

·激光技术·

一种激光脉冲相关检测的改进方法

韦卫东, 孙晓泉, 孙晓军

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:在激光脉冲相关检测系统中,针对窄带滤光片的非理想性以及并联探测单元之间的背景光干扰存在相关性的问题,提出了一种相关检测系统的改进方法。利用两路探测单元同时接收目标信号和背景光的混合信号,另两路视场完全相同的探测单元仅接收背景光,将它们的输出分别对应相减后再进行相关处理,从而抑制了各单元间相关的背景光干扰。采用Simulink软件进行了仿真。仿真结果表明:改进后的系统对工作波长之外的入射光具有明显的抑制作用,能够有效降低由背景光干扰而引起的虚警,从而证明了该方法的可行性和有效性。

关键词:相关检测;背景光干扰;激光脉冲

中图分类号:TN29

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)03-0004-06

Improvement Method in Laser Pulse Correlation Detection

WEI Wei-dong, SUN Xiao-quan, SUN Xiao-jun

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: For the problem that laser pulse correlation detector faces challenges of both imperfect narrow-band filter and dependency of background light interference received by parallel detectors, an improved method is proposed. Two of four parallel detectors are used for receiving target signal and background light, while the other two receive background light only. The correlation background light interference is restrained through subtracting background light from the mixed signal before correlation processing. Simulation results demonstrate that the light out of working spectrum is remarkably resisted, and false-alarm probability caused by background light interference is lower effectively, which prove the method is feasible and effective.

Key words: correlation detection; background light interference; laser pulse

在自然和人类活动造成的复杂光电环境中,如太阳光及反射光,工业生产过程中的电焊、高压汞灯、钠灯等各种弧光放电光源的存在,会影响光电探测的灵敏度,增加探测器的虚警。常见的做法是在探测器的光学窗口前端加装窄带滤光片^[1,2],此外应用相关检测技术^[3,4]也能在一定程度上改善输出信噪比,提高探测灵敏度,降低探测器的虚警。

文献[5-6]针对不同应用需求,设计出了窄带滤光片,实验分析了其性能参数与技术指标。从结果来看,虽然窄带滤光片的光谱通带比较窄,但是其

通带外的光谱透过率并非理想化,其对背景光的抑制能力有限。文献[7-8]分别从理论分析和工程实践的角度,证明了相关检测能够有效抑制各单元之间不相关的电路噪声,改善输出信噪比,降低虚警,实现对微弱激光甚至离轴散射激光^[9]脉冲信号的检测。但是,对于相同视场内同时被各个单元响应,相互之间具有时间相关性的背景光干扰而言,直接作相关处理无法对其实现有效的抑制。因此,从改进相关检测系统结构设计角度出发,设法将背景光干扰抑制,进一步降低虚警,提高激光脉冲相关

收稿日期:2011-04-20

基金项目:重点实验室基金(10J1003)

作者简介:韦卫东(1983-),男,江苏姜堰人,硕士,助理工程师,主要从事光电技术方面的研究;导师简介:孙晓泉(1962-),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,主要从事光电技术方面的研究。

检测系统对微弱信号检测的能力,不仅具有一定的理论研究价值,而且对工程实践具有重要的指导意义。

1 设计思路

1.1 背景光干扰的相关性及其影响分析

在某些光电环境下,探测器接收到的背景光十分复杂,不仅有由背景辐射出的光子无规则到达探测器所产生的背景光噪声,还有各种工业生产活动等引起的强瞬时背景光干扰。其中,背景光噪声的频谱是与频率无关的,通常可以看作是白噪声,决定了光电探测系统的探测极限^[3]。而相同视场内的瞬时背景光干扰则在时间上具有相关性。

实际应用中,目标信号光与背景光同时经窄带滤光片后进入光电探测器,被探测器响应并送后续处理。然而,窄带滤光片对其工作中心波长以外的光并非完全滤除,而是仍然具有一定的透过率^[5],使得一部分背景光干扰仍能够通过光学前端进入光电探测器。当目标信号相对背景光干扰较弱时,这种非理想性对探测器的影响将会凸显出来,影响探测器的探测灵敏度。而且,在二元相关检测系统中,同时进入两路视场相同的并联探测器单元的强背景光干扰之间在时间上具有相关性,若直接作相关处理,会造成这种背景光干扰相关增强,而产生虚警,大大限制了系统的探测能力的进一步提高。

针对这一问题,可采用文献[10]的方法,即调节两路信号之间的延迟时间 τ ,使两路信号不同时进入相关处理器,以削弱这种相关性带来的影响。但是,实际应用中的目标激光脉冲宽度常常不可预知。如何恰当地选择延迟时间是难点。延迟时间过长,会造成窄脉冲目标信号的峰值交错,造成输出信噪比下降,无法检出目标信号;延迟时间过短,则不足以克服两路背景光干扰之间的相关性带来的影响。

1.2 相关检测系统的方案改进

为了削弱多路背景光干扰之间的相关性对相关处理效果的影响,该方案在原有的多元相关检测系统^[11](如图1)的基础上,在相关处理器之前增加了两路专门用于接收背景光的探测单元和实现背景光干扰抑制的减法器,并对光学前端的设计做出

了相应的改进,提出了一种改进相关检测系统的新方法,如图2。

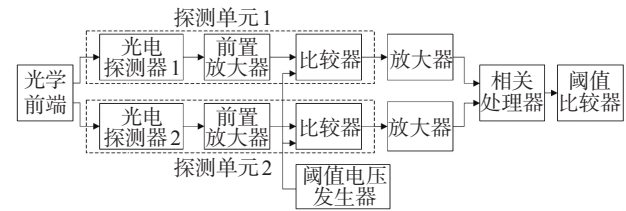


图1 多元相关检测系统框图

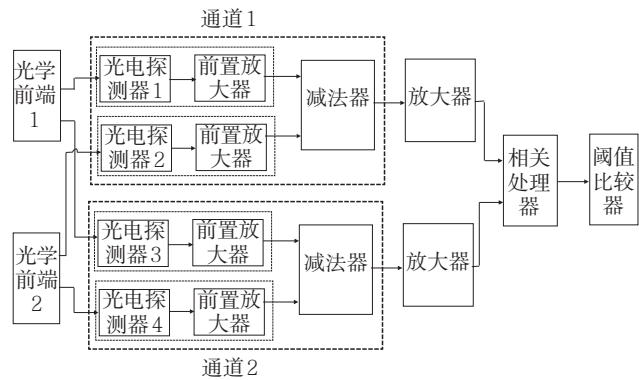


图2 改进后的多元相关检测系统框图

在图2所示的多元相关检测改进系统中,光电探测器1是用来接收目标信号的,其中不可避免的含有背景光。光电探测器2则是专门用来接收背景光的。将两路信号经过前置放大后同时送入模拟减法器,就能将具有相关性的背景光干扰减去,即在将信号进行相关处理之前,进一步提高了单个探测单元的输出信噪比。

1.3 光学前端设计

为了保证在作两路信号相减时工作波长处的目标信号不会被大幅度地减弱,光学前端也需要做相应地改进。光学前端1需要加装窄带滤光片,使得探测器1和探测器3接收到的是包含目标信号与背景光的混合信号。假设系统的工作中心波长为550 nm,窄带滤光片的光谱透过率曲线如图3a所示。

光学前端2除了要加装工作中心波长也是550 nm的窄带滤光片外,还要在这块窄带滤光片上镀上对工作中心波长550 nm全反射的薄膜,设全反射膜的光谱透过率曲线为图3b中虚线部分,则光学前端2的等效光谱透过率曲线为图3b中实线部分。在理想情况下,探测器2和探测器4接收到的光信号将是只有波长550 nm之外的背景光。在将光学

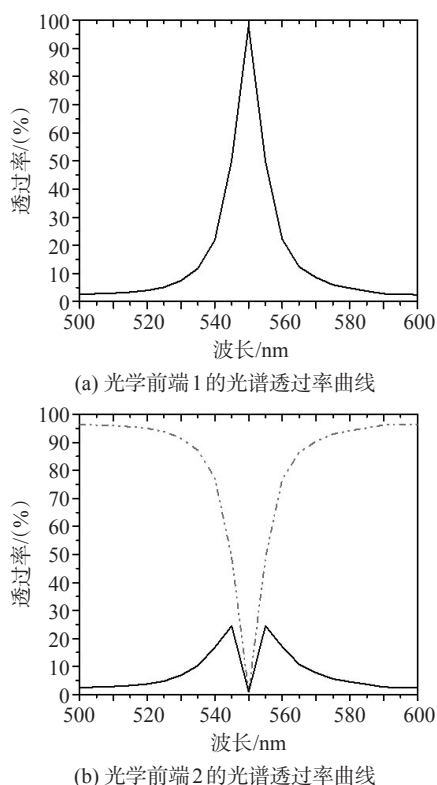


图3 改进后的2个光学前端光谱透过率曲线

前端1和光学前端2接收到的光信号都转换为电信号并进行减法运算后,此时的输出信号中将只有探测器对波长550 nm的光信号的响应信号,背景光干扰分量则被抑制了。

2 仿真与结果分析

2.1 仿真设计与模型建立

为了验证该方案的可行性和有效性,采用Matlab7.0内嵌的Simulink仿真模块对该方案的系统模型进行仿真分析,并与未经改进的二元相关检测系统的仿真结果进行对比。仿真包括两部分:一是利用Simulink软件搭建系统的各组成部分,通过观察各组成部分的仿真输出波形来定性分析该改进方案的可行性;二是在搭建好的仿真系统基础上,通过合理的假设与数值的计算,定量地考察该改进方案对背景光干扰的抑制能力。

在系统仿真模型的搭建中,采用Simulink模块中的脉冲信号发生器(pulse generator)来模拟探测单元接收、转换并经过前置放大后的目标信号脉冲和背景光干扰脉冲;采用高斯白噪声发生器(Gaussian noise generator)来分别模拟探测单元的本底噪声和后续处理电路中元器件的噪声。为了更好地说明问题,系统中的放大器(电压增益 $A_v = 10$)和减法器均等效为其相应的功能电路、高斯白噪声发生器和模拟滤波器的组合。与输入的背景光噪声一样,各个探测单元之间和分立元器件之间的电路噪声均可以视为白噪声,而且可以认为是互不相关的。此外,仿真中还将减法器的噪声考虑在内,以

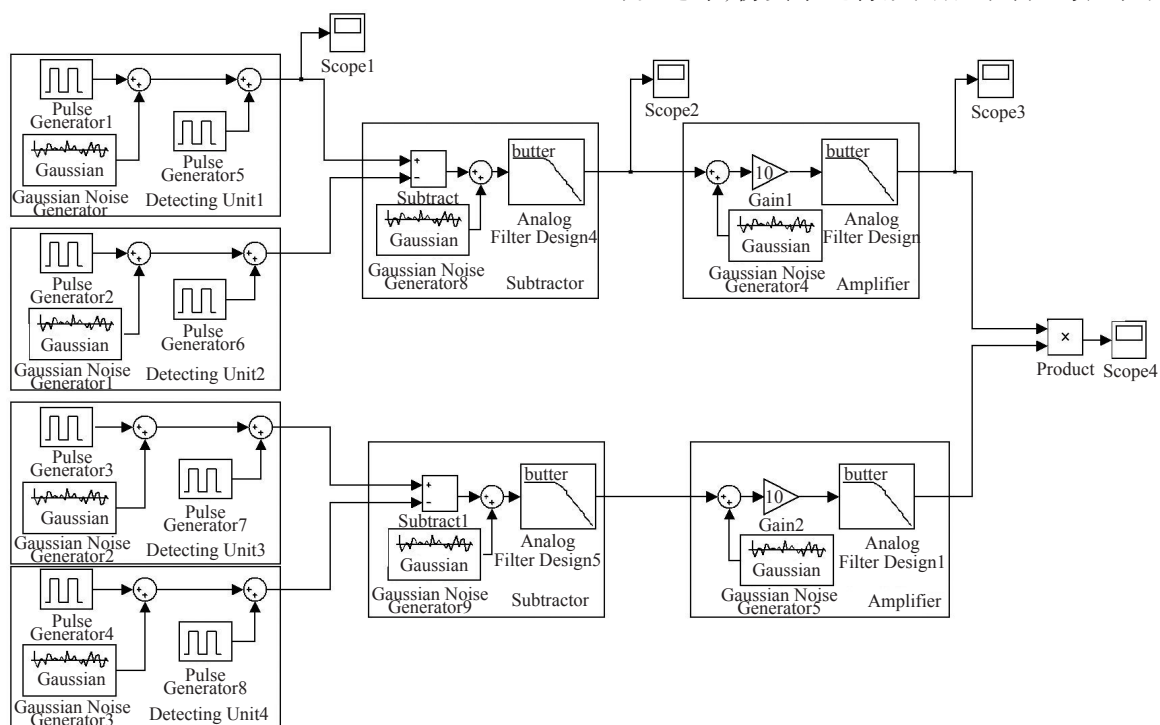


图4 改进后的激光脉冲相关检测系统

更好地研究新元器件噪声的引入对整个相关检测系统性能的影响。Simulink 仿真中,整个改进后的相关检测系统结构如图4所示。

在仿真的第二部分,为了定量地考察该改进方案对背景光干扰的抑制能力,需要对进入探测器的背景光作一些合理的假设,并根据典型参数进行仿真数值的计算。假设系统2个光学前端的光谱透过率曲线分别如图3a和图3b所示,入射背景光在500~600 nm 光谱范围内具有相同的光谱功率密度 P_0 。

设光学前端1的透过率为 $\tau_1(\lambda)$,光学前端2的透过率为 $\tau_2(\lambda)$;光电二极管的光谱响应度为 $R_e(\lambda)$;光电二极管光敏面直径为 D ;负载电阻为 R_L ;探测单元前置放大电路电压增益为 G 。为了简化计算,假设光电二极管的光谱响应度 $R_e(\lambda)$ 与入射光波长 λ 无关,即 $R_e(\lambda)=R_e$,其中 R_e 为常数。此时,背景光中的中心波长为 λ_0 ,光谱宽度为 $\Delta\lambda$ 的光谱分量被探测单元1和2同时响应,则探测单元1和2对该光谱分量的响应输出电压分别为

$$V_{S1} = G \cdot P_0 \cdot \Delta\lambda \cdot \pi(D/2)^2 \cdot \tau_1(\lambda_0) \cdot R_e \cdot R_L \quad (1)$$

$$V_{S2} = G \cdot P_0 \cdot \Delta\lambda \cdot \pi(D/2)^2 \cdot \tau_2(\lambda_0) \cdot R_e \cdot R_L \quad (2)$$

由于探测单元1和3共用光学前端1,而探测单元2和4共用光学前端2,所以探测单元3和4的输出电压也可分别用式(1)和式(2)表示。取 $P_0 = 0.2 \text{ W/cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ 、 $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ 、 $R_e = 0.5 \text{ A/W}$ 、 $D = 1 \text{ mm}$ 、 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $G = 100$,分别带入式(1)和式(2),并在输入背景光干扰中各光谱分量下进行计算,分别得到探测单元1、3对背景光干扰的光谱响应曲线(图5中虚

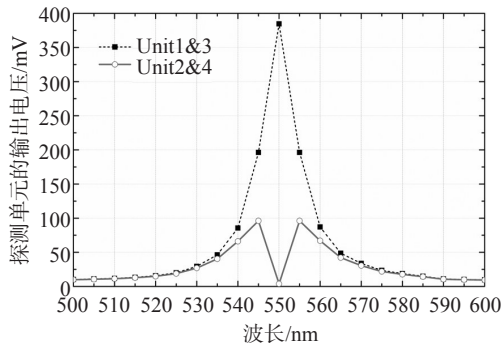


图5 改进后系统各探测单元的光谱响应

线部分),和探测单元2、4对背景光干扰的光谱响应曲线(图5中实线部分)。仿真的第二部分将以这些数据来模拟输入背景光干扰中各光谱分量大小,以

对改进方案的有效性进行定量的考察。

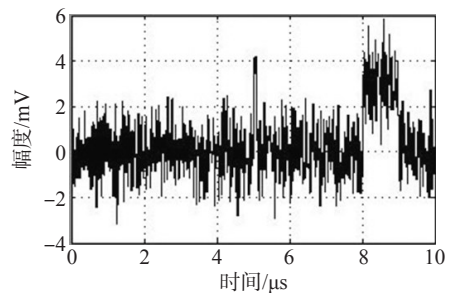
2.2 Simulink 仿真与结果

仿真的第一部分,进行了强背景光干扰与目标信号同时存在时的激光脉冲相关检测仿真。主要仿真模块的参数设置相对值如表1所示。

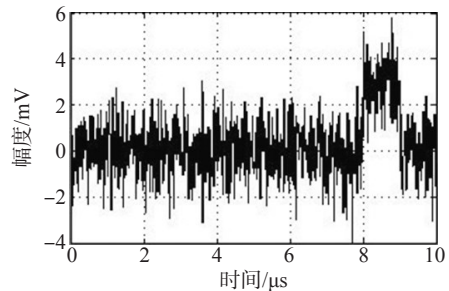
表1 Simulink 仿真中的主要模块参数设置

参数	目标信号(单元1和3)	目标信号(单元2和4)	背景光干扰(单元1和3)	背景光干扰(单元2和4)	参数	噪声	参数	滤波器
幅度/mV	3.85	0.0385	3	2.97	均值	0	设计方法	Butterworth
周期/ μs	10	10	20	20	方差	1	滤波器类型	Lowpass
占空比	1%	1%	5%	5%	初始种子数	>30	滤波器阶数	3
相位延迟/ μs	5	5	8	8	采样时间/ μs	0.01	边界频率	63 rads/sec

通过仿真波形可以看到,探测单元1输出的是目标信号脉冲加背景光干扰脉冲的混合信号,如图6a。探测单元2的输出信号,如图6b则仅有背景光干扰脉冲。将它们同时送入相减器去除背景光干扰脉冲并放大后,得到了信号图6c,最后再与另外一路也减去了背景光干扰脉冲并放大的输出信号进行相关处理,即可得到不含背景光干扰脉冲的信号图6e,目标信号脉冲能够被正确检出。但若仅仅将未经抑制背景光干扰脉冲的信号图6d放大后,直



(a) 信号与背景光干扰同时存在



(b) 仅有背景光干扰

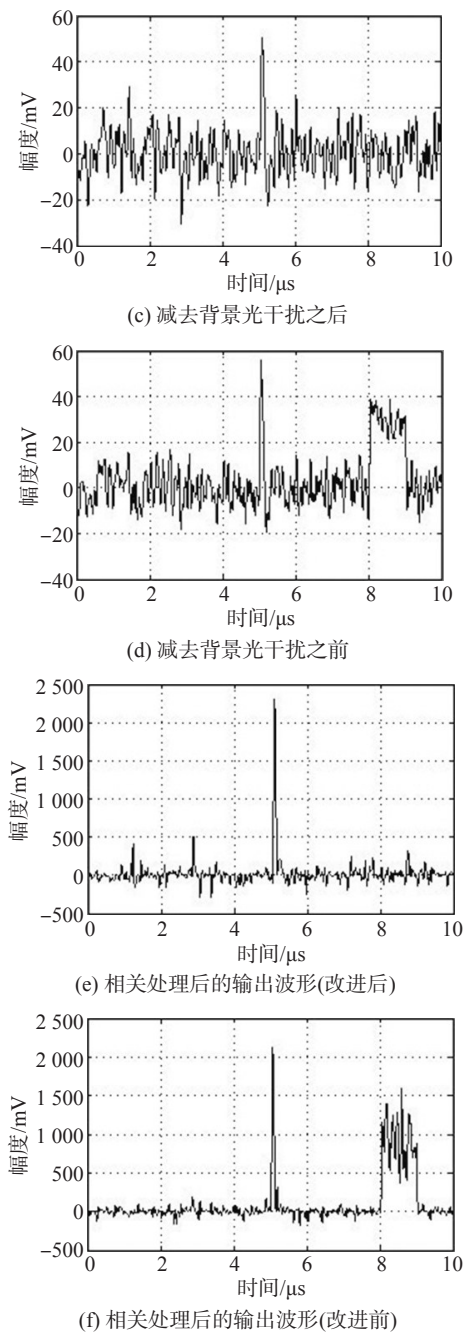


图6 Simulink 仿真输出波形

接进行相关处理,将会使背景光干扰脉冲相关增强,得到既有目标信号脉冲,又有背景光干扰脉冲的输出信号图 6f。可以预见,当没有目标信号时,这种强背景光干扰的存在,会造成相关检测电路的虚警。

仿真的第二部分,首先移除了模拟目标脉冲的信号发生器模块。此时,假设入射光是宽光谱背景光干扰中的一个中心波长为 λ_0 、光谱宽度为 $\Delta\lambda$ 的分量。然后,根据图 5 中该分量所对应的各探测单元

的输出电压幅值分别对各个脉冲信号发生器的幅度参数进行赋值,再对相关输出后的该分量的幅值和电路本底噪声的幅值进行测量,计算出输出信噪比,并记录。信噪比计算的具体方法是:读取目标信号加噪声的峰峰值 v_p 和噪声的峰峰值 v_n ,取二者之差 $v_p - v_n$ 作为目标信号的幅值 v_s ,再根据 $SNR = 20 \cdot \log(v_s/v_n)$ 计算出信噪比。最后,再根据图 5 中其他分量所对应的数值计算结果,逐次改变各个脉冲信号发生器的幅度参数设置,重复上述步骤,就得到如图 7 所示的改进前后的背景光干扰中各光谱分量输出信噪比的对比。

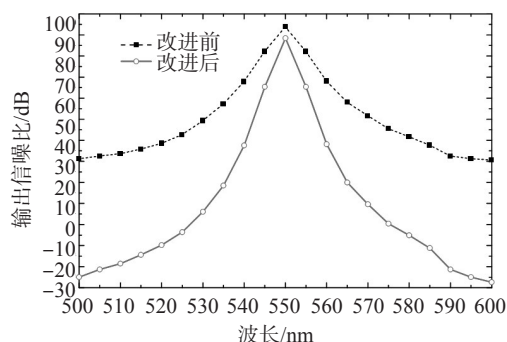


图7 背景光干扰中各光谱分量的输出信噪比

2.3 结果分析与结论

从仿真输出波形来看,当各探测单元同时对强背景光干扰和目标信号响应时,仅作简单的二元相关处理不仅不能削弱强背景光干扰的影响,反而会使强背景光干扰脉冲相关增强,产生虚警,甚至淹没目标信号。而改进后的相关检测系统能够抑制背景光干扰,减少由强瞬时背景光干扰而引起的虚警。

实际的背景光干扰入射时,它的总功率密度是在整个背景光干扰的光谱范围内对其光谱功率密度进行积分。直观上来看,背景光干扰的总功率密度与积分区域面积大小有关。积分区域面积越大,背景光干扰的总功率密度越大;反之则越小。因此,由图 7 可见,与改进前相比(图 7 虚线部分),改进后的系统对输出信号中的背景光干扰的总功率密度有较好的抑制作用。这表明,改进后的系统对工作中心波长外的入射光信号具有明显的抑制作用。换言之,对系统电路结构和光学前端的改进可以等效为压缩了整个系统的光谱透过率曲线的通带宽度,最大限度地保留了工作波长处的目标激光脉冲信号能量,进而起到抑制整个光谱范围内的背

景光干扰的作用,达到降低虚警率的目的。

此外,一方面由于系统结构的改进增加了器件,引入了新噪声;另一方面由于光学前端2上镀的全反射膜也并非理想,在作不同探测单元输出信号相减处理时,会造成目标脉冲信号幅值的减小。这两方面都会在一定程度上影响改进后系统的输出信噪比。但从仿真结果上看,这种影响对于工作波长处的目标信号是比较有限的,而对于工作波长之外的光信号影响则更为明显。这恰好达到了抑制整个光谱范围内的背景光干扰、进一步降低虚警率的目的,实现了改进方案的设计初衷。

3 结束语

通过在相关处理器之前增加背景光干扰抑制单元,以及改进系统的光学前端,并对改进后的系统合理建立仿真模型,运用 Simulink 仿真模块进行了仿真。仿真结果表明,该改进后的系统对工作波长之外的人射光信号具有明显的抑制作用,能够有效抑制由强背景光干扰而引起的虚警。本改进方案与仿真结果将为下一步硬件电路的设计实现提供理论依据和方法指导。

该设计还可以用于高灵敏度的双波长激光相关检测系统的实现。此时,光学前端1和光学前端2需分别加装针对不同工作波长的窄带滤光片,使得当其中一个工作波长的目标信号出现时,只有对应的两路探测器能够响应目标信号,而另外两路探测

器的输出则仅作为背景光,经过背景光干扰抑制处理后,再进行相关处理,以抑制背景光干扰造成的虚警。

参考文献

- [1] 李贤,徐铭,邓兴成.高背景光噪声条件下的信号接收技术[J].电子科技大学学报,1998,27(5):506-509.
- [2] 吴新宇,陈拥军,张华达,等.大视场激光探测与告警技术[J].光电工程,2004,31(7):5-7.
- [3] 孙晓泉.激光对抗教程[M].北京:解放军出版社,2007.
- [4] 夏桂芬,赵保军,韩月秋.三脉冲激光雷达的目标检测[J].光电工程,2006,33(3):137-140.
- [5] 姚李英,金永浩,邵建达,等.超宽超窄矩形带通滤光片的设计[J].光学仪器,2001,23(5/6):19-22.
- [6] 范卫星,赵战刚,王平秋,等.大口径1064 nm窄带滤光片的研制[J].激光技术,2006,30(3):320-322.
- [7] 张建新,冯小荣,刘波,等.相关探测扩大激光告警警戒范围分析[J].光电技术应用,2006,21(2):18-20.
- [8] 肖洪梅,苏心智,陈长庚,等.微弱激光脉冲信号的相关检测实验[J].激光技术,2004,28(3):234-236.
- [9] Jean-Pierre CARIOU. Off-axis detection of pulsed laser beams: simulation and measurements in the lower atmosphere [J]. Proceedings of SPIE (S0277-786X), 2003, 5086:507-509.
- [10] 肖洪梅,吴健,陈长庚,等.微弱激光脉冲信号的相关检测[J].光学与光电技术,2004,2(1):61-64.
- [11] 刘瀚,黄涛,程玉宝.多元相关探测的改进与分析[J].光电技术应用,2005,20(1):14-16.

(上接第3页)

例中,采样点数目为535×199,计算耗时仅为190 s。

3 结论

以基于亥姆霍兹方程的光场传输有限差分计算方法为基础,建立了针对有源非稳腔的模式计算模型。

分别在空腔条件下和非均匀横流增益条件下进行了非稳腔模式的数值模拟。计算结果表明,这种基于亥姆霍兹方程的有限差分方法计算效率较高,适用于大菲涅耳数有源非稳腔的模式计算。

参考文献

- [1] W L Hendricks, J Thorenes. Mode Calculations in Chem-

ical Lasers with Unstable Resonators and a Flowing Participating Gain Medium[R]. AIAA 16TH AEROSPACE SCIENCES MEETING, 1978.

- [2] 刘文广,陆启生,刘泽金.光束变换环形孔径有源激光谐振腔模式的数值模拟[J].光学学报,2004,24(10):1339-1343.
- [3] 刘泽金.高能化学激光器非稳腔设计研究[D].长沙:国防科技大学,1997.
- [4] 杜燕怡.用薄层法模拟有源共焦非稳腔[J].强激光与粒子束,2000,23(3):301-305.
- [5] D B Rensch. Three-Dimensional Unstable Resonator Calculations with Laser Medium[J]. APPLIED OPTICS, 1974,13(11):2546-2561.