

参与性介质中脉冲激光回波信号的角度特性

张旭升 郭亮 刘春龙 陈立恒

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为了进一步提高主动探测系统的回波信噪比和时空分辨率,采用蒙特卡罗法建立了参与性介质中超短脉冲激光的双程瞬态辐射传输模型。基于该模型,分析了各向同性散射介质中介质物性参数和目标反射特性对高斯脉冲激光回波信号角度特性的影响。研究表明,光学厚介质中,目标回波信号的入射天顶角已达到稳定状态,峰值角度区间为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,能量集中范围为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$,且其时间展宽特性与所处角度区间无关;光谱衰减系数对回波信号的能量衰减和脉冲宽度均存在强烈影响,散射反照率则着重体现在后期回波信号的能量衰减上;镜反射引起的高强度前期回波信号减弱,镜-漫反射间目标回波信号的绝对差值极其微小,呈现弱关联性。可为选通摄像机的设计选型及脉冲激光器的波长选取提供参考借鉴。

关键词 激光光学; 脉冲激光; 回波信号; 角度特性; 蒙特卡罗法; 瞬态辐射传输

中图分类号 TN249; TJ430.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202010

Angular Characteristics of Pulse Laser Echo Signal in Participating Medium

Zhang Xusheng Guo Liang Liu Chunlong Chen Liheng

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract To improve the echo signal-to-noise ratio and temporal-spatial resolution of active detection systems further, the two-way transient radiative transfer model of ultrashort pulse laser in participating medium is established using Monte Carlo method. Based on the model above, the influence of medium properties and target reflective characteristic on the angular characteristic of Gaussian pulse laser echo signal in isotropic scattering medium is analyzed. Research shows that the incident zenith angles of target echo signal have reached its steady state in optically thick medium, with the peak angle interval of $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ and the energy concentration range of $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, but the temporal broadening characteristic is irrelevant to angle intervals; the spectral attenuation coefficient affects the energy attenuation and pulse width of echo signal strongly, but the scattering albedo embodies in the energy attenuation of post-echo signal mainly; high intensity pre-echo signal caused by specular reflection weakens, and the absolute difference of target echo signal is extremely small between specular reflection and diffuse reflection, with weaker relevance. The reference for gated-camera design selection and pulsed laser wavelength is provided.

Key words laser optics; pulse laser; echo signal; angular characteristic; Monte Carlo method; transient radiative transfer

OCIS codes 140.3538; 030.5620; 040.1880; 290.7050

1 引言

20世纪80年代后,超短脉冲激光技术得到快速稳定的发展与应用。截至目前,单脉冲激光最小时间尺度和最大瞬时功率已分别达到飞秒(10^{-15} s)和太瓦(10^{12} W)量级,这也进一步推进了超短脉冲激光在工业、医

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体(51121004)

作者简介: 张旭升(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事红外热辐射传输、航天器热控技术等方面的研究。

E-mail: zxs1933@126.com

疗、军事等领域的应用,如:目标探测识别^[1-4]、微纳材料切割^[5-6]、医疗诊断成像^[7-9]、定向能武器^[10-12]等。在上述各应用领域中,大功率短脉冲激光以信息载体或能量载体的形式出现,且均需与弥散大气、金属材料和皮肤组织等参与性介质作用后才能被接收利用。因此,研究参与性介质中超短脉冲激光的瞬态辐射传输特性成为国内外学者关注的焦点,具有重要的理论价值和广阔的应用前景。

Liu等^[13-14]采用时间平移叠加原理研究了半透明介质内方波脉冲激光序列的透反特性。周亚民等^[15]采用蒙特卡罗法(MCM)研究了探测系统参数和传输介质物性对脉冲激光时间展宽特性的影响。吴振森等^[16]研究了沙尘暴多重散射效应对斜程激光能量衰减特性的影响。杜永成等^[17]采用MCM研究了人工细水雾对1.06 μm和10.6 μm制导波段激光的能量衰减特性。沈娜等^[18]基于米氏散射理论建立了水雾对0.532 μm激光的能量衰减模型,其透射能量计算误差不大于4%。严卫等^[19]利用中光谱分辨率大气辐射传输模式数据研究了不同谱段激光的大气传输特性和回波光谱分布。Bhowmik等^[9]采用离散坐标法研究了皮秒级脉冲激光在正常皮肤和损伤皮肤中的瞬态辐射传输特性,对比了携带介质物性信息的透反信号的特征与差异。Muthukumaran等^[20]采用有限体积法研究了脉冲激光时间尺度对透反信号时域波形及峰值的影响。

不难发现,上述文献的研究重点均集中在单程或双程瞬态辐射传输中脉冲激光的能量衰减特性或时间展宽特性上,并未对主动探测中激光回波信号的角度特性进行相关研究。实际上,并非所有到达接收器表面的回波能量均能用于成像,除了与探测器灵敏度有关外,还取决于入射光线天顶角与接收器视场半角的大小。鉴于此,本文采用计算辐射学中的基准数值算法—MCM建立超短脉冲激光的双程瞬态辐射传输模型,着重分析介质物性参数和目标反射特性对脉冲激光回波信号角度特性的影响。

2 物理模型

脉冲激光垂直入射到参与性介质界面,经过介质吸收散射后到达目标表面,剩余激光能量再经过目标反射和介质吸收散射等过程返回到接收器表面,整个脉冲激光双程瞬态辐射传输过程如图1所示。其中,A₁表示与目标表面作用后被接收的目标回波信号;A₂表示与目标表面作用后被介质吸收的目标回波信号;B₁表示未与目标表面作用但被接收的散射回波信号;B₂表示未与目标表面作用被介质吸收的散射回波信号。

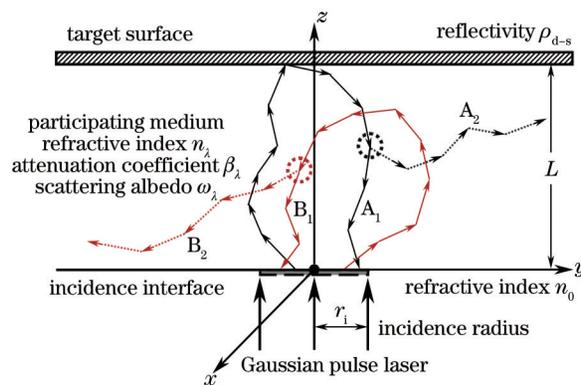


图1 脉冲激光双程瞬态辐射传输过程

Fig.1 Two-way transient radiative transfer process of pulse laser

由于超短脉冲激光的辐射强度随时间变化较大,可与介质辐射传播速度相比较,且远大于参与性介质的本身发射^[21]。因此,超短脉冲激光的瞬态辐射传输方程为

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\lambda(s, s, t)}{\partial t} + \frac{\partial I_\lambda(s, s, t)}{\partial s} = -\beta_\lambda(s) I_\lambda(s, s, t) + \frac{\sigma_{s\lambda}(s)}{4\pi} \int_{\Omega_i=4\pi} I_\lambda(s, s_i, t) \Phi_\lambda(s_i, s) d\Omega_i, \quad (1)$$

式中 $I_\lambda(s, s, t)$ 为 t 时刻 s 位置 s 方向上的光谱辐射强度,单位为 $W/(m^3 \cdot sr)$; c 为介质内辐射传播速度,单位为 m/s ; $\beta_\lambda(s)$ 为 s 位置处的光谱衰减系数,单位为 m^{-1} ; $\sigma_{s\lambda}(s)$ 为 s 位置处的光谱散射系数,单位为 m^{-1} ; $\Phi_\lambda(s_i, s)$ 为光谱散射相函数。

实际应用中,大多数脉冲激光器的发射信号在时间和空间上均呈现正态分布,即高斯脉冲激光(GPL)。在由入射界面构成的直角坐标系中,GPL在某点的时域光谱辐射强度计算式为

$$I_{\lambda}(x, y, z = 0, t) = I_0 \exp\left[-4 \ln 2 \times \left(\frac{t - t_c}{t_p}\right)^2\right] \times \exp\left(-\frac{r^2}{\nu^2}\right), \quad (2)$$

式中 I_0 为时域峰值光谱辐射强度, 单位为 $W/(m^3 \cdot sr)$; t_c 为时域峰值处时间坐标, 单位为 s ; t_p 为半峰脉冲宽度, 单位为 s ; $r^2 = x^2 + y^2$ (入射点与坐标原点的距离平方); ν 为空间方差变量。在不考虑介质发射的辐射传输系统中, 可将杜哈梅尔叠加定理应用到 MCM 中, 在回避随机光线发射时刻的同时, 提高了算法的计算效率和适应性^[13,22]。对于任意时域形状的脉冲激光 $f(t)$, 可将其等分为 N 个时间步长为 Δt 的微小方波脉冲, 脉冲激光 $f(t)$ 的解 $\Theta(r, t)$ 可描述为

$$\Theta(r, t) = \sum_{n=1}^N f\left(\frac{2n-1}{2}\Delta t\right) \times \{\theta[r, t - (n-1)\Delta t] - \theta[r, t - n\Delta t]\}, \quad (3)$$

式中 $\theta(r, t)$ 为任一边界上单位阶跃脉冲的解, 可表示回波信号比、表面热流密度等。

3 分析与讨论

高斯脉冲激光入射半径 $r_i = 15 \text{ mm}$, 与空间方差变量 ν 相等, 半峰脉冲宽度 $t_p = 10 \text{ ns}$, 发射时间范围 $0 \sim 5 t_p$, 时域峰值坐标 $t_c = 2.5 t_p$ 。入射界面两侧介质折射率 $n_0 = n_{\lambda} = 1.0$, 介质厚度 $L = 1.0 \text{ m}$, 各向同性散射, 光谱衰减系数 $\beta_{\lambda} = 5.0 \text{ m}^{-1}$, 散射反照率 $\omega_{\lambda} = 1.0$, 目标表面遵循菲涅耳反射定律, 反射率 $\rho_s = 1.0$ 。定义某角度区间的回波信号比(ESR)为探测表面在该角度区间接收的所有回波信号功率与高斯脉冲时域峰值功率的比值, 表达式如下:

$$f_{\text{ESR}}(t, \Delta\alpha) = \frac{P_{\text{All}}(A_i, t, \Delta\alpha)}{P_L(\pi r_i^2, t = t_c)}, \quad (4)$$

式中 P_{All} 为 t 时刻 A_i 探测面积在 $\Delta\alpha$ 角度区间内接收的所有回波信号功率, 单位为 W ; P_L 为 t_c 时刻高斯脉冲激光的峰值功率, 单位为 W 。同上, 定义某角度区间的目标回波信号比(TSR), 表达式为

$$f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha) = \frac{P_{\text{Target}}(A_i, t, \Delta\alpha)}{P_L(\pi r_i^2, t = t_c)}, \quad (5)$$

式中 P_{Target} 为 t 时刻 A_i 探测面积在 $\Delta\alpha$ 角度区间内接收的目标回波信号功率, 单位为 W 。同一时刻, $f_{\text{ESR}}(t, \Delta\alpha)$ 与 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ 之差为散射回波信号比。

3.1 角度区间划分

根据回波信号入射天顶角大小, 将其划分为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 60^\circ$ 和 $60^\circ \sim 90^\circ$ 等 3 个角度区间, 计算不同角度区间的 $f_{\text{ESR}}(t, \Delta\alpha)$ 和 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$, 如图 2 和图 3 所示。结果表明, 无论是所有回波信号还是目标回波信号, 均在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 角度区间取得较高的信号强度, 且两者的时域峰值时刻存在时间差, 目标回波信号约滞后 23.0 ns 。对数据归一化处理后发现, 无量纲目标回波信号比 $f_{\text{TSR}}^*(t, \Delta\alpha)$ 具有相同的时域波形, 脉冲宽度约为 40.8 ns , 与所处角度区间无关, 即探测器接收角度仅对目标回波信号强度存在影响, 与其时间展宽特性无关。

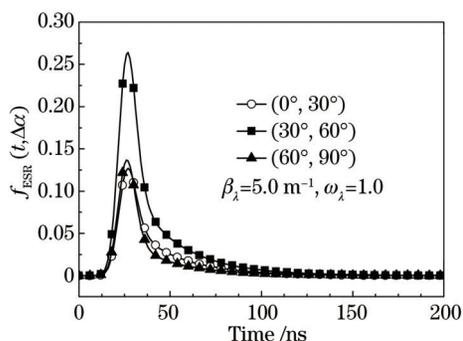


图2 不同角度区间的回波信号比

Fig.2 $f_{\text{ESR}}(t, \Delta\alpha)$ of different angle intervals

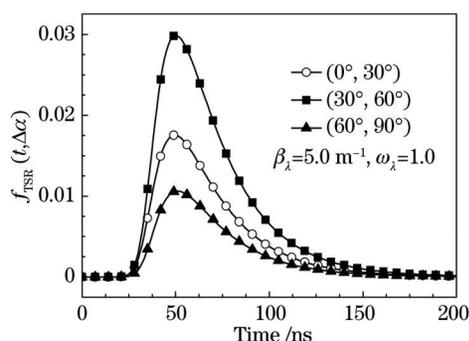


图3 不同角度区间的目标回波信号比

Fig.3 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ of different angle intervals

为了进一步明确回波信号强度与角度区间的关系, 将 $30^\circ \sim 60^\circ$ 划分为间隔 10° 的 3 个角度区间, 如图 4 和图 5 所示。所有回波信号在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 角度区间的强度最大, 并以此为极大值向两侧角度区间单调递减; 目标

回波信号极大值出现在 $30^\circ\sim 40^\circ$ 角度区间,但与 $40^\circ\sim 50^\circ$ 角度区间相差不大。在上述探测条件下, $30^\circ\sim 50^\circ$ 角度范围的回波信号对于获得高清晰度的实时目标图像具有更高的应用价值。

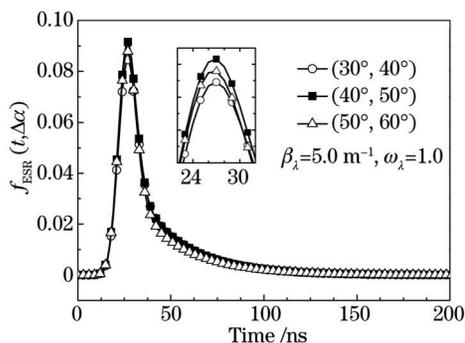


图4 $30^\circ\sim 60^\circ$ 角度区间的回波信号比
Fig.4 $f_{\text{ESR}}(t, \Delta\alpha)$ of $30^\circ\sim 60^\circ$ angle interval

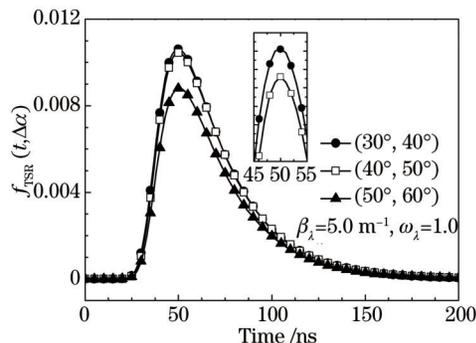


图5 $30^\circ\sim 60^\circ$ 角度区间的目标回波信号比
Fig.5 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ of $30^\circ\sim 60^\circ$ angle interval

3.2 光谱衰减系数

在上述研究基础上,探讨光谱衰减系数对典型角度区间目标回波信号的辐射强度和脉冲宽度的影响。根据介质光学厚度的概念^[21],选取光谱衰减系数 β_λ 分别为 1.0 m^{-1} 和 10.0 m^{-1} ,计算目标回波信号强度较大的3个角度区间,如图6和图7所示。对于光学厚度 $\tau_\lambda = 1$ 的光学薄介质,目标回波信号在 $0^\circ\sim 10^\circ$ 小角度区间取得极大值,且明显高于其他角度区间,强度递减顺序为 $40^\circ\sim 50^\circ$ 和 $30^\circ\sim 40^\circ$,但其脉冲宽度仅为 10.3 ns ,小于其他角度区间的 17.9 ns 。对于光学厚度 $\tau_\lambda = 10$ 的光学厚介质,目标回波信号极大值仍出现在 $30^\circ\sim 40^\circ$ 角度区间,并向两侧角度区间单调递减,各角度区间的脉冲宽度基本相同,约为 68.7 ns ,这与图5所得结论完全一致。

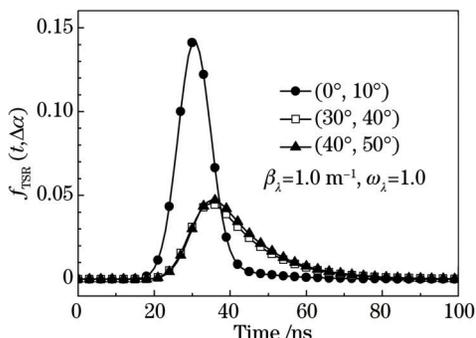


图6 衰减系数 $\beta_\lambda = 1.0$ 的目标回波信号比
Fig.6 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ of attenuation coefficient $\beta_\lambda = 1.0$

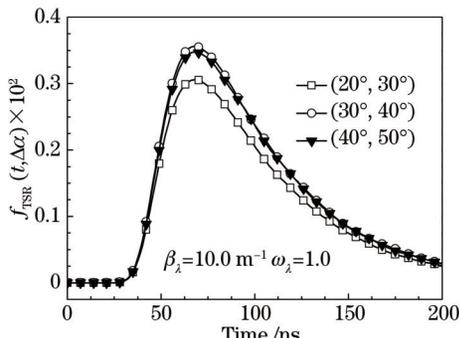


图7 衰减系数 $\beta_\lambda = 10.0$ 的目标回波信号比
Fig.7 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ of attenuation coefficient $\beta_\lambda = 10.0$

总的来说,随着光谱衰减系数或光学厚度的增大,各角度区间的目标回波信号强度减弱、峰值时刻延迟、脉冲宽度增大,即能量衰减增强,时间展宽明显,如图8所示。光学薄介质中,脉冲激光的穿透能力相对较强,致使部分目标回波信号的传输光程短、入射角度小,宏观表现为小角度区间的 $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ 较大、时间展

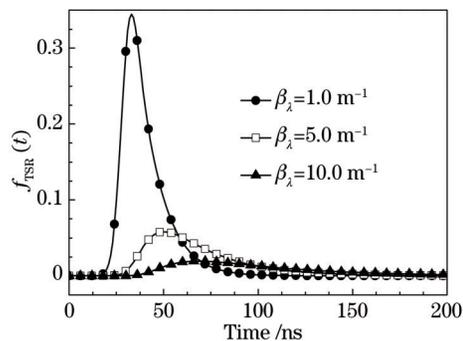


图8 衰减系数对目标回波信号比的影响
Fig.8 Effect of attenuation coefficient on $f_{\text{TSR}}(t)$

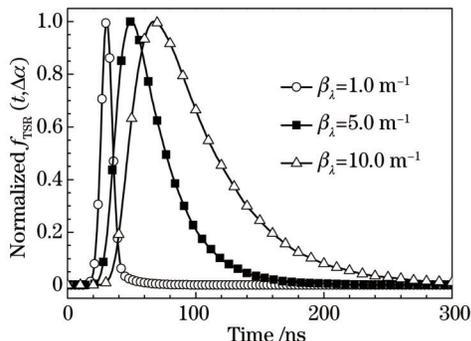


图9 小角度区间的归一化目标回波信号比
Fig.9 Normalized $f_{\text{TSR}}(t, \Delta\alpha)$ of small-angle interval

宽特性不明显;光学厚介质中,脉冲激光要经历多次散射后才能完成双程辐射传输,从而造成总光程和探测时间的增长,此时光线入射角已达到稳定状态,目标回波信号能量集中在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 角度范围内。由于大部分高强度小角度目标回波信号转变为散射干扰信号,小部分转移到其他角度区间,故光谱衰减系数对 $0^\circ\sim 10^\circ$ 小角度目标回波信号的时间展宽特性影响更为强烈,如图9所示。

3.3 散射反照率

散射反照率为1.0时,脉冲激光不存在延程能量损失,将以图1中A₁和B₁两种回波形式返回到接收器表面。实际参与性介质的散射反照率往往小于1.0,这引起部分回波信号因被介质吸收而淹没,包括图1中目标回波信号A₂和散射回波信号B₂。鉴于此,选取散射反照率 ω_λ 分别为0.9和0.95,分析其对回波信号强度和脉冲宽度的影响,如图10和图11所示。结果表明,随着散射反照率的增大,各角度区间的回波信号强度增强,特别是与散射次数相关的后期回波信号,时域峰值时刻延迟,时间展宽特性明显,且对目标回波信号的影响程度大于散射回波信号,如:回波信号比脉冲宽度从11.2 ns增大到13.2 ns,而目标回波信号比却从16.4 ns增大到40.7 ns。

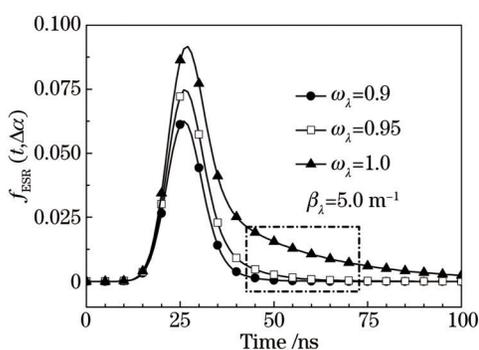


图10 反照率对 $40^\circ\sim 50^\circ$ 回波信号比的影响
Fig.10 Effect of albedo on $f_{ESR}(t, \Delta\alpha)$ of $40^\circ\sim 50^\circ$

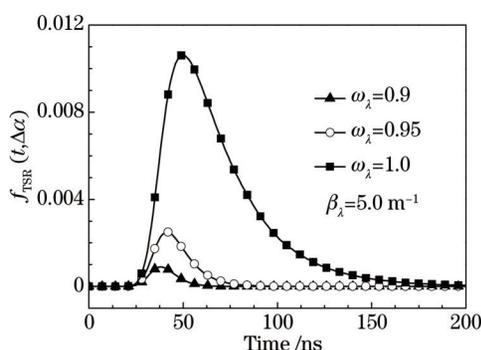


图11 反照率对 $30^\circ\sim 40^\circ$ 目标回波信号比的影响
Fig.11 Effect of albedo on $f_{TSR}(t, \Delta\alpha)$ of $30^\circ\sim 40^\circ$

3.4 目标反射特性

针对实际地物目标表面,严格的镜反射或漫反射是不存在的,大多数情况均介于两者之间^[23],但可以通过分析极端反射条件下的回波信号差异,进而评估目标反射特性的影响程度,如图12所示。显而易见,在光学薄介质中,镜-漫反射的峰值角度区间分别处于 $0^\circ\sim 10^\circ$ 和 $30^\circ\sim 40^\circ$,最大差值达到0.130和0.022。此时,目标反射特性对不同角度区间的回波信号强度影响极大,且差异主要体现在峰值时刻附近。

图13中给出不同光谱衰减系数下,镜-漫反射全角度目标回波信号比之差的时域分布,表示为 $f_{TSR_s}(t) - f_{TSR_d}(t)$ 。可见,随着光谱衰减系数或光学厚度的增大,镜反射引起的高强度前期回波信号减弱,镜-漫反射间目标回波信号的绝对差值极其微小。在MCM中,随机光线的总光程或传输时间主要取决于散射相函数、光谱衰减系数和散射反照率等,其远大于与目标反射特性相关的有限次光程和,从而造成光学厚介质中目标反射特性与回波信号强度的弱关联性。实际地物目标反射率均小于1.0,这造成目标回波信号能量的反射衰

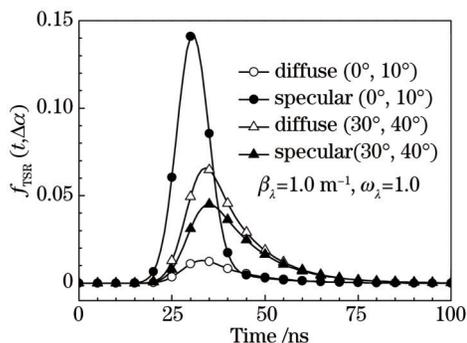


图12 反射特性对光学薄介质目标回波信号的影响
Fig.12 Effect of reflective characteristic on $f_{TSR}(t, \Delta\alpha)$ in optical thick medium

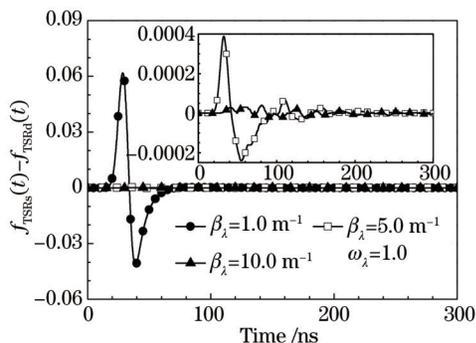


图13 镜-漫反射全角度目标回波信号比之差
Fig.13 Absolute difference of $f_{TSR}(t)$ between specular reflection and diffuse reflection

减,且传输时间越长反射衰减越严重,即:目标回波信号随着传输时间做反射率为底阶次递增的指数衰减、时域峰值时刻提前、时间展宽特性减弱,但其对散射回波信号无任何影响。

4 结 论

采用MCM建立了参与性介质中超短脉冲激光的双程瞬态辐射传输模型。基于该模型,分析了各向同性散射介质中介质物性参数和目标反射特性对高斯脉冲激光回波信号角度特性的影响。研究表明:

1) 目标回波信号的峰值角度区间由光学薄介质的 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 转移到光学厚介质的 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,并以此为极大值向两侧角度区间单调递减,且其时间展宽特性与所处角度区间无关;

2) 随着光谱衰减系数或光学厚度的增大,各角度区间的目标回波信号强度减弱、峰值时刻延迟、脉冲宽度增大,尤其是小角度区间的目标回波信号,当入射天顶角达到稳定状态时,目标回波信号能量集中在 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 角度范围内;

3) 随着散射反照率的增大,各角度区间的回波信号强度增强,尤其是后期回波信号,峰值时刻延迟,时间展宽特性明显,且对目标回波信号的影响程度大于散射回波信号;

4) 光学薄介质中,目标反射特性对各角度区间的回波信号强度影响极大,差异主要体现在峰值时刻附近。而光学厚介质中,镜反射引起的高强度前期回波信号减弱,镜-漫反射间目标回波信号的绝对差值极其微小,呈现弱关联性。

参 考 文 献

- Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109001.
韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109001.
- Liu Bingqi, Zhou Bin, Wu Dongsheng, *et al.*. Dual-channel active laser detection system[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 241-246.
刘秉琦, 周 斌, 武东生, 等. 双通道激光主动探测系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 241-246.
- Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi, *et al.*. Study on airborne multi-pulse ladar target signal simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0128001.
马鹏阁, 齐 林, 羊 毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0128001.
- Feng Guobin, Wang Zhenbao, Feng Gang, *et al.*. Detector array for measuring temporal-spatial distribution of high-repetition-rate pulsed laser beam profile[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0608003.
冯国斌, 王振宝, 冯 刚, 等. 高重复频率脉冲激光光斑时空分布探测阵列[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0608003.
- Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
陈 聪, 高 明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- Zhixiong Guo, Brian Hunter. Advances in ultrafast radiative transfer modeling and applications: A review[J]. Heat Transfer Research, 2013, 44(3-4): 303-344.
- Ruan Liming, An Wei, Tan Heping. Transient radiative transfer of ultra-short pulse in two dimension inhomogeneous medium[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(6): 998-1000.
阮立明, 安 巍, 谈和平. 超短脉冲激光在二维非均匀介质内的瞬态辐射传输[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(6): 998-1000.
- Jian Jiao, Zhixiong Guo. Thermal interaction of short-pulsed laser focused beams with skin tissues[J]. Phy Med Bio, 2009, 54(13): 4225-4241.
- Arka Bhowmik, Ramjee Repaka, Subhash C Mishra, *et al.*. Analysis of radiative signals from normal and malignant human skins subjected to a short-pulse laser[J]. Internat J Heat Mass Transfer, 2014, 68: 278-294.
- Wang Jingtao, Zou Jie. Study on concept of missile defense using airborne directed energy weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 37(s2): 365-370.
王景涛, 邹 杰. 机载定向能武器反导概念研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 37(s2): 365-370.
- Yang Yang, Liu Jing. Anti-laser characteristics of hybrid shell structure with liquid metal layer and its numerical simulation[J].

- Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702010.
- 杨 阳, 刘 静. 含液体金属复合壳体结构的抗强激光特性及其数值模拟[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702010.
- 12 Lei Kaizhuo, Huang Jianguo, Zhang Qunfei, *et al.*. Overview of directed energy weapons[J]. Torpedo Technology, 2010, 18(3): 161–166.
雷开卓, 黄建国, 张群飞, 等. 定向能武器发展现状及未来展望[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(3): 161–166.
- 13 L H Liu, P F Hsu. Time shift and superposition method for solving transient radiative transfer equation[J]. J Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2008, 109(7): 1297–1308.
- 14 Liu Lijun, Liu Linhua. Superposition mechanism of pulse train's transmission in semitransparent medium[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2320–2325.
刘立军, 刘林华. 半透明介质内激光脉冲链传输过程的叠加机理[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2320–2325.
- 15 Zhou Yamin, Wu Keqi, Chen Jinla, *et al.*. Monte Carlo simulation of time-domain broadening of laser pulse propagating underwater [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(3): 259–263.
周亚民, 吴克启, 陈金来, 等. 激光脉冲水下传输时域展宽的蒙特卡罗模拟[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 259–263.
- 16 Wu Zhensen, You Jinguang, Yang Ruike. Study on laser attenuation characterin sand and dust storms[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(9): 1297–1308.
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1075–1080.
- 17 Du Yongcheng, Yang Li. Attenuation characters of laser used for guided weapons in fine water sprays[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402005.
杜永成, 杨 立. 制导武器激光在细水雾中的衰减特性[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402005.
- 18 Shen Na, Zhang Xiangjin, Guo Jing. Attenuation of laser fuse through fog[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 864–869.
沈 娜, 张祥金, 郭 婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 864–869.
- 19 Yan Wei, Zhang Riwei, Dai Dengpo, *et al.*. Simulation research on the atmospheric transmission characteristics and the return signal for laser[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(3): 564–571.
严 卫, 张日伟, 代登坡, 等. 激光大气传输特性及其回波信号仿真研究[J]. 电波科学学报, 2012, 27(3): 564–571.
- 20 R Muthukumar, Subhash C Mishra, S Maruyama, *et al.*. Assessment of signals from a tissue phantom subjected to radiation sources of temporal spans of the order of a nano-, pico-, and femto-second—A numerical study[J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 2011, 60(2): 154–170.
- 21 Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, *et al.*. Numerical Calculation of Infrared Radiation Properties and Transfer[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006.
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- 22 Masato Akamatsu, Zhixiong Guo. Comparison of transmitted pulse trains predicted by duhamel's superposition theorem and direct pulse simulation in a 3-D discrete ordinates system[J]. Numer Heat Transfer, Part B, 2013, 63(3): 189–203.
- 23 Tan Heping, Yi Hongliang. Infrared Radiation Transfer in Multilayered Medium[M]. Beijing: Science Press, 2012.
谈和平, 易红亮. 多层介质红外热辐射传输[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

栏目编辑: 韩 峰