

高斯激光束 TEM_{00} 模散射信号模拟与分析

王莲芬, 赵选科, 左翔, 王金金, 孙红辉

(第二炮兵工程大学 物理室, 陕西 西安 710025)

摘要: 在广义 Mie 散射理论的基础上, 研究了离轴球型粒子对 TEM_{00} 基模高斯激光束的散射特性, 依据高斯波束在球坐标系的展开形式, 对展开系数的有限级数解形式进行了编程计算; 模拟了高斯光束在离轴球型粒子散射的情况下, 散射光强与粒径参数、折射率、散射角和散射粒子相对位置的关系; 对模拟结果进行了讨论, 并与平面波的散射规律进行了对比分析。结果显示: 高斯光束的散射光强分布呈现出了与平面波散射不同的规律, 但在大束腰半径条件下, 与平面波的散射规律有许多共同之处。

关键词: 散射特性; 数值模拟; 高斯光束

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2940-04

Simulation and analysis of Gauss laser beam TEM_{00} -mode scattering signal

Wang Lianfen, Zhao Xuanke, Zuo Xiang, Wang Jinjin, Sun Honghui

(Physics Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The scattering characteristics of off-axis spherical particles to Gaussian laser beam of TEM_{00} -mode were studied based on the general Mie scattering theory in this paper. According to the expanding form of Gaussian beam in the spherical coordinate system, the limited series solution forms of the expansion coefficient were programmed and calculated. In the case of the scattering of off-axis spherical particles to Gaussian laser beam, the relationship of scattered light intensity with the particle size parameter, refraction rate, scattering angle and relative location of scattering particles were simulated, then the simulation results were discussed and analyzed contrasting with the plane wave scattering patterns. The results show that the scattered light intensity distribution pattern of Gaussian beam is different from the plane wave scattering pattern, but in the case of big beam-waist radius, it has a lot of characteristics in common with the scattering pattern of plane wave.

Key words: scattering characteristics; numerical simulation; Gaussian beam

0 引言

自从利用激光作为通信、雷达遥感、测距和探测目标的手段以来, 大气粒子在传输中对光的散射和吸收作用就愈来愈受到重视。激光在传输中的散射特性, 对激光信号探测、空间定位和跟踪具有极为重要的影响, 因此, 研究激光在低空中的传输和散射信号特性, 分析散射光的空间分布特征, 具有重要的理论意义和军事应用价值^[1-2]。

在处理激光的散射问题时, 关键在于能否快速准确地计算其波束因子^[3-4]。波束因子 $\mathbf{g}_{nTE}^m, \mathbf{g}_{nTM}^m$ 是高斯光束在球坐标系的展开系数, Davis 在 1979 年给出了高斯波束用平面波角谱的展开形式^[5], 1980 年 Gouesbet 和 Grehan 等人根据 Davis 的结果, 利用 Bromwich 公式研究了高斯光束对均匀球的远区散射^[6], 提出了广义米氏理论, 给出了在轴球形粒子对高斯光束散射的有限级数计算方法, 该方法计算精度高, 但表达式复杂, 编程困难不宜求解。文中利用 Matlab 实现了对波束因子有限级数解的编程计算, 模拟了散射光强随粒径参数、折射率、散射角和散射粒子相对位置的关系。

1 离轴散射模型

设入射激光为单色近轴高斯光束, 束腰半径为 w_0 , 在均匀介质中沿 z 轴正向传播, 设入射激光为 TEM₀₀ 型基模高斯波束, 电场极化方向沿 ox 轴正向。假设高斯光束入射到一离轴球形粒子上并发生散射, 粒径参数为 α , 见图 1, 高斯光束的中心位于坐标系 $o-xyz$

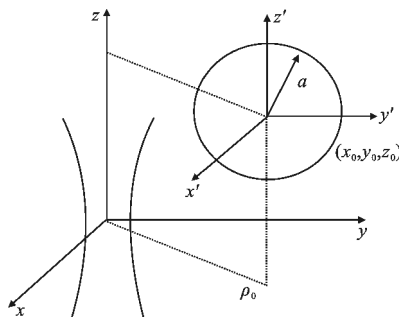


图 1 球型粒子对高斯光束的散射

Fig.1 Spherical particle's scattering for Gaussian laser beam

的原点处, 散射粒子的球心在 ox 坐标系的原点, 两坐标系的各坐标轴 ox 相互平行, $o'-x'y'z'$ 的坐标系

的原点 o' 在坐标系 $o-xyz$ 中的坐标是 (x_0, y_0, z_0) 。将入射光束的电磁场按矢量球谐函数展开, 其级数表达式如下:

$$\mathbf{E}^i = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \mathbf{E}_n [\mathbf{g}_{nTE}^m \mathbf{M}_{omn}^{(1)}(\mathbf{r}, \theta, \varphi) - i \mathbf{g}_{nTE}^m \mathbf{M}_{emn}^{(1)}(\mathbf{r}, \theta, \varphi)] \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^i = -\frac{k}{\omega \mu} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n i^n [\mathbf{g}_{nTE}^m \mathbf{M}_{emn}^{(1)}(\mathbf{r}, \theta, \varphi) + i \mathbf{g}_{nTE}^m \mathbf{M}_{omn}^{(1)}(\mathbf{r}, \theta, \varphi)] \quad (2)$$

根据电磁波的广义 Mie 散射理论, 其散射振幅函数如下^[7-9]:

$$S_1(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n^m \tau_n^{|m|}(\cos \theta) - i m a_n^m \pi_n^{|m|}(\cos \theta)] \exp(i m \varphi) \quad (3)$$

$$S_2(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n^m \tau_n^{|m|}(\cos \theta) + i m b_n^m \pi_n^{|m|}(\cos \theta)] \exp(i m \varphi) \quad (4)$$

其展开系数表达式为:

$$a_n^m = a_n \mathbf{g}_{nTM}^m, \quad b_n^m = b_n \mathbf{g}_{nTE}^m \quad (5)$$

其中 a_n, b_n 是球形粒子对平面波的散射系数, 表达式为:

$$a_n = \frac{\psi_n(\alpha) \psi'_n(M\alpha) - M \psi'_n(\alpha) \Psi_n(M\alpha)}{\xi_n(\alpha) \psi'_n(M\alpha) - M \xi'_n(\alpha) \Psi_n(M\alpha)} \quad (6a)$$

$$b_n = \frac{M \psi_n(\alpha) \psi'_n(M\alpha) - \psi'_n(\alpha) \Psi_n(M\alpha)}{M \xi_n(\alpha) \psi'_n(M\alpha) - \xi'_n(\alpha) \Psi_n(M\alpha)} \quad (6b)$$

距离散射体 \vec{r} 处的 P 点散射光强为:

$$I = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} I_0 [S_1(m, \theta, \varphi) \cdot S_1^*(m, \theta, \varphi) + S_2(m, \theta, \varphi) \cdot S_2^*(m, \theta, \varphi)] \quad (7)$$

式中: S_1^*, S_2^* 分别为 S_1, S_2 的共扼复数; M 为粒子相对于周围介质的折射率。高斯光束的散射系数 a_n^m, b_n^m 不仅与平面波的散射系数 a_n, b_n 有关, 还与描述高斯光束的关键系数波束因子 $\mathbf{g}_{nTM}^m, \mathbf{g}_{nTE}^m$ 有关。

2 数值计算

2.1 波束因子的计算

波束因子 $\mathbf{g}_{nTE}^m, \mathbf{g}_{nTM}^m$ 是高斯光束在球坐标系中的展开系数, 为待定系数, 是描述入射波特性的两组重要系数。在处理高斯光束的散射问题时, 关键就在于能否快速准确地计算其波束因子。

波束因子的有限级数解的形式复杂在此不再赘述, 是束腰半径、散射粒子位置和波数的复杂函数, 图 2 是根据有限级数解编程所得的波束因子的计算结果。

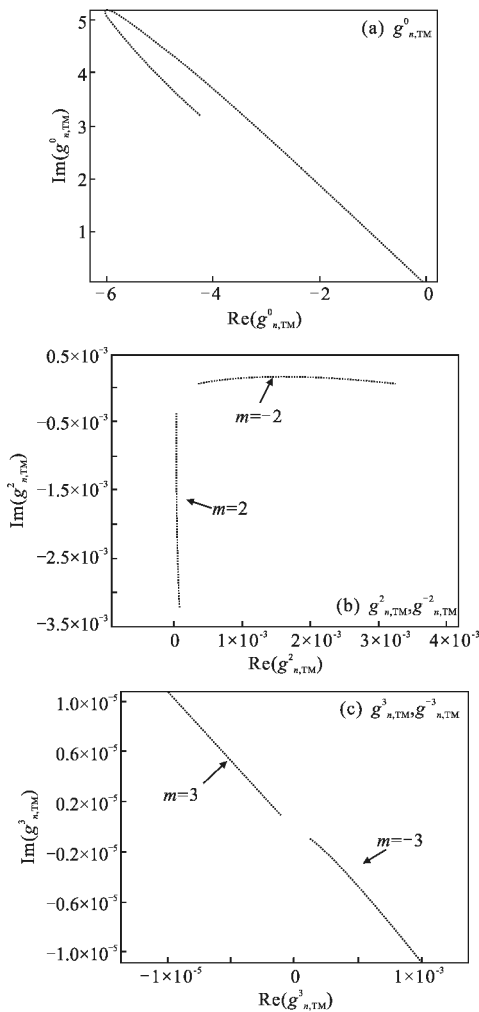


图 2 波束因子的有限级数解

Fig.2 Limited series solution of beam factor

在模拟中入射光的偏振化方向与入射面的夹角取 $\pi/4$, 因此模拟曲线与参考文献中局域近似解的计算结果相比,沿逆时针方向旋转了 $\pi/4$ 。

2.2 散射光强分布规律

利用上述波束因子的求解结果,对波长 1 064 nm 的激光散射进行了数值计算,得到了散射光强随粒径参数、折射率、散射角、散射粒子位置的变化规律,结果如图 3 所示。

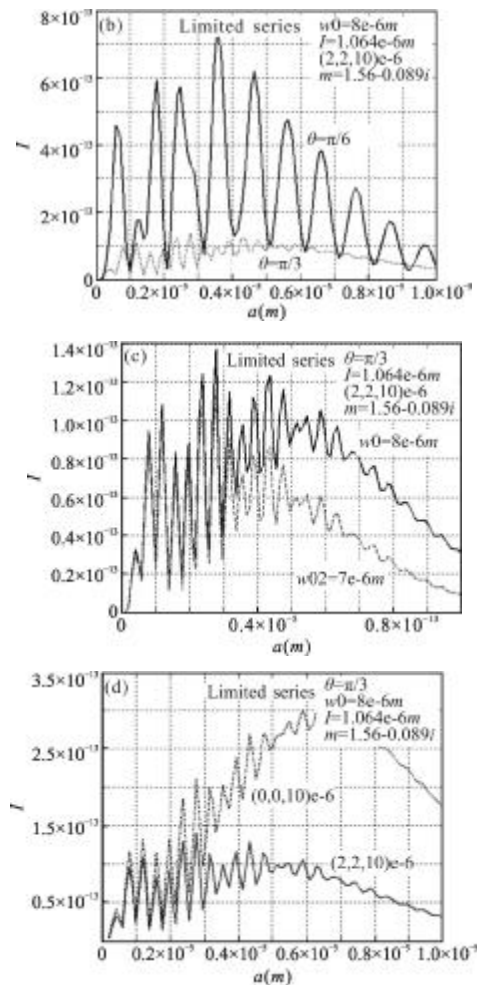
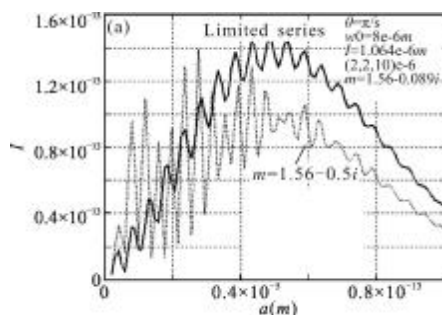


图 3 散射光强的变化规律

Fig.3 Scattering light intensity distribution pattern

3 结论

从模拟结果可以看出,粒径参数对散射光强分布规律影响明显,在小粒径处,散射光强随粒径参数的增加而急剧增大,随后周期性起伏变化,但散射光强在某一粒径参数处取得最大值,随后开始减小,起伏变化也相应减弱。

散射光强还与折射率、散射角、散射粒子的位置以及束腰半径有关。折射率的影响相对较小,见图 3(a); 散射光强随散射角的增大而减小,曲线变得平缓,见图 3(b); 粒径参数较小时,散射光强与束腰半径几乎无关,但在大粒径参数区,却随束腰半径的增大而增大,见图 3(c)。

由此看出,高斯光束的散射与平面波散射不同,但计算却发现现在大束腰半径($w_0 \approx 8\lambda$)条件下,与平面波的散射规律有许多共同之处。

参考文献:

- [1] Gu Suolin, Sun Huayan, Zhang Yongji, et al. Laser active detection of aerial target [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(7): 476-478. (in Chinese)
谷锁林, 孙华燕, 张永继, 等. 空中目标的激光主动探测 [J]. *激光与红外*, 2005, 35(7): 476-478.
- [2] Wang Zhihua, He Yinghong, Zuo Haoyi, et al. The correction of short-range Mie scattering laser lidar returns based on the Gaussian character of laser beam [J]. *Acta Physic Asinica*, 2006, 55(6): 3189-3192. (in Chinese)
王治华, 贺应红, 左浩毅, 等. 基于高斯光束特性的 Mie 散射大气激光雷达回波近场信号校正研究 [J]. *物理学报*, 2006, 55(6): 3189-3192.
- [3] Jean-Pierre Cariou. Off-axis detection of pulsed laser beams: simulation and measurements in the lower atmosphere [C]// SPIE, 2003, 5086: 129-138.
- [4] Grasso V, Neri F, Fucile E. Simple angle-resolved light scattering photometer using a photodiode array [C]//SPIE, 2506: 763-772.
- [5] Sylvain Lecler, Yoshitate Takakura, Patrick Meyrueis. Properties of a three-dimensional photonic jet [J]. *Optics Letters* October, 2005, 30(19).
- [6] Gouesbet G, Maheu B, Grhan G [J]. *Opt Soc Am*, 1988, A5: 147.
- [7] Wu Peng, Han Yiping, Liu Defan. Computation of Gaussian beams scattering for larger particle [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2676-2679. (in Chinese)
吴鹏, 韩一平, 刘德芳. 大粒子对高斯波束散射的数值模拟 [J]. *物理学报*, 2005, 54(6): 2676-2679.
- [8] Rao Ruizhong. Probability analysis of effects of optical properties of atmosphere on laser engineering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 583-587. (in Chinese)
饶瑞中. 大气光学特性对激光工程影响的概率分析 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 583-587.
- [9] Doicu A, Wriedt T. Computation of the beam-shape coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory by using the translational addition theorem for spherical vector wave function [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(13): 2971-2978.