

各向异性散射介质中 高斯脉冲激光的回波特性

张旭升 郭亮 黄勇 罗志涛

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 采用蒙特卡罗法建立了各向异性散射介质中高斯脉冲激光的全链路瞬态辐射传输模型,构造并推导了散射方向概率模型及其坐标系变换过程。在此基础上,计算分析了高斯脉冲激光回波特性的时域分布及差异。研究表明:时域回波信号的脉冲增减来自于其他类别信号的转化和自身信号的超前或滞后;随着前向散射的增强,目标回波信号强度增大、峰值时刻前移、时间展宽减弱,散射回波信号响应与其相反且影响程度减弱;目标回波特性与 $[0^\circ, 90^\circ]$ 前向散射区域直接关联,散射回波特性与 $[90^\circ, 180^\circ]$ 后向散射区域直接关联。研究结论可为脉冲激光主动探测系统的性能提升及地物目标的反探测隐身提供理论指导。

关键词 激光光学;回波特性;各向异性散射;高斯脉冲激光;蒙特卡罗法;瞬态辐射传输

中图分类号 TN249; O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802003

Echo Characteristic of Gaussian Pulse Laser in Anisotropic Scattering Medium

Zhang Xusheng Guo Liang Huang Yong Luo Zhitao

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

Abstract The whole-process transient radiative transfer model of Gaussian pulse laser in anisotropic scattering medium is established using Monte Carlo method, then the probabilistic model of scattering direction is constructed and the process of coordinate system transformation is deduced. On the basis above, the temporal distribution and differences of Gaussian pulse laser echo characteristic is calculated and analyzed. Research result shows that pulsed increase/decrease of temporal echo signal is from the conversion of other signal categories and ahead or lag of itself; with the forward scattering enhancing, target-echo signal intensity increases, peak time forwards and temporal broadening weakens, while scatter-echo signal responses are in contrast and change weakly; target-echo characteristic associates with $[0^\circ, 90^\circ]$ forward scattering region directly, as well as scatter-echo characteristic associating with $[90^\circ, 180^\circ]$ backward scattering region. The conclusion can provide theoretical guidance for performance improvement of active detection systems by pulse laser and anti-stealth detection of ground objects.

Key words laser optics; echo characteristic; anisotropic scattering; Gaussian pulse laser; Monte Carlo method; transient radiative transfer

OCIS codes 140.3538; 030.5620; 290.4210; 040.1880

1 引言

20世纪70年代,美国率先开展了目标与背景环境的固有激光散射特性研究,自此便不断推进以超短脉冲激光为信息载体的主动探测体制的发展^[1]。与传统的被动光辐射探测方式相比,主动探测可以实现远距离、小暗目标及其要害部位的探测与识别,具有更强的探测制导精度、天候适应性和抗干扰能力^[2-3]。在理想情况下,脉冲激光主动探测是一种穿云透雾、昼夜工作的远距离、全天候、高精度的实时探测系统,并可有效抵御弥散烟幕、黑化表面、镜面保护等反探测措施。但实际上,激光器发射功率和探测器灵敏度有限,且受

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-03-12

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

弥散大气介质和气象条件的影响^[4-5],严重限制了脉冲激光的探测识别距离和时空分辨率。因此,亟需开展各向异性散射介质对脉冲激光回波特性的影响机理研究。

袁远等^[6]采用球谱函数法研究了非线性各向异性散射介质的大气红外辐射传输特性,仅当数值离散阶数大于散射相函数阶数时,各向异性散射问题才能获得高精度的稳定解。中国科学院安徽光学精密机械研究所的多名学者重点研究了冰晶、沙尘、碳黑等典型气溶胶粒子的散射相函数,分析了微粒纵横比、尺度和复折射率等参数的影响规律^[7-9]。靳赛等^[10]研究了散射介质中超短脉冲的单程辐射传输时空特性。刘秉琦等^[11-12]搭建了双通道、大视场的激光主动探测系统,结合外场试验评估了系统的探测识别性能。Guo等^[13-16]研究了离散坐标法、有限体积法等离散空间立体角的辐射传输数值算法中散射相函数归一化的重要性,指出其对各向异性散射介质的计算精度存在强烈影响。

上述各文献的研究重点主要集中在弥散介质散射相函数、辐射传输算法改进及应用、超短脉冲单程辐射传输、激光主动探测系统搭建及性能评估等方面,并未对各向异性散射介质中脉冲激光的回波特性及其变化规律进行深入研究。本文采用无假散射和射线效应的蒙特卡罗法(MCM)建立高斯脉冲激光的全链路瞬态辐射传输模型,从概率统计角度分析各向异性散射特性对目标回波信号和散射回波信号的影响,为脉冲激光主动探测系统的性能提升及地物目标的反探测隐身提供理论指导。

2 物理模型及散射方向变换

2.1 物理模型

半径 $r_i=15$ mm 的高斯脉冲激光垂直入射到各向异性散射介质表面,脉冲宽度 $t_p=10$ ns、发射时间为 $0\sim 50$ ns、峰值时刻 $t_c=25$ ns;介质全链路垂直光学厚度 $\tau_\lambda=10$ 、光谱衰减系数 $\beta_\lambda=5.0$ m^{-1} 、散射反照率 $\omega_\lambda=1.0$;目标表面漫反射反射率 $\rho_d=1.0$ 。高斯脉冲激光全链路瞬态辐射传输模型如图 1 所示,依据是否含有目标表面反射信息,将回波信号分为目标回波信号和散射回波信号,其与高斯脉冲激光峰值功率之比定义为目标回波信号比 f_{TSR} (TSR)和散射回波信号比 f_{SSR} (SSR)。

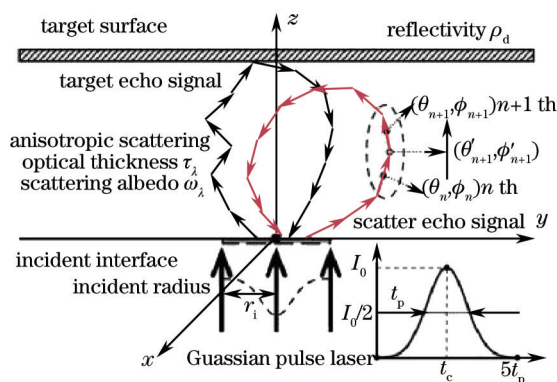


图 1 高斯脉冲激光全链路瞬态辐射传输模型

Fig.1 Whole-process transient radiative transfer model of Gaussian pulse laser

在激光入射面 xoy 内,任一点时域光谱辐射强度计算式为

$$I_\lambda(x, y, t) = I_0 \exp\left[-4 \ln 2 \times \left(\frac{t - t_c}{t_p}\right)^2\right] \times \exp\left(\frac{x^2 + y^2}{-r_i^2}\right), \quad (1)$$

式中 I_0 为时域峰值光谱辐射强度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{sr})$ 。基于(1)式,MCM 中任一随机光线的全链路传输时间 t 计算式为

$$t = t_0 - \frac{\ln(R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_N)}{c\beta_\lambda}, \quad (2)$$

$$\int_0^{t_0} I_\lambda(x, y, t) dt = R \times \int_0^{5t_p} I_\lambda(x, y, t) dt, \quad (3)$$

式中 t_0 为高斯脉冲激光随机发射时刻,单位为 ns, R 为 $[0, 1]$ 区间单位均匀随机数, N 为任一光线的全链路随

机次数, c 为介质中辐射传播速度, 取 3.0×10^8 m/s。

2.2 散射方向变换

在 MCM 中, 散射方向直接影响随机光线的传输光程和时间, 故确定散射方向成为求解各向异性散射介质瞬态辐射传输问题的重要环节^[17]。对于大多数弥散介质, 各向异性散射仅仅体现在天顶角上, 与 $[0, 2\pi]$ 区间均匀分布的圆周角无关。依据散射相函数归一化条件, 可得到粒子坐标系下当地散射天顶角与单位均匀随机数的关系, 如图 2 所示。其中, θ'_{n+1} 为第 $n+1$ 次当地散射天顶角; A_l 为线性各向异性散射多项式展开系数, 取 $[-1, 1]$; g 为 Henyey-Greenstein(H-G) 散射相函数非对称因子, 取 $(-1, 1)$ 。

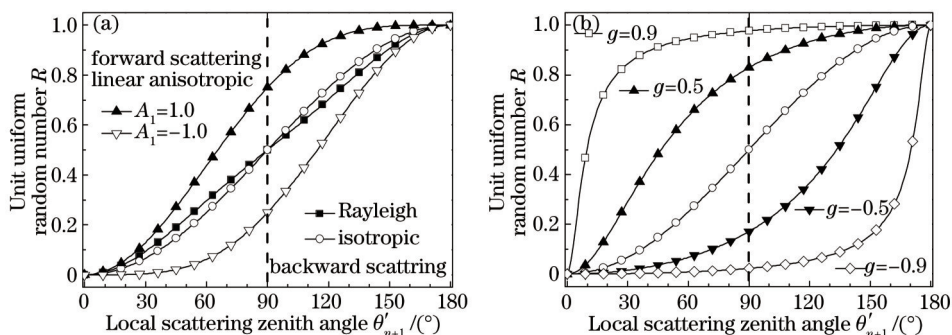


图 2 当地散射天顶角与单位均匀随机数的关系。(a) 各向同性散射、瑞利散射及线性各向异性散射;
(b) Henyey-Greenstein 各向异性散射

Fig.2 Relationship between local scattering zenith angle and unit uniform random number. (a) Isotropic, Rayleigh and linear anisotropic scattering; (b) Henyey-Greenstein anisotropic scattering

对于各向异性散射介质, 仅在当地散射方向变换为系统散射方向后才能继续下一步随机循环过程, 如图 1 所示。在系统坐标系下, 某一光线以天顶角 θ_n 、圆周角 ϕ_n 的方向入射, 选取该方向单位矢量作为粒子坐标系的 z 向单位矢量 e_z , 如下:

$$e_z = \sin \theta_n \cos \phi_n i + \sin \theta_n \sin \phi_n j + \cos \theta_n k, \quad (4)$$

式中 i 、 j 、 k 为系统坐标系的基本单位向量。在系统坐标系 xoy 内, 利用垂直向量数量积属性求得粒子坐标系的 y 向单位矢量 e_y 为

$$e_y = \sin \phi_n i - \cos \phi_n j \text{ or } e_y = -\sin \phi_n i + \cos \phi_n j. \quad (5)$$

(5) 式中两向量共线反向, 任选前者为例进行后续计算。此时, e_y 与 e_z 的向量积即为粒子坐标系的 x 向单位矢量 e_x , 如下:

$$e_x = -\cos \theta_n \cos \phi_n i - \cos \theta_n \sin \phi_n j + \sin \theta_n k. \quad (6)$$

在粒子坐标系下, 第 $n+1$ 次散射后光线沿着天顶角 θ'_{n+1} 、圆周角 ϕ'_{n+1} 方向传递, 新传递方向单位矢量 s' 的向量式为

$$s' = \sin \theta'_{n+1} \cos \phi'_{n+1} e_x + \sin \theta'_{n+1} \sin \phi'_{n+1} e_y + \cos \theta'_{n+1} e_z. \quad (7)$$

将(4)~(6)式代入(7)式可得, 系统坐标系下新传递方向 s' 的向量式为

$$s' = s'_x i + s'_y j + s'_z k, \quad (8)$$

$$\begin{cases} s'_x = -\sin \theta'_{n+1} (\cos \phi'_{n+1} \cos \theta_n \cos \phi_n - \sin \phi'_{n+1} \sin \phi_n) + \cos \theta'_{n+1} \sin \theta_n \cos \phi_n \\ s'_y = -\sin \theta'_{n+1} (\cos \phi'_{n+1} \cos \theta_n \sin \phi_n + \sin \phi'_{n+1} \cos \phi_n) + \cos \theta'_{n+1} \sin \theta_n \sin \phi_n \\ s'_z = \sin \theta'_{n+1} \cos \phi'_{n+1} \sin \theta_n + \cos \theta'_{n+1} \cos \theta_n \end{cases} \quad (9)$$

至此, 即可计算出系统坐标系下第 $n+1$ 次散射后光线传递方向的天顶角 θ_{n+1} 和圆周角 ϕ_{n+1} 。

3 分析与讨论

3.1 瑞利散射

对于瑞利散射相函数, 无法直接获得当地散射天顶角关于单位均匀随机数的显性解析式, 故采用

Newton-Rahpson 迭代法求解关于 $\cos \theta'_{n+1}$ 的三次非线性方程,如下:

$$\cos^3 \theta'_{n+1} + 3 \cos \theta'_{n+1} = 4(1 - 2R). \quad (10)$$

令 $\cos \theta'_{n+1} = x$, 迭代计算式如下:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{x_k^3 + 3x_k + 4(2R - 1)}{3x_k^2 + 3}, \quad (11)$$

式中 k 为迭代次数,取 $0, 1, 2, \dots$, 与收敛误差容限有关。

分析图 2(a), 对于任意单位均匀随机数, 瑞利散射与各向同性散射的当地散射天顶角相差微小。 $\theta'_{n+1} < 90^\circ$ 时, 瑞利散射天顶角 θ_{n+1}^R 略小; $\theta'_{n+1} > 90^\circ$ 时, θ_{n+1}^R 略大。两者的散射特性高度相似, 但瑞利散射呈现出略强的前向散射和后向散射。为了研究微弱散射变化对脉冲激光回波特性的影响, 本文将以各向同性散射为基准进行回波信号的时域差异性分析, 如图 3 和图 4 所示。

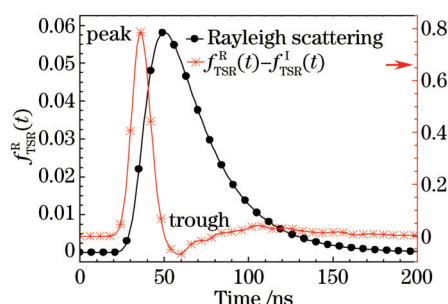


图3 瑞利散射目标回波信号比及差异

Fig.3 $f_{TSR}^R(t)$ and its differences of Rayleigh scattering

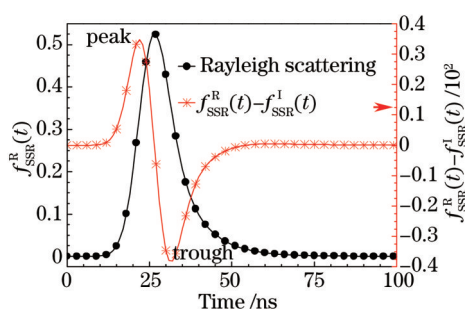


图4 瑞利散射散射回波信号比及差异

Fig.4 $f_{SSR}^R(t)$ and its differences of Rayleigh scattering

不难发现, 散射相函数的微小差异已明显体现在目标回波信号和散射回波信号上, 瑞利散射造成某一时段的回波信号比增大, 幅值达到自身信号强度的 10^{-2} 量级。前向散射将部分散射回波信号转化为目标回波信号的同时, 又缩短了原有目标随机光线的传输光程, 即目标回波信号脉冲增量来自于散射回波信号转化和目标回波信号超前, 这也造成图 3 中时域差异信号比“强波峰后紧邻弱波谷”的现象。后向散射对信号类别转化无影响, 仅缩短了原有散射随机光线的传输光程, 即散射回波信号脉冲增量仅来自于散射回波信号超前, 且散射回波信号时域总量的减少等于目标回波信号时域总量的增加。

3.2 线性各向异性散射

线性各向异性散射相函数是米氏散射勒让德多项式级数和形式的基本简化, 在研究介质各向异性散射中发挥重要作用^[17]。与各向同性散射相比, 线性各向异性散射呈现出较强的前向散射和较弱的后向散射或与其相反。图 5 和图 6 中给出展开系数 A_1 为 ± 1.0 时的时域回波信号比。可见, 随着前向散射的增强和后向散射的减弱, 目标回波信号强度增大、峰值时刻前移、时间展宽减弱, 散射回波信号响应与其相反且影响程度减弱, 如目标回波信号比的强度变化率为 77.7%、峰值时差为 -6 ns、脉宽变量为 -9.8 ns 时, 散射回波信号比仅分别为 -14.6%、1 ns 和 0.8 ns。

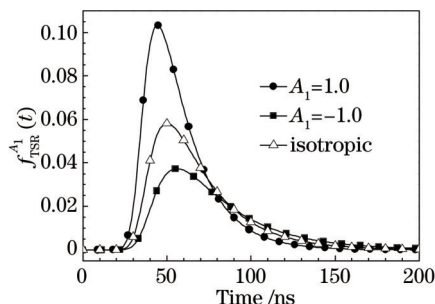


图5 线性各向异性散射目标回波信号比

Fig.5 $f_{TSR}^{A_1}(t)$ of linear anisotropic scattering

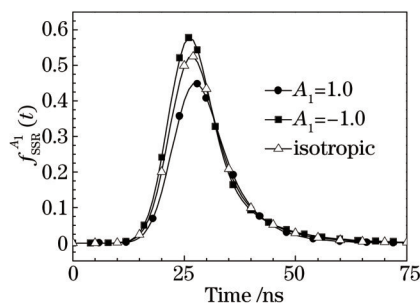


图6 线性各向异性散射散射回波信号比

Fig.6 $f_{SSR}^{A_1}(t)$ of linear anisotropic scattering

线性各向异性散射的时域差异性分析如图 7 所示。 $A_1=1.0$ 时, 目标回波信号脉冲增量同样来自于散射

回波信号转化和目标回波信号超前,且其幅值已与自身信号强度处于同一量级;弱后向散射增大了原有散射随机光线的传输光程,造成散射回波信号的时域差异性曲线中出现先波谷后波峰的现象且时域总量减少,注意图中 $\Delta f_{SSR}^{A_1=1.0}(t) = f_{SSR}^{A_1=1.0}(t) - f_{SSR}^I(t)$,其他以此类推。 $A_1=-1.0$ 时,散射回波信号脉冲增量来自于目标回波信号转化和散射回波信号超前,这造成时域差异性曲线中出现先波峰后波谷的现象;弱前向散射导致目标随机光线数目减少、光程增大,目标回波信号的时域差异性曲线中出现时间展宽效应较为明显的衰减波谷。此外,对于任意类别回波信号,前向散射 $A_1=1.0$ 的绝对变化量均大于后向散射 $A_1=-1.0$ 。

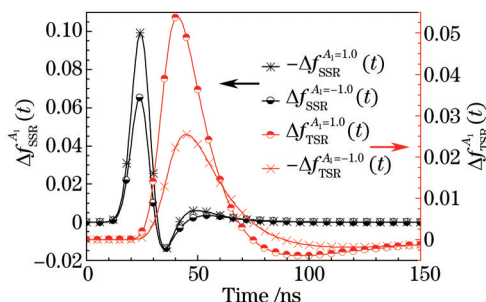


图7 线性各向异性散射回波信号比差异

Fig.7 Echo signal ratio's differences of linear anisotropic scattering

3.3 H-G 各向异性散射

对于忽略衍射的非电介质粒子系,可采用H-G散射相函数近似替代复杂米氏散射相函数,并能较好捕获强前向散射介质的固有属性^[18-19]。图8和图9中给出非对称因子 g 为 ± 0.9 和 ± 0.5 时的时域回波信号比。当 g 由 $+0.9$ 减小为 -0.9 时,目标回波信号比的最大值、峰值时刻和脉冲宽度分别由 0.54 、 34 ns、 13.5 ns 变为 0.021 、 62 ns、 72.5 ns,此时散射回波信号比则由 0.10 、 30 ns、 14.9 ns 变为 0.66 、 25 ns、 11.2 ns,该现象与图5和图6所得结论完全一致。同时发现,前向散射中目标-散射回波信号的峰值时差明显小于后向散射,这必将对选通摄像机的开关时刻提出更为严格的要求与限制。

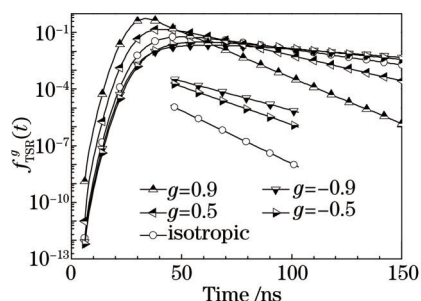


图8 H-G各向异性散射目标回波信号比

Fig.8 $f_{TSR}^g(t)$ of H-G anisotropic scattering

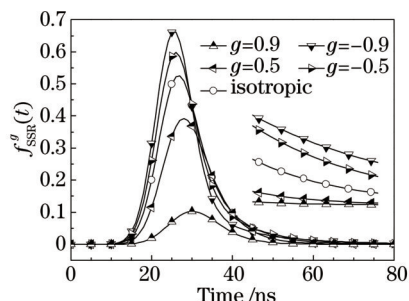


图9 H-G各向异性散射散射回波信号比

Fig.9 $f_{SSR}^g(t)$ of H-G anisotropic scattering

H-G各向异性散射的时域差异性分析如图10和图11所示。 $g=+0.9$ 的强前向散射将大部分散射回波信号转化为目标回波信号,导致最大时域差异信号比达到 0.52 ,且集中在相对靠前的 34 ns 附近。同时,随着非对称

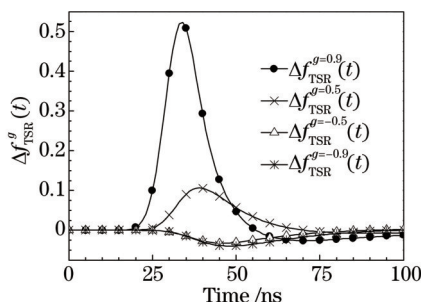


图10 H-G各向异性散射目标回波信号比差异

Fig.10 $\Delta f_{TSR}^g(t)$ of H-G anisotropic scattering

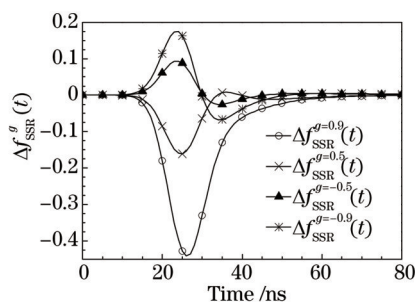


图11 H-G各向异性散射散射回波信号比差异

Fig.11 $\Delta f_{SSR}^g(t)$ of H-G anisotropic scattering

因子的增大或前向散射的增强,散射回波信号的时域差异性曲线中一次极值绝对变化量增大、二次极值绝对变化量减小, $g=+0.9$ 时二次极值已消失。分析表明,对于任意时刻,强前向散射引起的散射回波信号转化量远大于弱后向散射引起的散射回波信号滞后增量,从而造成二次极值淹没在散射回波信号转化量中。

基于上述时域差异性分析,将以当地散射天顶角为自变量的单位均匀随机数函数分为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[90^\circ, 180^\circ]$ 的两个角度区域,如图2所示。若积分式 $\int_0^{90^\circ} R(\theta'_{n+1}) d\theta'_{n+1}$ 大于各向同性散射,则目标回波信号强度及其时域总量均增大、时域差异信号比出现脉冲增量;若积分式 $\int_{90^\circ}^{180^\circ} R(\theta'_{n+1}) d\theta'_{n+1}$ 小于各向同性散射,则散射回波信号强度增大、时域差异信号比出现先波峰后波谷的脉冲增减现象,反之亦然。概括地说,目标回波特性与 $[0^\circ, 90^\circ]$ 前向散射区域直接关联,散射回波特性与 $[90^\circ, 180^\circ]$ 后向散射区域直接关联。

4 结 论

采用MCM建立了各向异性散射介质中高斯脉冲激光的全链路瞬态辐射传输模型,构造了当地散射天顶角与单位均匀随机数的概率关系,推导了散射方向的坐标系变换过程。在此基础上,计算分析了高斯脉冲激光回波特性的时域分布及差异。所得结论如下:

1) 微弱散射差异即可引起脉冲激光回波特性的改变,时域回波信号的脉冲增减来自于其他类别信号的转化和自身信号的超前或滞后,且对于时域总量减小的回波信号,仅存在自身的超前或滞后、无信号类别转化;

2) 随着前向散射的增强和后向散射的减弱,目标回波信号强度增大、峰值时刻前移、时间展宽减弱,散射回波信号响应与其相反且影响程度减弱,从而造成目标-散射回波信号的峰值时差缩小,散射回波信号的时域差异性曲线中一次极值绝对变化量增大、二次极值绝对变化量减小甚至淹没;

3) 将散射概率模型函数分为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[90^\circ, 180^\circ]$ 的两个角度区域,目标回波特性与 $[0^\circ, 90^\circ]$ 前向散射区域直接关联,散射回波特性与 $[90^\circ, 180^\circ]$ 后向散射区域直接关联,且回波信号时域总量的增减主要取决于前向散射区域。

参 考 文 献

- 1 Ian Baker, Stuart Duncan, Jeremy Copley. A low noise, laser-gated imaging system for long range target identification [C]. SPIE, 2004, 5406: 133-144.
- 2 Wang Canjin, Sun Tao, Shi Ningning, *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1639-1647.
王灿进, 孙涛, 石宁宁, 等. 基于双隐层BP算法的激光主动成像识别系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1639-1647.
- 3 Li Jianzhong, Peng Qixian, Li Zeren, *et al.*. Technology of missile-borne laser active imaging guidance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1117-1123.
李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1117-1123.
- 4 Ove Steinvall, Tomas Chevalier, Christina Grönwall. Simulating the performance of laser imaging and range profiling of small surface vessels[C]. SPIE, 2013, 8731(0U): 87310U.
- 5 Pang Chunying, Zhang Tao. Signal-to-noise ratio model of laser active imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(2): 319-324.
庞春颖, 张涛. 激光主动成像系统信噪比模型的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 319-324.
- 6 Yuan Yuan, Xie Fang, Yi Hongliang, *et al.*. P_N -approximation method for infrared transmission characteristics in nonlinear anisotropic scattering medium[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(5): 439-445.
袁远, 谢放, 易红亮, 等. 非线性各向异性散射介质红外传输特性的 P_N 方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(5): 439-445.
- 7 Shao Shiyong, Huang Yinbo, Wei Heli, *et al.*. Phase function of prolate spheroidal mono-disperse aerosol particles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 108-113.
邵士勇, 黄印博, 魏合理, 等. 单分散长椭球形气溶胶粒子的散射相函数研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 108-113.
- 8 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, *et al.*. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901001.
孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9):

- 0901001.
- 9 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Light scattering analysis of an asymmetrical two-component aerosol particle model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1101001.
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种非对称双成分气溶胶粒子模型的散射特性分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1101001.
- 10 Jin Sai, Tan Wenjiang, Liu Xin, *et al.*. Temporal and spatial characteristics of ultrashort pulse propagation in turbid media[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0702004.
靳 赛, 谭文疆, 刘 鑫, 等. 超短脉冲在散射介质中传播的时间和空间特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0702004.
- 11 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.
- 12 Shi Guang, Zhang Haiyang, Geng Zhongbo, *et al.*. Experiment of large field laser active detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 890-894.
时 光, 张海洋, 耿仲博, 等. 大视场激光主动探测系统实验[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 890-894.
- 13 Zhixiong Guo, Brian Hunter. Advances in ultrafast radiative transfer modeling and applications: A review[J]. *Heat Transfer Research*, 2013, 44(3-4): 303-344.
- 14 Brian Hunter, Zhixiong Guo. Conservation of asymmetry factor in phase function discretization for radiative transfer analysis in anisotropic scattering media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(5-6): 1544-1552.
- 15 Brian Hunter, Zhixiong Guo. Phase-function normalization for accurate analysis of ultrafast collimated radiative transfer[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2192-2201.
- 16 Brian Hunter, Zhixiong Guo. A new and simple technique to normalize the HG phase function for conserving scattered energy and asymmetry factor[J]. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 2014, 65(3): 195-217.
- 17 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.
- 18 Du Yongcheng, Yang Li. Confirm of scattering direction and comparison of two modes in Monte Carlo photons tracking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0829002.
杜永成, 杨 立. 蒙特卡罗追踪光子的散射方向确定及两种追踪模式比较[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0829002.
- 19 He Xianqiang, Pan Delu. *Ocean-Atmosphere: Coupling Vector Radiative Transfer Model and Remote Sensing Applications* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
何贤强, 潘德炉. *海洋-大气耦合矢量辐射传输模型及其遥感应用*[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.

栏目编辑: 史 敏