

doi: 10.3788/gzxb20134201.0043

一种基于增益调制技术的全光纤化 脉冲 Yb 光纤激光器

孙宏, 魏凯华, 钱凯, 陈滔, 杨丁中, 姜培培, 吴波, 沈永行

(现代光学仪器国家重点实验室; 浙江大学 光电系, 杭州 310027)

摘 要:以波长为 975 nm 的半导体激光器作为泵浦源, 周期性地脉冲泵浦一个包含 Yb 掺杂光纤和光纤光栅对的 Yb 光纤激光器, 实现了基于增益调制技术的全光纤化高功率 Yb 光纤激光器的稳定脉冲输出. 在 50 kHz 重频下, 采用 20 W 的泵浦功率和 2.4 μ s 的泵浦脉冲宽度, 获得了 1 060 nm 波长脉冲宽度仅 100 ns 的稳定脉冲激光输出, 单脉冲激光能量约为 20 μ J. 以此作为脉冲激光种子进行功率放大, 获得了性能稳定的全光纤结构高功率脉冲激光输出, 放大后单脉冲能量超过 200 μ J, 激光放大器斜率效率达到 60%.

关键词: 光纤激光器; 掺 Yb³⁺; 脉冲激光; 增益调制

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)01-0043-5

Gain Switched All-fiberized Pulse Yb Fiber Laser

SUN Hong, WEI Kai-hua, QIAN Kai, CHEN Tao, YANG Ding-zhong, JIANG Pei-pei,
WU Bo, SHEN Yong-hang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation; Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A gain-switched Yb-doped pulse fiber laser which was periodically pumped by a pulsed Laser Diode (LD) centering at wavelength of 975 nm was reported. The pulsed Yb fiber laser was composed of a piece of Yb doped double cladding gain fiber and a pair of fiber Bragg gratings. Under pump power of 20 W and pulse duration of 2.4 μ s at repetition rate of 50 kHz, stable laser pulse trains were obtained at 1 060 nm with pulse duration of 100 ns. The shot energy of every pulse was measured up to 20 μ J. Using this pulsed Yb fiber laser as the seed, a maser-oscillator power amplifier (MOPA) structured high power Yb laser was constructed with pulse energy exceeding 200 μ J. The slope efficiency of the MOPA was about 60%.

Key words: Fiber laser; Yb³⁺-doped; Pulsed laser; Gain switched

0 引言

脉冲激光器具有比其平均功率高得多的峰值功率, 在光纤通信、光纤传感、工业加工、光信息处理、激光制导、医疗等领域都有着重要的应用^[1]. 典型的产生脉冲激光的方法有调 Q^[2-4]、腔倒空^[5]和锁模^[6-7]技术. 调 Q 技术通过在谐振腔内插入损耗调制元件产生激光脉冲, 是一种获得数十至数百纳秒

脉冲输出的主要技术手段. 但是, 由于目前尚无成熟的全光纤化的调 Q 器件, 在制作光纤激光器时, 一般需要在调制器的两端用光纤进行空间耦合, 由此引入空间耦合器件, 导致较大的插入损耗, 并使得整个激光器的长期稳定性存在一定隐患; 被动调 Q 技术获得的脉冲激光重频控制较为困难, 受泵浦光功率等因素影响较大. 腔倒空技术在全光纤结构的光纤激光器中很难实现. 锁模技术可以获得高重频的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61078015)、国家重点基础研究发展计划(No. 2011CB311803)和浙江省教育厅项目(No. Y200909758)资助

第一作者: 孙宏(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器. Email: 21030048@zju.edu.cn

责任作者/导师(通讯作者): 沈永行(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤激光器、中红外光参量振荡器、光纤传感、光谱检测技术.

Email: physyh@zju.edu.cn

收稿日期: 2012-08-07; 录用日期: 2012-10-19

短脉冲激光输出,但原理方案较为复杂,对环境条件较为敏感,一般需要初始触发诱导锁模,实验重复性较差,可获得的激光单脉冲能量较低.

除了上述技术,增益调制技术也是一种实现短脉冲输出的有效手段.该技术常应用于半导体激光器,通过以一定重复频率和一定脉冲宽度的电脉冲直接驱动 LD,可以获得各种脉冲宽度的激光输出,其脉冲宽度最小可达皮秒量级^[8-9].但是,电脉冲激励 LD 可实现的峰值功率较低,单脉冲能量小,如果应用于主振功放(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构^[10]的高功率光纤激光器,则需要经过多级光纤放大才能实现高功率的脉冲激光输出,结构复杂、成本高、系统稳定性相对较差.

通过将增益调制技术直接应用于光纤激光器,可实现平均功率将近瓦级的全光纤结构脉冲激光输出.因此,经过一级放大后就可实现平均功率数十瓦的高峰值功率的脉冲激光输出.基于增益调制技术的光纤激光器结构简单,不需要在腔内插入任何调制元件.其脉冲的建立和特性主要取决于泵浦源和光纤激光器的结构.采用脉冲的泵浦方式,增益光纤可以在极短的泵浦持续时间内,迅速达到高增益,并由此快速地建立巨脉冲^[11].

将增益调制技术应用于脉冲光纤激光器可以实现真正的全光纤结构,结构简单可靠,具有重要的应用前景.但是,基于增益调制技术的脉冲光纤激光器目前并未得到广泛应用,其主要问题在于稳定的(输出脉冲序列的每个脉冲都只有一个峰值)短脉冲(~ 100 ns)输出较难实现.为获得稳定的高重频(> 50 kHz)激光脉冲输出,光纤激光器的系统配置和工作条件必需经过细致的理论设计和实验摸索.国际上,近年已经有利用增益调制技术实现脉冲光纤激光输出的会议报道,R. Petkovšek 等通过建立理论模型得出增加泵浦功率,或缩短谐振腔腔长可以使输出激光脉冲变窄的结论,并以 915 nm 的 LD 作为泵浦源,获得重频 10 kHz、脉冲宽度 350 ns 的脉冲激光输出^[12],Yoav Sintov 等采用脉冲宽度 1.2 μ s、工作波长 975 nm 的 4×10 W 的 LD 作为泵浦源,获得重频 25 kHz、脉冲宽度 125 ns、平均功率接近 400 mW 的激光输出,经过两级放大,获得了平均功率 19.5 W 脉冲激光输出^[13],国内目前尚无相关的工作报道.

本文报道了作者近期利用增益调制技术研制全光纤化的脉冲光纤激光器的相关工作结果.通过实验探索,调整增益系数、增益光纤长度等,在 50 kHz 重频下,采用 20 W 的泵浦功率和 2.4 μ s 的泵浦脉冲宽度,获得了 1060 nm 波长脉冲宽度仅 100 ns、

平均功率 0.97 W 的稳定脉冲激光输出,单脉冲激光能量约为 20 μ J,在 100 kHz 重频下,采用 1.8 μ s 的泵浦脉冲宽度,获得平均功率为 1.6 W 的稳定脉冲激光输出.以此作为脉冲激光种子进行功率放大,获得了性能稳定的全光纤结构高功率脉冲激光输出,放大后单脉冲能量超过 200 μ J,激光放大器斜率效率达到 60%.

1 基于增益调制技术的脉冲光纤激光器

1.1 基于增益调制技术的脉冲光纤激光器系统架构

基于增益调制技术的脉冲光纤激光器的结构原理如图 1 所示,其中包含一个高反的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)(R_1 ,在 1060.2 nm 处反射率大于 99.5%,3 dB 线宽为 0.09 nm)、0.5 m 的 Yb 增益光纤(Coractive 公司生产的 DCF-YB-10/128-FA 双包层光纤)和一个低反射率的 FBG(R_2 ,在 1060.2 nm 处反射率 $\sim 50\%$,3 dB 带宽 0.1 nm),以及另一段长度 3.5 m 的 Yb 增益光纤.图中, R_1 、 R_2 和 0.5 m 的 Yb 光纤用于构成谐振腔, R_2 后端的 3.5 m 长度的 Yb 光纤则通过利用残余的脉冲泵浦光来进一步放大腔内产生的脉冲激光输出.所采用泵源为 Oclaro 公司生产的带有尾纤输出的 LD,输出激光中心波长为 975 nm,最大输出功率为 25 W,尾纤规格为 105/125 μ m,数值孔径(NA)为 0.22.脉冲调制的泵浦激光通过 $(2+1) \times 1$ 的多模光纤合束器耦合到谐振腔内.考虑到 Yb 光纤在 975 nm 处的吸收比在 915 nm 处大三倍^[14],在系统中选用 975 nm 的 LD 作为泵浦源有利于缩短所需增益光纤的长度,减小腔长,以获得较短的激光脉冲宽度.但是,由于石英光纤中 Yb 离子在 975 nm 波段的吸收谱很窄,其吸收随泵浦激光波长变化大,需要对 LD 进行严格的温度控制,以保证 Yb 光纤对泵浦光有较好的吸收.所用合束器的泵光输入端为 105/125 μ m 多模光纤,NA 为 0.22,与泵浦源的光纤相匹配;输出端为双包层光纤,其纤芯直径为 6 μ m,内包层直径为 125 μ m. Yb 增益光纤为 Coractive 公司生产的 10/128 μ m 掺 Yb 双包层光纤,在 975 nm 波段的吸收为 16 dB/m.由于使用的增益光纤较短,泵浦光利用率较低,有相当大部分的泵浦光从振荡激光器的 R_2 输出端漏出,因此,系统

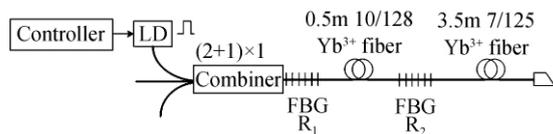


图 1 基于增益调制技术的脉冲光纤激光器的结构

Fig. 1 Setup of the gain-switched pulse fiber laser

中接入一段 3.5 m 长度的较低吸收系数的双包层 Yb 光纤用于放大,光纤纤芯和内包层直径分别为 7 μm 和 125 μm ,在 975 nm 处的吸收为 2.5 dB/m.

1.2 激光器种子源的实验结果与讨论

基于增益调制技术的光纤激光器的基本工作机制如下:在脉宽为 μs 量级的泵浦脉冲的作用下,增益光纤中激光上能级粒子数迅速上升.当上能级粒子数达到反转阈值时,开始产生明显的受激辐射.当腔内光子数积累到一定程度后,受激辐射迅速增长,上能级粒子数被大量消耗而迅速下降.当上能级粒子数降低至阈值时,腔内光子数达到最大值.此后,腔内光子继续消耗上能级粒子数,使之不断减少,直至辐射终止.若此时泵浦已经停止,剩余的上能级粒子将以自发辐射的形式弛豫到下能级.过长的泵浦脉冲将可能产生次级激光脉冲.

实验中使用带宽为 20 GHz 的超高速探测器和宽带示波器(DSA71254 数字示波器, Tektronix 公司,带宽 12.5 GHz)进行测量.当泵浦功率为 20 W 时,调节泵浦激光的脉冲重复频率和脉宽,测试了相应的光纤激光输出脉冲特性.在 50 kHz 和 100 kHz 的激光泵浦下探测到的振荡级输出激光脉冲图如图 2.图 2(a)和(b)为 50 kHz 重频,泵浦脉宽分别为 2.4 μs 和 2.7 μs 时振荡级输出的激光脉冲序列图,(c)和(d)为 100kHz 重频,泵浦脉宽分别为 1.8 μs 和 2.1 μs 时振荡级输出的激光脉冲序列图.从图中可以看出,输出激光的重复频率与泵浦光的重复频率相同;在 50 kHz 重频、泵浦脉宽 2.4 μs 时以及 100 kHz 重频下、泵浦脉宽 1.8 μs 时获得稳定的脉冲激光输出;在 50 kHz 重频、泵浦脉宽增加到 2.7 μs 时以及 100 kHz 重频下、泵浦脉宽增加到

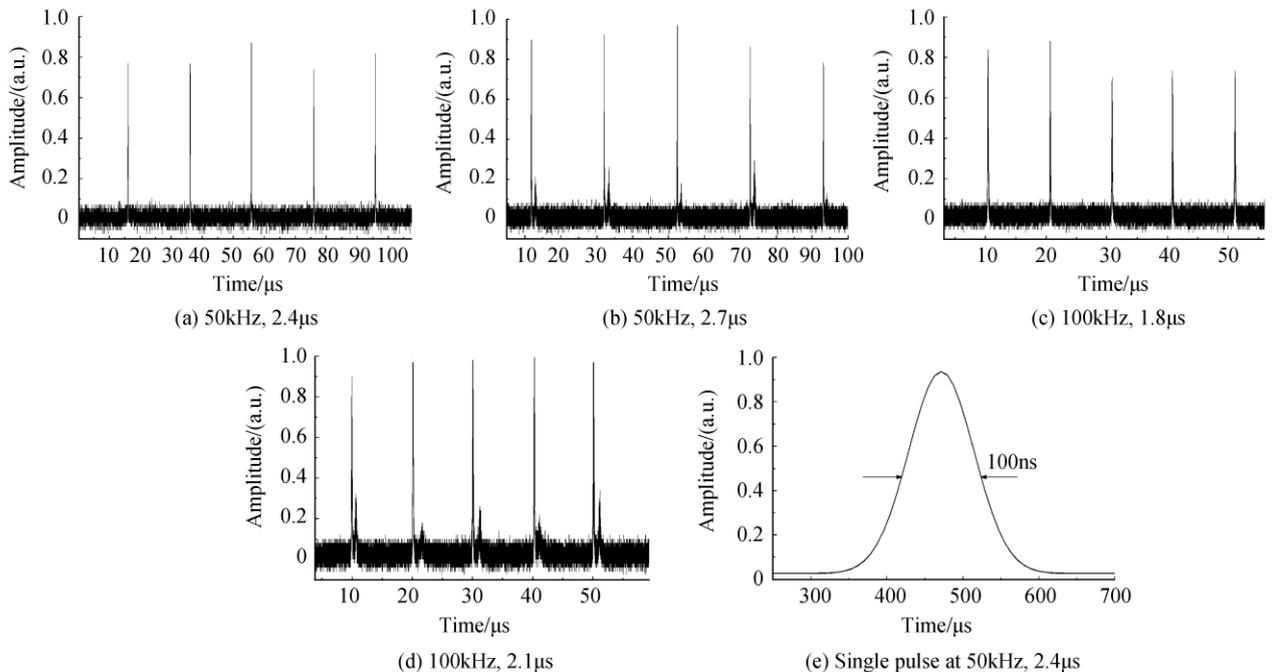


图 2 不同重复频率、不同宽度脉冲激光泵浦下输出激光脉冲图

Fig. 2 Output laser pulses pumped at different repetition rates and pulse duration

2.1 μs 时,振荡级输出的脉冲不再是单个脉冲,而是两个分裂的脉冲.这是因为在增大泵浦光的占空比时,泵浦激光能量较大,易产生次生脉冲输出.

图 2(e)为 50 kHz 重频、2.4 μs 泵浦脉宽下的振荡级输出激光单脉冲图,可以看出,输出激光的脉冲宽度约为 100 ns.通过实验可知,提高泵浦光的重复频率,输出激光的脉冲宽度会有所展宽,这是因为当重复频率变大时,相邻脉冲之间的时间间隔变短,积累的上能级粒子数减少,从而使激光的峰值功率变小,则输出激光的脉冲宽度变宽.

在重频 50 kHz、泵浦脉宽 2.4 μs 时(泵浦光单脉冲能量约 0.48 μJ ,平均功率约 3.1 W),光纤激光器输

出的激光平均功率为 970 mW,单脉冲能量接近 20 μJ ,光光转换效率约为 41%.在重频 100 kHz、泵浦脉宽 1.8 μs 时输出激光平均功率为 1.6 W.实验中可以发现,在相同的重复频率下,随泵浦光脉冲宽度的增加,激光器的输出激光平均功率变大;当泵浦光脉冲宽度相同时,输出激光功率随着重复频率的变大而增大.

从以上的实验现象可以看出,调节泵浦光重复频率和脉冲宽度时,输出激光的脉冲宽度会有所变化,且在一个固定的频率上,其泵浦光的占空比具有一个最佳值,使输出激光的脉冲宽度最窄.因此可通过调节泵浦光重复频率和脉冲宽度来改变输出激光

的脉冲宽度和峰值功率,使之满足各领域的应用。

使用 ANDO AQ6317C 光谱分析仪,在测试分辨率为 0.02 nm 时获得的激光光谱如图 3 所示,光谱比较平滑,中心位置为 1 060.20 nm,光谱 3 dB 线宽 $\lambda_{FWHM}=0.12$ nm,与所用 FBG 对的 3 dB 带宽相比有所展宽。

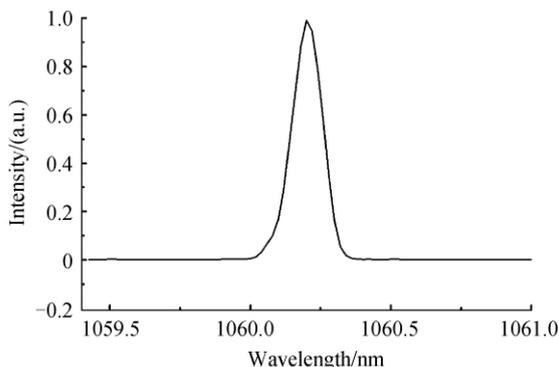


图 3 输出激光光谱图

Fig. 3 Laser spectrum of the pulsed output

2 光纤放大器的实验装置和实验结果

以上述的增益调制脉冲光纤激光器为种子,构建了一个 MOPA 结构的光纤激光放大系统,其结构如图 4 所示,种子源采用上述的增益调制脉冲光纤激光器,经过最高可承受功率为 2 W、插入损耗为 0.8 dB 的光隔离器 (ISO),并通过 $(2+1)\times 1$ 的多模光纤合束器耦合到增益光纤中,合束器的参量与图 1 中所用器件相一致,增益介质为 2.5 m 的 Coractive 公司生产的 15/128 μm 掺 Yb 双包层光纤,在 975 nm 处的吸收为 16 dB/m,在 915 nm 处的吸收为 4.5 dB/m. 泵浦源采用两个 JDSU 公司生产的带有尾纤输出的 LD,尾纤规格为 105/125 μm ,单管输出功率为 10 W,工作波长为 915 nm.

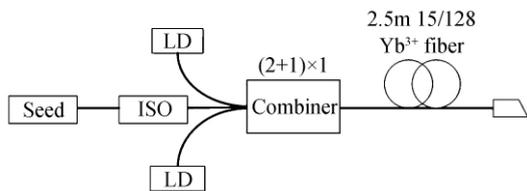


图 4 MOPA 结构的全光纤脉冲激光放大器实验装置图

Fig. 4 Setup of the MOPA structured all-fiberized pulsed laser amplifier

当种子激光的重频在 50 kHz、泵浦脉宽为 2.4 μs 时,逐渐增加放大级的泵浦功率,当泵浦功率为 17 W 时,输出端得到的激光平均功率为 10.1 W,单脉冲能量约为 200 μJ ,斜率效率约 60%。当种子激光的重频在 100 kHz、泵浦脉宽为 1.8 μs 时,经过放大级获得了平均功率 10.8 W 的脉冲激光输出,其斜率效率为 64%。结果如图 5。

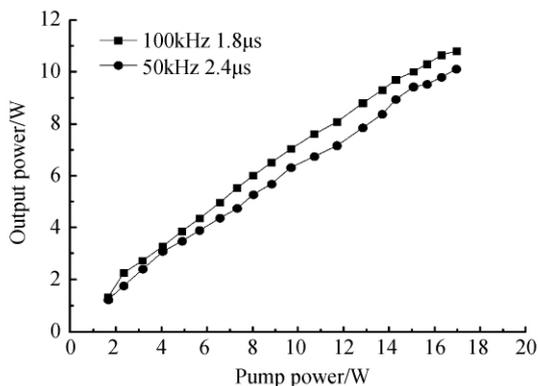


图 5 输出激光功率与激光放大器泵浦功率关系图

Fig. 5 Output power dependence on the pump power of fiber amplifier

3 结论

利用脉冲驱动的大功率 LD 作为泵源,采用双包层增益光纤和光纤光栅对构成的线性腔结构,研制了一个全光纤结构的基于增益调制技术的 Yb 脉冲光纤激光器,实现了波长在 1 060 nm、脉宽约 100 ns、重复频率在 50 Hz~100 kHz 之间可调的稳定激光脉冲输出. 在 50 kHz 和 100 kHz 重频下,所获得的输出激光平均功率分别为 970 mW 和 1.6 W. 以此作为脉冲激光种子,在 MOPA 系统中经放大,获得了单脉冲能量最高 200 μJ 、平均功率超过 10 W 的脉冲激光输出. 本文所报告的实验结果为更高功率的全光纤结构脉冲型激光器研制提供了一种新的技术途径。

参考文献

- [1] LIMPERT J, RÖSER F, SCHREIBER T. High-power ultrafast fiber laser system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(2): 233-244.
- [2] NING Ji-ping, ZHANG Wei-yi, SHANG Lian-ju, et al. All-fiber Q-switched ytterbium-doped double-clad laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(4): 483-487. 宁继平, 张伟毅, 尚连聚, 等. 掺镱包层光纤激光器的全光纤调 Q 技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 483-487.
- [3] GAO Cun-xiao, ZHAO Wei, Wang Yi-shan, et al. Actively Q-switched Yb³⁺-doped all fiber ring laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 651-654. 高存孝, 赵卫, 王屹山, 等. 掺 Yb³⁺ 全光纤环形腔主动调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 651-654.
- [4] WANG Y X, YANG D Z, JIANG P P, et al. Linearly polarized Q-switched pulse Yb fiber laser with average output power over 10W[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, **6**(6): 461-464.
- [5] ZHU Shao-lan, ZHAO Wei, LIU Bai-yu, et al. Cavity dumped laser using fast GaAs photoconductive switch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(5): 0502003. 朱少岚, 赵卫, 刘白玉, 等. 利用高速 GaAs 光电导开关实现腔倒空激光脉冲输出[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502003.
- [6] YANG Ling-zhen, CHEN Guo-fu, WANG Yi-shan, et al. Experimental study of ultra-short pulse Yb³⁺-doped fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 333-335. 杨玲珍, 陈国夫, 王屹山, 等. 超短脉冲掺 Yb³⁺ 光纤激光器实

- 验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 333-335.
- [7] ZHANG Pan-zheng, FAN Wei, WANG Xiao-chao, *et al.* Mode-locking and multi-wavelength operation from all-fiber ytterbium doped laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(3): 030200.
- 张攀政, 范薇, 汪小超, 等. 全光纤掺镱激光器实现锁模和多波长输出[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0302001.
- [8] TRAUB M, BOCK M, HOFFMANN H D, *et al.* Novel high peak current pulsed diode laser sources for direct material processing[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 64560J.
- [9] LV Hui, YU Yong-lin, SHU Tan, *et al.* Photonic generation of ultra-wideband signals by direct current modulation on SOA section of an SOA-integrated SGDBR laser [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(7): 7219-7227.
- [10] JIANG P P, YANG D Z, WANG Y X, *et al.* All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, **6**(5): 384-387.
- [11] 张国威. 可调谐激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 273-274.
- [12] PETKOVŠEK R, AGREŽ V, BAMMER F. Gain-switching of a fiber laser: experiment and a simple theoretical model [C]. *SPIE*, 2010, **7721**: 77210L.
- [13] SINTOV Y, KATZ M, BLAU P, *et al.* A frequency doubled gain switched Yb³⁺ doped fiber laser [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719529.
- [14] NILSSON J, CLARKSON W A, SELVAS R, *et al.* High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2004, **10**(1): 5-30.

• 下期预告 •

基于局部峰值的红外弱小目标快速检测

薛松^{1,2}, 韩广良¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对红外图像的小目标检测问题,提出了一种基于局部尖峰特性的检测方法.首先分析红外小目标的局部灰度特性,提出了一种红外目标的峰值特性判据;然后依据目标的峰值特性判据和时域特性,设计了一种目标检测的快速算法,算法先基于子块预选出局部极大值点,把后续运算限于各极大值点处以减少运算量,再根据极大值点值在各方向上的灰度下降判断其尖峰特性;最后利用帧间的连续性滤去噪音引起的伪目标.实验表明本文的算法具有很快的处理速度,且能有效滤去图像中的随机噪音.

关键词:小目标检测; 红外图像; 局部梯度; 帧间连续性