第 N 个脉冲的光子数为 $b_N n_0$ 。 N 个脉冲接收到光电子的总概率为

$$P_{1-N}(1) = \sum_{n=1}^N P_n(1) = P_1(1) + P'_1(1)P_2(1) + P'_1(1)P'_2(1)P_3(1) + \dots + P'_1(1)P'_2(1)P'_3(1)P_N, \quad (1)$$

式中: $P_1(1)$ 为第一个脉冲被探测到的概率; $P'_1(1)$ 为第一个脉冲未被探测到的概率;第二个脉冲的探测概率为在第一个脉冲未被探测到时第二个脉冲被探测到的概率,即 $P'_1(1)P_2(1)$,由此可得第 N 个脉冲被探测到的概率为 $P'_1(1)P'_2(1)P'_3(1)\dots P'_{N-1}(1)P_N$,故脉冲被探测到的总的概率为各脉冲被探测到的概率之和^[18]。由泊松分布可得

$$P_{1-N}(1) = 1 - \exp(-n_0) + \exp(-b_1 n_0)[1 - \exp(-b_2 n_0)] + \dots + \exp[-(b_1 + b_2 + \dots + b_{N-1})n_0][1 - \exp(-b_N n_0)],$$

化简得

$$P_{1-N}(1) = 1 - \exp[-(1 + b_2 + \dots + b_{N-1} + b_N)n_0]. \quad (2)$$

对于微弱信号光子探测,微弱回波信号 $n_0 \rightarrow 0$ 时,将(2)式由泰勒级数展开可得

$$P_{1-N}(1) = (1 + b_2 + \dots + b_{N-1} + b_N)n_0. \quad (3)$$

由此,探测成功概率随脉冲数的增多呈线性增大。同时(3)式表明多脉冲的探测成功率可等效于与脉冲包络多脉冲能量之和相等的单脉冲探测。以上分析表明探测成功率受脉冲总能量的影响比较大,同样能量下,无论是对单个脉冲还是多个具有不同幅值的脉冲,探测成功率是一致的。因此,在高能量单脉冲皮秒激光难以实现的情况下,可以通过多脉冲激光形式增大激光输出的总能量,从而提高探测能力。

3.2 空间碎片激光测距及系统

空间碎片激光测距涉及碎片轨道的预报、激光发射与接收、数据处理等多方面的内容,中国科学院上海天文台空间碎片激光测距系统的具体结构如图 7 所示^[8]。

图 7 展示了空间碎片测量的过程,首先从计算机系统下载空间碎片轨道预报参数(TLE 参数),计算机系统处理、转换可执行的文件,发出控制指令,控制伺服系统,跟踪机架开始跟踪,在编码器的反馈下实现精确的跟踪(目标瞄准),并由接收系统的 CCD 监测空间碎片的位置。此时地面人员从计算机发出点火信号发射指令,皮秒激光器经点火输出的激光通过折反射光学系统及望远镜发射系统到达空间碎片(目标击中)上,并通过光电管接收激光发射时的脉冲信号,经恒比定时器鉴别,开启事件计时器,计算机终端记录主波时刻;空间碎片的

激光回波信号经接收系统到达单光子探测器 APD,通过电平转换关闭事件计时器以获得回波时刻,这样可得到输出激光和反射激光的时间差,从而获得空间碎片与地面的距离。为了精确地测量距离,需要利用时间频率基准精确地获得各时刻的值。同时,通过距离门控电路,空间碎片的反射激光传输至望远镜时,准确开启单光子探测器。中国科学院上海天文台的 60 cm 空间碎片激光测距系统中除激光器外的望远镜系统的主要性能参数参考文献[7]中佘山站的参数。为了更有效地避免其他噪声对单光子探测器 APD 的干扰,在此使用了 2 nm 带宽的滤波片。

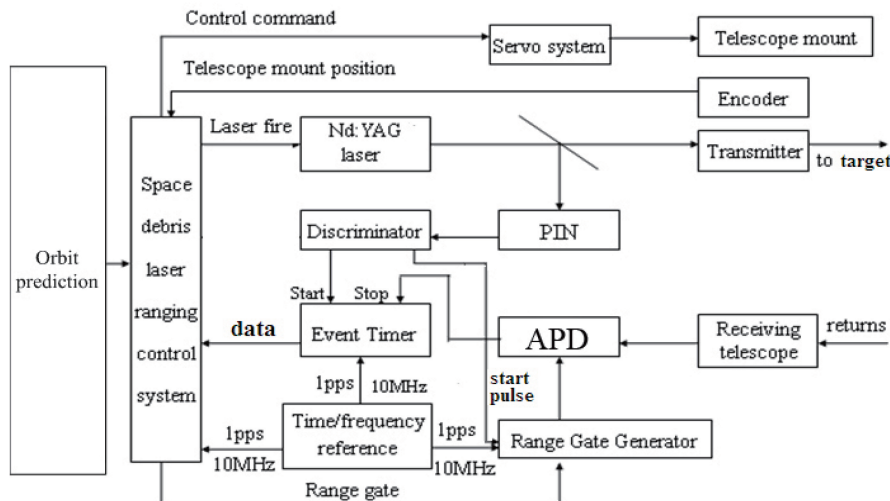


图 7 中国科学院上海天文台空间碎片激光测距系统框图^[8]

Fig. 7 Diagram of space debris laser ranging system at the Shanghai observatory of Chinese Academy of Science^[8]

4 测距结果与讨论

根据北美防空司令部(NORAD)公布的网页(www.Space-Track.-Org)上的空间碎片预报轨道参数获得各空间碎片的预报结果,经计算机处理,通过将预报结果输入伺服系统,实现对空间碎片的跟踪,从监测 CCD 上观察空间碎片在 CCD 视场中的位置,并通过微调跟踪使得空间碎片位于 CCD 视场中的指定位置。此时,发射多脉冲皮秒激光(由 6 倍发射望远镜发射),多脉冲皮秒激光经 6 片 45°光学全反镜的反射,到达发射望远镜前的功率为 8.5 W,从 CCD 上看到的光束如图 8 所示,锥形光束光尖部分十分尖锐。

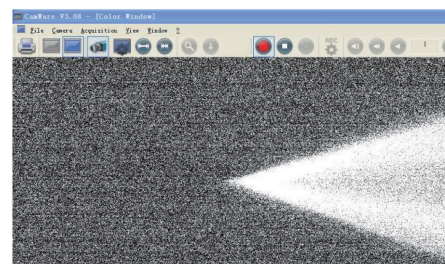


图 8 发射激光的锥形光束

Fig. 8 Cone-shaped beam of emission laser

通过计算机控制、处理、微调跟踪,进行激光瞄准击中空间碎片的修正,在一定修正量下获得了空间碎片[名称 SL_DEB(814),雷达散射截面(RCS)的面积为 7.5 m²,距离为 879~1132 km]反射回来的回波信号,如图 9 所示。图 9 中密集点

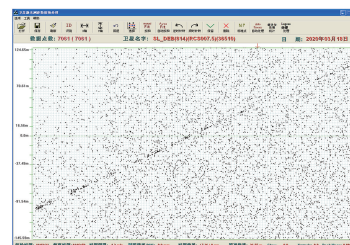


图 9 空间碎片激光测距得到的激光回波数据

Fig. 9 Laser echo data obtained by space debris laser ranging (有一定弧度的点线)即为空间碎片返回的激光回

波信号。经数据处理获得的测量精度达到 28.65 cm。与此同时还测得针对多颗空间碎片的

激光测距的精度,如表 1 所示,其中最优的测距精度达到 16.44 cm。

表 1 多脉冲皮秒激光空间碎片测距结果

Table 1 Results of laser space debris ranging with multi-pulse picosecond laser

Number	Date	Name	RCS /m ²	Root mean square /cm	Measured distance /km
1	2020-03-15	SL-14R_B	4.6	31.06	727.5-749.0
2	2020-03-15	Cz-2c-r-b1_Gz	10.7	16.44	1083.4-1150.7
3	2020-03-18	Delta2R_B	9.8	118.17	1006.4-1049.3
4	2020-03-18	SL_DEB(814)	7.5	28.65	836.7-899.4
5	2020-03-18	DELTA2R_B_O	5.5	64.27	1100.3-1162.9
6	2020-03-18	SL-3R_B	6.6	150.51	643.8-646.5

多脉冲由 4 个脉冲组成,脉冲间距约为 1 ns,对应的脉冲包络宽度为 3 ns。对于大目标空间碎片,若利用单个脉冲测得的数据叠加在一起,则对应的测距精度约为 45 cm。表 2 中所测量的空间碎片尺寸比较大,多脉冲之间的间距为 1 ns,间距较小,大尺寸空间碎片对脉冲的脉宽展宽大于多脉冲内脉冲之间的间距,这降低了测距精度。为了验证多脉冲中单个脉冲的测距情况,采用图 5 所示的双脉冲激光对合作目标北斗 Compassi3 卫星进行了测量,结果如图 10 所示,回波信号中双脉冲明显分离,单个脉冲的测距精度达到 1.4 cm。因而多个脉冲激光的空间碎片测距可实现多脉冲中各脉冲回波的分

离,可获得多脉冲内单脉冲测距的高精度^[18]。提方法应用在中国科学院上海天文台空间碎片激光测距系统上,可实现对多个空间碎片目标的测距,最高的测距精度为 16.44 cm。结果表明:通过多脉冲方式可获得大能量皮秒脉冲激光输出、提高激光发射功率,使得大能量皮秒激光满足空间碎片测距的激光功率发射需求,提高空间碎片的激光探测能力,从而为空间碎片及深空探测等微弱信号探测中激光功率提升与能量发射增强提供有效的途径。

参 考 文 献

- [1] Kelly P W, Bevilacqua R, Mazal L, et al. TugSat: removing space debris from geostationary orbits using solar sails [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, 55(2): 437-450.
- [2] Sun H, Zhang H F, Zhang Z P, et al. Experiment on diffuse reflection laser ranging to space debris and data analysis [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(6): 909-917.
- [3] Deng H R, Zhang H F, Long M L, et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0314002.
邓华荣, 张海峰, 龙明亮, 等. 4 kHz 重复频率卫星激光测距系统及其应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0314002.
- [4] Zhang Z P, Yang F M, Zhang H F, et al. The use of laser ranging to measure space debris [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(2): 212-218.
- [5] Kirchner G, Koidl F, Friederich F, et al. Laser measurements to space debris from Graz SLR station [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(1): 21-24.
- [6] Li Y Q, Li Z L, Fu H L, et al. Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris [J]. *Chinese Journal of 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.

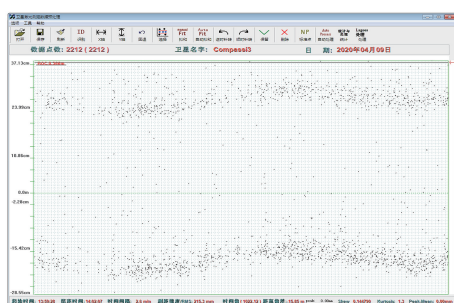


图 10 Compassi3 卫星激光测距中对双脉冲回波数据的处理结果

Fig. 10 Data processing result of double-pulse echo in satellite laser ranging for Compassi3

5 结 论

提出以脉冲分束生成多脉冲的方法,设计了单路锁模输出,得到的光-光转化效率达 39.3%,并结合脉冲展宽、再生放大、频率转换等激光技术得到重复频率为 1 kHz、功率为 10.2 W 的四脉冲 532 nm 皮秒激光,其光束质量 M^2 为 1.67,多脉冲的脉冲数为 4,脉冲间距约为 1 ns,单脉冲脉宽约为 100 ps,多脉冲内的脉冲强度逐渐递减。通过将所

- [7] Long M L, Zhang H F, Deng H R, et al. Laser ranging for space debris using double telescopes with kilometer-level distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0228002.
龙明亮, 张海峰, 邓华荣, 等. 距离千米级双望远镜的空间碎片激光测距[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0228002.
- [8] Zhang Z P, Zhang H F, Long M L, et al. High precision space debris laser ranging with 4.2 W double-pulse picosecond laser at 1 kHz in 532 nm[J]. *Optik*, 2019, 179: 691-699.
- [9] Rubenchik A M, Fedoruk M P, Turitsyn S K. The effect of self-focusing on laser space-debris cleaning [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e159.
- [10] Long M L, Chen L Y, Chen M, et al. High-power LD side-pump Nd:YAG regenerative amplifier at 1 kHz repetition rate with volume Bragg gratings (VBG) for broadening and compressor[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(5): 1-5.
- [11] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.
朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1200001.
- [12] Dong B, Liu L, Tang X J, et al. 100-W high-power Nd:YAG picosecond laser-slab amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1101004.
董彬, 刘磊, 唐晓军, 等. 100 W 高功率 Nd:YAG 皮秒板条激光放大器[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1101004.
- [13] Wang Z W, Wang Z K, Zou F, et al. High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001001.
王子薇, 王兆坤, 邹峰, 等. 高功率皮秒脉冲棒状光子晶体光纤放大器[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001001.
- [14] Wang M, Wang F, Yu C L, et al. Ultra-low core numerical aperture large mode area photonic crystal fiber with 1 MW peak power output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0536001.
王孟, 王璠, 于春雷, 等. 兆瓦峰值功率输出的超低纤芯数值孔径大模场光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0536001.
- [15] Siders C W, Siders J L W, Taylor A J, et al. Efficient high-energy pulse-train generation using a 2"-pulse Michelson interferometer [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5302-5305.
- [16] Nebel A, Herrmann T, Henrich B, et al. Generation of tailored picosecond-pulse-trains for micro-machining [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6108: 610812.
- [17] Rezaei S, Li J Z, Herman P R. Burst train generator of high energy femtosecond laser pulses for driving heat accumulation effect during micromachining [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2064-2067.
- [18] Men L L, Long M L, Zhang H F, et al. Research on weak signal detection ability for burst-pulses laser [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 557-562.
门琳琳, 龙明亮, 张海峰, 等. 多脉冲激光的微弱信号探测能力分析研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(5): 557-562.