

doi:10.3788/gzxb20144309.0914001

包容性非球形气溶胶粒子的散射特性 及其对激光传输的影响研究

李华, 王彦斌, 邹前进, 齐凤杰, 王敏, 黄成功

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳, 471003)

摘 要: 针对局部地域大气气溶胶的生成、演化的特点, 在分析典型对称结构的包容性非球形气溶胶粒子的形态学特征基础上, 利用 T 矩阵法进行了椭球形粒子含非球形粒子的包容性粒子光散射特性计算和分析. 以 1 064 nm 波长激光传输为例分别计算了两种典型分布状况的包容性非球形粒子的散射相函数等散射特性, 并针对稠密气溶胶大气路径上激光传输的多散射现象, 利用蒙特卡罗方法进行了典型大气状况下包容性粒子多次散射对激光信号大气传输中脉冲展宽的应用分析, 在传输 3 km 和 5 km 距离时多次散射效应造成激光脉冲峰值半宽分别为 3 μ s 和 4 μ s 左右. 指出气溶胶的基本散射特性与粒子的形态学特征、尺度因子、化学成分及颗粒密度等有密切的关系, 其散射特性对激光信号的大气传输具有明显的影响.

关键词: 气溶胶; 激光传输应用; T 矩阵法; 包容性非球形粒子; 形态模型; 散射特性; 脉冲宽度;

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0914001-6

Study of Scattering Characters of Coated Non-spherical Aerosols Particles and its Effects on the Laser Signals Propagation

LI Hua, WANG Yan-bin, ZOU Qian-jin, QI Feng-jie, WANG Min, HUANG Cheng-gong
(Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Based on the characters of aerosols' generation and evolution in partial areas, the morphology characters of the coated axisymmetric, non-spherical aerosols particles with typical symmetrical structure were studied. A T -matrix method to calculate the coated aerosols particles' scattering characters was introduced to the calculation of the scattered characters of a non-spherical particle coated by an ellipsoidal particle. As an example, the two typical distributions of the coated aerosols' scattering phase function were provided in propagation of laser wavelength 1 064 nm. The results were applied to the multi-scattering phenomena in laser signal propagations through dense aerosols, with the use of the Monte Carlo ray tracing method in the scattering and the applications of laser signals' breadth calculation in atmosphere. Because of the multi-scattering, the laser signals' pulse width enlarged 3 μ s and 4 μ s corresponding to distance 3 km and 5 km. At last, it was pointed out that the aerosols' scattered characters are influenced by the morphology characters, typical size, chemical components, the densities of the particles etc., the aerosols' scattered characters influence obviously on the laser signal's atmosphere propagation in dense aerosols.

Key words: Aerosols; Laser propagation applications; T -matrix method; Coated non-spherical particles; Morphology model; Scattered characters; Pulse breadth

OCIS Codes: 140.3460; 290.5850; 290.2200; 350.4990; 280.1310; 280.3420

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60677041)和总装备部重点课题项目(No. 2009SY3300005)资助

第一作者: 李华(1969-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为激光信号传输、光电检测技术. Email: lihua0@sohu.com

收稿日期: 2013-12-25; 录用日期: 2014-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

激光信号在大气中的远场传输效应是随激光器自身的不稳定性、激光器到目标的距离、大气传输路径的大气状况等诸多因素变化的一个复杂的时变量,该过程涉及大气传输路径上各种大气粒子和气溶胶粒子的吸收、散射等复杂效应^[1-2]. 针对大气气溶胶的散射和吸收对激光信号传输的影响研究多利用经验公式或者固定典型大气模式^[3-5], 如美国 Hanscom 空军基地地球物理实验室 (AFGL) 开发的 1989 年 2 月公布的低分辨率大气辐射传输软件包 (LOWTRAN7) 版本, 采取了 0~2 km 高度区间的乡村气溶胶 (Rural)、城市气溶胶 (Urban)、海洋气溶胶 (Maritime) 等几种模式的典型化处理; 中等大气辐射传输软件包 (MODTRAN) 以及“高分辨率大气辐射传输模型”的大气辐射传输软件包 (FASCODE) 的分子、气溶胶、雾、雨模型也采用 LOWTRAN7 模型^[3,5].

在精度要求不高的情况下, 激光在大气中传输一定距离后的远场功率可以不考虑实际粒子的组成分布和散射特性的影响, 按照朗伯-比尔 (Lambert-Beer) 定律进行求解^[4]. 在涉及粒子的组成分布和散射特性的计算中按照球形均匀粒子近似模型把大气中的霾、雾以及人工烟幕中的水融性物质、水珠、灰尘等粒子进行简化模拟, 利用洛伦兹-米 (Lorenz-Mie) 球形粒子散射理论来进行其散射特性的计算^[3,5].

实际上自然界存在的气溶胶粒子往往不是均匀、球形的, 实际观测表明^[5-6], 大气气溶胶粒子的形状具有复杂的形态: 从球形水滴、准球形矿物粒子到内包含等极其不规则的形状. 气溶胶粒子尺寸一般在几纳米到几十微米之间, 以固体、液体或固体液体混合状态存在, 有均质和非均质多种复杂形态和组成成分. 1983 年国际气象与大气物理学会提出无云大气的气溶胶标准辐射大气模型, 把大气气溶胶按性质不同分为沙尘性粒子、可溶性粒子、海洋性粒子、煤烟、火山灰和 75% 硫酸水溶液滴等^[3,5-6].

对于不规则形状的气溶胶粒子, 使用旋转椭球模型能够进行光学特性计算和替代^[1-2,7], 对于非均匀粒子, 尤其是两种或两种以上类型的气溶胶粒子融合、包容的情况, 其运算较为复杂. 但是当空气中水分含量过高、大气温度较低的时候, 这种气溶胶粒子彼此融合、相互包容的情形大量存在^[3-4,8-9]. 外包容粒子可以为水、硫酸盐粒子、磷酸盐粒子等, 内包容粒子可以为强吸收的燃烧剩余物、碳黑气溶胶粒子、不吸收的灰尘气溶胶粒子等. 在不规则形状的气溶胶粒子散射特性研究方面, Oleg Dubovik 等^[7] 分析了沙漠沙尘粒子的非球形特性和利用椭球近似模型进行不规则形状的气溶胶粒子散射特性方法的简化方法, 并指出非球形和球

形粒子散射特性的差异; Arturo Quirantes 等^[8-9] 利用 T 矩阵的方法进行了相互包容的非均匀粒子散射特性的理论分析和相关研究; 孙贤明等^[1] 分析了沙尘暴粒子非球形模型, 指出用单一形状的粒子进行多次散射计算和光学厚度反演将带来很大误差和影响; 刘西川等^[2] 考虑雨滴的非球形效应确定降雨的近似椭球模型和归一化谱分布, 分析了非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响; 范萌等^[10] 对非球形气溶胶粒子短波红外散射特性研究表明, 球形粒子与等体积的非球形单粒子及团簇粒子在散射特性方面存在明显差异, 指出实际应用中需考虑气溶胶粒子的非球形特性; 卫晓东等^[11] 结合 T 矩阵方法计算了太阳短波到红外谱段具有一定形状和谱分布的非球形沙尘粒子光学特性.

大气中气溶胶的分布特性与基于典型经验的理论模式的特征有显著差别的特点, 从气溶胶形成和演化的形态学角度、从激光与气溶胶作用机理角度研究大气散射特性问题是提高大气辐射传输计算的重要途径^[12-15]. 本文结合实际环境气溶胶粒子中包容性非球形粒子的形态学特征, 开展对此类气溶胶粒子在吸收、散射和对激光传输的影响分析, 进行激光实际大气路径上大气传输效应理论与应用研究.

1 气溶胶粒子的形态特征分析

一般大气环境中气溶胶以自然雾和人工烟幕为主, 这里主要针对典型包容性粒子的形态学特征进行分析. 从气象学角度来看, 自然雾的形成与过饱和水汽含量有关, 通常凝聚过程发生在空气冷却、辐射冷却、对流冷却等条件下水汽接近饱和状态的时候, 水或冰晶凝聚到吸湿性凝聚核上从而在空气中形成云、雾等现象, 部分人工烟幕也是由化学反应的吸水性产物组成^[4], 如红磷等烟幕是利用形成的吸水性微粒和大气中的水分子形成水溶性液滴, 其尺度分布取决于相对湿度, 其主要特点是最终形成的烟幕质量大于原始干剂的质量, 烟幕的产生因子较高得以广泛应用. 此外, 雾油是油类液体的雾化形成的, 在空中也以液滴的形式存在^[4].

当空气中水分含量过高, 大气温度较低的时候会大量存在包容性粒子, 实际上气溶胶粒子往往不是均匀球形而是存在各种各样的不规则形状和复杂形态, 使用旋转椭球的形态学近似模型计算非球形粒子与实际不规则粒子有较好的近似^[6-7,11]. 本文主要研究具有轴对称几何结构、被包含物与外包物具有不同的物质特征 (不同的复折射率指数)、不同的几何形态的包容性粒子. 两种不同成分和形状的气溶胶粒子完全包容的典型情形如图 1.

图 1 中, 外包容和内核的几何模型均采用旋转椭球模型, 对于内核与包容外壳可以用等效体积模型的椭球半径 r_e 和椭球扁率 $\epsilon = b/a$ 来描述, 即

$$r(\varphi) = r_e^{1/3} [\epsilon^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi]^{-1/2} \quad (1)$$

这里 φ 为极坐标的旋转角。

设内核椭球几何中心为坐标轴原点,外壳的椭球几何中心与内椭球几何中心之间的距离为 l ,外包物椭球的旋转轴半径为 a , $p=l/a$,则外包容物的椭球表面可以描述为

$$r(\varphi) = a [p \cos^2 \varphi + (1 - p^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}] \quad (2)$$

在内核是被完全包容情况下,对于内外椭球的尺度因子 $q = R_{\text{inc}}/R_{\text{ext}}$,满足完全包容几何约束条件为 $p+q < 1$ 。这里,包容外壳可以为水、硫酸盐粒子、磷酸盐粒子等,内包容粒子可为强吸收燃烧剩余物、碳黑气溶胶粒子、弱吸收灰尘气溶胶粒子等。

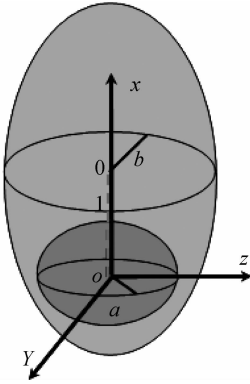


图1 包容性非球形气溶胶粒子形态学模型

Fig. 1 Sketch of coated non-spherical aerosol particle's morphological model

2 包容性非球形光散射理论分析

大气气溶胶通过散射和吸收作用强烈地影响可见光和近红外波段的辐射传输。粒子散射满足单散射假设条件:独立散射,即大气分子和气溶胶粒子之间的距离足够宽(粒子之间距离大于粒子直径三倍),符合粒子散射远场条件;各散射光之间的干涉效应无严格的位相关系,散射不受其他粒子影响;弹性散射,即散射对光波频率没有影响。

这里利用 \mathbf{T} 矩阵的方法计算有包容外壳的气溶胶粒子的散射特征^[8]。一般地,介质的单粒子散射特性通过单个粒子的散射截面 σ_{scn} 、吸收截面 σ_{abs} 与入射和散射光波斯托克斯(Stocks)矢量关联的 4×4 散射相矩阵 $\mathbf{P}(\theta)$ 来表述。Mueller 矩阵(散射矩阵)描述了散射物质对光束的体散射效应,入射波和散射波场的 Stocks 矢量 $\mathbf{I}_i, \mathbf{I}_s$ 关系为^[2,5]

$$\mathbf{I}_s = \frac{C_{\text{scn}}}{4\pi R^2} \mathbf{F}(\theta) \mathbf{I}_i \quad (3)$$

式中, R 是散射体与探测器间距离, C_{scn} 散射截面。

利用 Mueller 矩阵和散射截面来完整地表征散射的统计学特征,对于任意取向轴对称结构的粒子有

$$\mathbf{F}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{21}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{21}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ 散射角度,这里散射相矩阵的因子 $F_{11}(\theta)$ 的归一化形式是散射相函数,描述伴随散射角度 θ 变化的散射光强度分布情况。散射相函数 $\mathbf{P}_{11}(\theta)$ 定义的归一化条件为

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} F_{11}(\theta) = 1 \quad (5)$$

散射矩阵元素的计算,使用的分解因子为^[2,5]

$$F_{11}(\theta) = \sum_{s=0}^{s_{\text{max}}} \alpha_1^s P_{00}^s(\cos \theta) \quad (6)$$

$$F_{22}(\theta) + F_{33}(\theta) = \sum_{s=2}^{s_{\text{max}}} (\alpha_2^s + \alpha_3^s) P_{22}^s(\cos \theta) \quad (7)$$

$$F_{22}(\theta) - F_{33}(\theta) = \sum_{s=2}^{s_{\text{max}}} (\alpha_2^s - \alpha_3^s) P_{22}^s(\cos \theta) \quad (8)$$

$$F_{44}(\theta) = \sum_{s=0}^{s_{\text{max}}} \alpha_4^s P_{00}^s(\cos \theta) \quad (9)$$

$$F_{21}(\theta) = \sum_{s=2}^{s_{\text{max}}} \beta_1^s P_{02}^s(\cos \theta) \quad (10)$$

$$F_{34}(\theta) = \sum_{s=2}^{s_{\text{max}}} \beta_2^s P_{02}^s(\cos \theta) \quad (11)$$

式中,与传输矩阵 \mathbf{T} 矩阵相关的扩展因子 α_i^s, β_j ,其计算方法参考文献[1]。在 \mathbf{T} 矩阵方法近似理论中,利用球谐函数矢量 M_{nm}, N_{nm} 系列来进行入射电磁场和散射电磁场 Maxwell 方程简化计算,即

$$\mathbf{E}_{\text{inc}}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [a_{nm} R_g M_{nm}(kr) + b_{nm} R_g N_{nm}(kr)] \quad (12)$$

$$\mathbf{E}_{\text{scn}}(r) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{nm} M_{nm}(kr) + q_{nm} N_{nm}(kr)] \quad (13)$$

利用转换 \mathbf{T} 矩阵建立入射场系数 a_{nm}, b_{nm} 与散射场系数 p_{nm}, q_{nm} 之间的关系。

$$p_{nm} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mm'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{12} b_{m'n'}] \quad (14)$$

$$q_{nm} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mm'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mm'n'}^{22} b_{m'n'}] \quad (15)$$

\mathbf{T} 矩阵与粒子尺度、外形、组成成分和随机朝向等因素有关,而与入射场系数与散射场系数的表述方法无关。可以分别计算散射系数再按照入射和散射方向平均的方法计算总的粒子散射。 m_1 为内核的折射率指数, m_2 为外包容物的折射率指数。在计算中,定义光束传播方向为 z 方向,轴对称型包容性粒子的 \mathbf{T} 矩阵形式表述为^[8]

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = -\mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^{-1} = - \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}^{-1} = -[\mathbf{B}_2 + \mathbf{B}\mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{T}_1] \cdot [\mathbf{A}_2 + \mathbf{A}\mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{T}_1]^{-1} \quad (16)$$

利用内核的变换矩阵, $T_1 = B_1 * A_1^{-1}$ 为定义内核的折射率为 m_1/m_2 外包物折射率为 1 时只计算内核的均匀物质散射传输的传输矩阵情况; 而 A_2 和 B_2 为定义内核的折射率为 m_2 外包物折射率为 1 时, 只计算 $-B_2 * A_2^{-1}$ 外包物散射传输的传输矩阵, 计算中波数取 $m_2 k_0$. AA_2 、 BB_2 矩阵的计算是利用 Hankel 函数代替 Bessel 函数的计算结果. 这样, 可以利用 (A_1, B_1) 矩阵计算内核的散射系数而利用 $(A_2, B_2, AA_2,$

$BB_2)$ 计算外包容物的散射系数.

气溶胶生成和存在状况的复杂性, 气溶胶物质的基本特性如粒子的尺度因子、化学成分及颗粒密度等因素都是随时间空间变化的复杂量. 不失一般性, 本文在对水包烟灰类型的气溶胶单散射的散射相函数进行数值模拟中, 给定两个仿真序列分别进行数值计算, 参数选择如表 1.

表 1 计算机数值模拟的参数选择

Table 1 The parameters in numerical simulations

Cases	Inner ref. index	Outside ref. index	Outside eccentricity	Inner eccentricity	Outside radius	Inner radius	Ratio of size parameter
Case 1	1.73+i0.43	1.326	0.50	0.50	0.2128	0.0213	0.10
Case 2	1.73+i0.43	1.326	0.50	0.50	2.128	0.0532	0.025

根据分析结果, 分别采用仿真序列 1、2 的参数进行包容性非球形粒子光散射的粒子散射矩阵计算, 仿真序列 1、仿真序列 2 的 Mueller 散射矩阵的数值计算结果如图 2 和图 3.

可以看出, 不同的粒子尺度和尺度因子比率引起的 Mueller 散射矩阵以及散射相函数的差异较大. 当粒子尺度较小的时候, 散射相函数呈现明显的均匀散射的特征, 且具有较平滑的曲线; 而当粒子尺度参数较大的时候, 散射相函数呈现明显的前向、后向散射增强的散射特征.

可以看出, 不同的粒子尺度和尺度因子比率引起

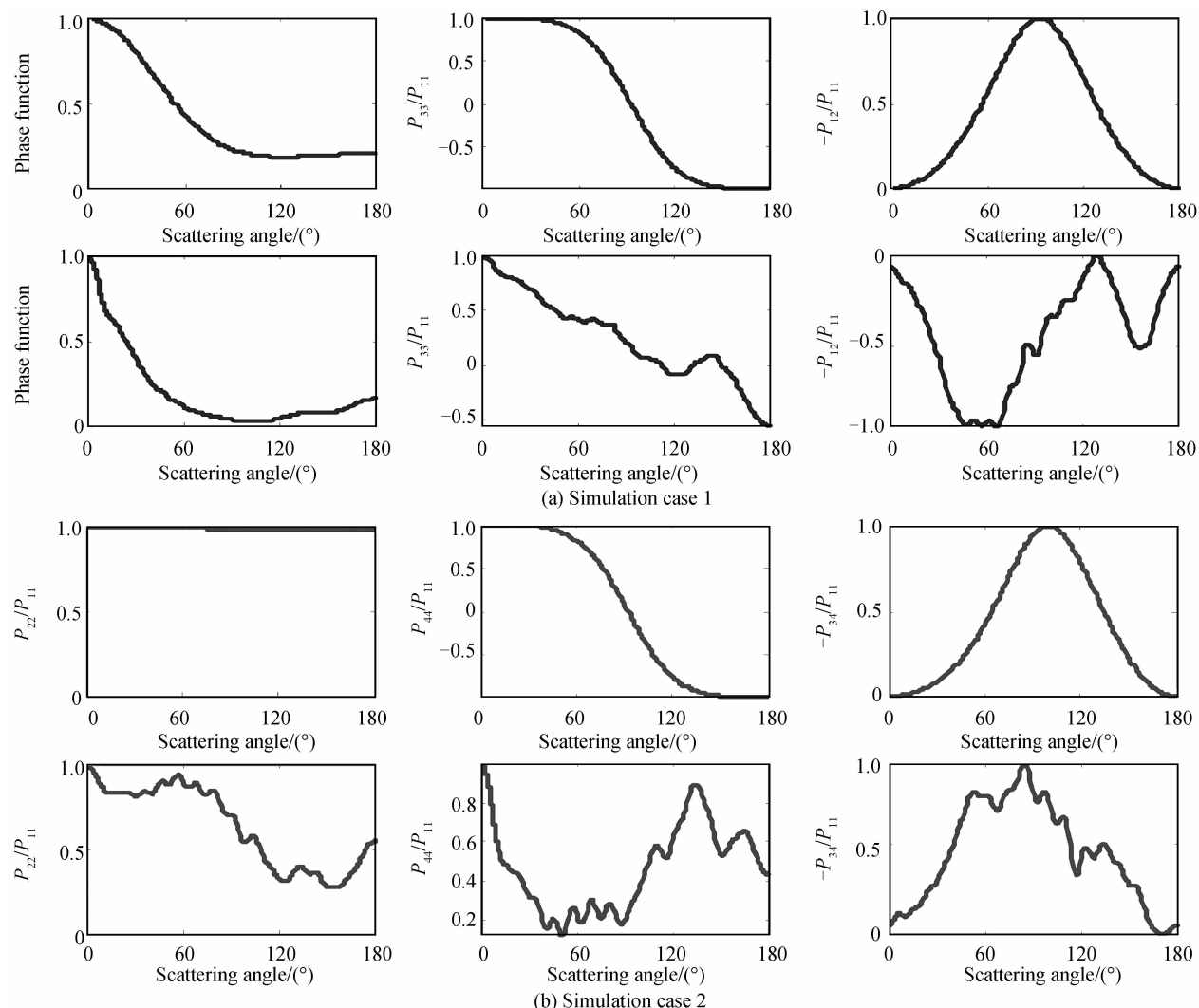


图 2 仿真序列 1、仿真序列 2 散射矩阵的数值模拟

Fig. 2 The numerical results of the scattering matrix of simulation case 1 and simulation case 2

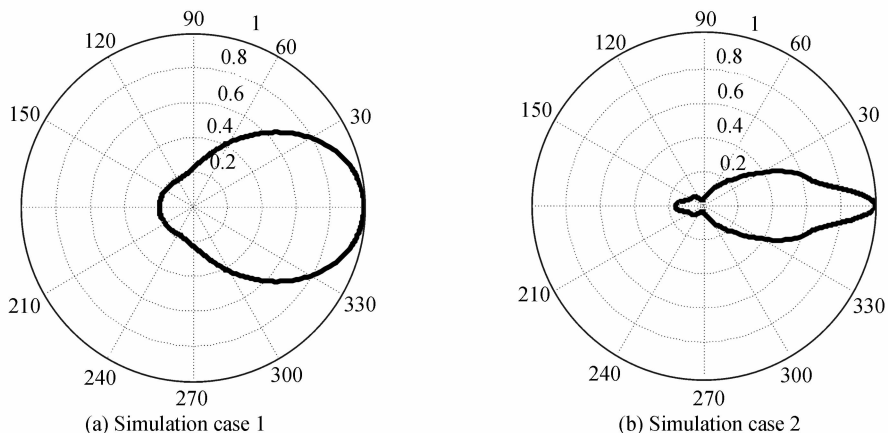


图3 仿真序列1、仿真序列2对应的散射相函数极坐标图

Fig. 3 The numerical results of the scattering phase functions of simulation case 1 and case 2 in polar coordinate system

3 激光信号传输的数值计算和多次散射的蒙特卡罗方法仿真分析

激光脉冲宽度对激光信号探测有重要影响^[16-17],当激光在比较稀薄大气气溶胶介质中传播时且传播距离较短、接收视场较窄的时候,激光信号的传输将只受单散射的影响,可以不考虑多次散射的情形.当大气中存在稠密气溶胶粒子时激光信号的传播则必须考虑多次散射的影响,本节利用前面的计算结果,将模拟条件进一步限定,利用蒙特卡罗光子追迹方法进行稠密介质中传输模拟和相应分析.

利用蒙特卡罗方法模拟光在雾中的传输过程,通过追迹每一个光子在雾中的行迹,在每次遭遇中建立一个随机的中间输出值,并把这次的输出值作为下一次遭遇的输入值.依次循环,直到最后输出状态为止.对于非球型粒子来说,直接使用散射相函数进行散射后光子行进方向概率计算更为科学.根据前边的计算结果进行散射角 θ 的判断,对于归一化散射相函数

$$P(\cos \theta) = \int_0^{\cos \theta} P_{11}(\mu) d(\cos \theta),$$

$$P(\mu) = \int_0^{\mu} P_{11}(\arccos \mu) d(\mu),$$

式中 $\theta = \arccos P^{-1}(\epsilon)$, ϵ 是范围为 $0 \sim 1$ 的随机数.

如果此时的光子运动方向正好在探测器的视场内,则直接进入探测器,否则要继续进行光子运动方向和生存概率的计算.若入射到每个粒子的单散射光再遇到另外一个粒子时会再次发生散射和继续发生多次散射.这一现象是浓密气溶胶中影响激光大气辐射传输的重要过程.当传播距离较长、接收视场较宽的时候多散射的影响会更加明显.

作为应用,利用蒙特卡罗方法模拟在激光在稠密介质中传输的多次散射效应对激光脉冲宽度的影响情形.对应某气象条件下的仿真初始条件:激光波长

1 064 nm,激光束散角 5 mrad,探测器半径 20 mm,探测器张角 30°,传播距离分别取 3 km 和 5 km,多散射次数设定为 5 次,采用 100 万个光子进行蒙特卡罗追迹计算,得到结果如图 4 和图 5.

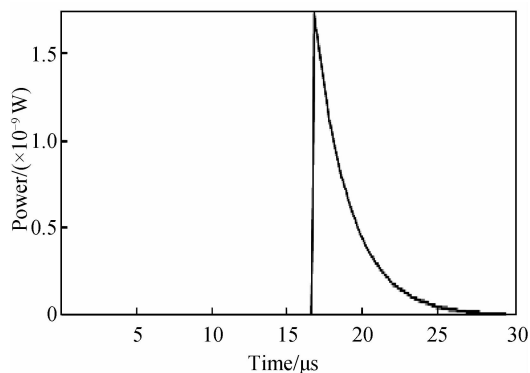


图4 激光信号传播距离 3 km 处多次散射效应对应的时 间-脉冲功率曲线

Fig. 4 The curve of time-pulse power corresponding to multi-scattering with the distance of 3 kilometers

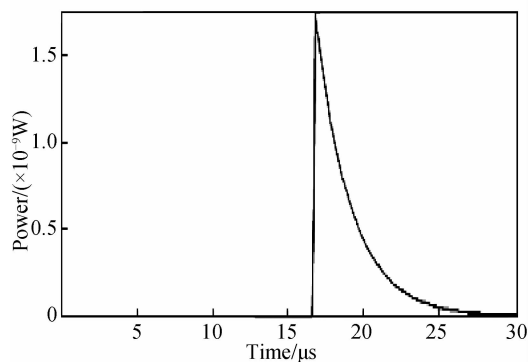


图5 激光信号传播距离 5 km 处多次散射效应对应的时 间-脉冲功率曲线

Fig. 5 The curve of time-pulse power corresponding to multi-scattering with the distance of 5 kilometers

根据对稠密介质中多散射效应的蒙特卡罗计算结果,随着传输距离的增加,光子由于多次散射效应的影响需要跨越的时间增加,在 3 km 和 5 km 的传输距离,当大量光子到达的时刻脉冲前沿的滞后从 10 μs 扩展到 16 μs ,对应的脉冲峰值半宽分别为 3 μs 和 4 μs 左右.分析脉冲宽度增加的主要原因,因为虽然大量光子直接到达探测位置形成脉冲前沿,但是由于多次散射现象的存在,相当数量的光子需要走过额外的路径,且路径各不相同,形成了脉冲后沿的展宽.伴随传播距离的增加,直接到达探测位置处的光子数目因发生散射和吸收而减少,宏观上表现为探测器接收到的单位面积激光脉冲功率的减少.随着到达探测器的不同的光子需要跨越的总距离增加,各个光子经过多次散射后各自跨越的距离也变得越来越复杂,表现为脉宽随距离的增加而增加.

4 结论

针对气溶胶生成、演化复杂性的特点,在对典型非球形气溶胶粒子的形态学特征分析的基础上,计算了对称结构的包容性非球形气溶胶散射参数,并通过蒙特卡罗计算并分析了在稠密介质中多散射效应引起的激光远场传输的脉冲展宽的物理机理,开展了稠密介质中多散射效应的传输和应用方面的初步研究.分析得出:激光信号脉冲宽度增加的主要原因是因为多次散射效应造成相当数量的光子需要走过额外各不相同的路径,形成了脉冲后沿的展宽.对于 3 km 和 5 km 传输距离,脉冲峰值半宽分别为 3 μs 和 4 μs 左右,随着传输距离的增加光子由于多次散射效应的影响需要跨越的时间增加,脉冲到达前沿滞后从 10 μs 扩展到 16 μs .通过数值计算,指出气溶胶物质的基本散射特性与粒子的尺度因子、化学成分及颗粒密度有密切关系,自然因素和人为因素生成的大气雾霾、气溶胶、扬尘和烟幕等气溶胶粒子中大部分气溶胶粒子具有较大的尺度因子,其大量存在对激光信号大气传输的影响是明显的.本文对于提高对典型非球形气溶胶粒子散射效应模拟精度和大气中多次散射计算,具有一定参考意义.

参考文献

- [1] SUN Xian-ming, WANG Hai-hua, LIU Wan-qiang, *et al.* Nonspherical model for sand dust storm and its application to the research of light multiple scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5):1506-1510.
孙贤明,王海华,刘万强,等.沙尘暴粒子的非球形模型及其对激光的多次散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5):1506-1510.
- [2] LIU Xi-chuan; GAO Tai-chang; LIU Lei. Effect of rainfall on laser transmission attenuation based on non-spherical raindrops [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1):167-173.
刘西川,高太长,刘磊.基于非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(1):167-173.
- [3] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012:87-93.

- 113-123,145-155.
- [4] 姚禄久,高钧麟,肖凯涛,等.烟幕理论与测试技术[M].北京:国防工业出版社,2004年第一版.17-27,51,141.
- [5] 廖国男.大气辐射导论(第2版)[M].郭彩丽,周诗健译.北京:气象出版社,2004:174-181.
- [6] ALEXANDER A. Kokhanovsky. Light scattering reviews (single and multiple light scattering) [M]. Paxis Publishing Ltd. Chichester, UK. 2006. 433-439.
- [7] OLEG Dubovik, ALEXANDER S. TATYANA L. *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**:D11208.
- [8] ARTURO Quirantes, STEWART Bernardb. Light-scattering methods for modelling algal particles as a collection of coated and/or nonspherical scatterers [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, **100**:315-324.
- [9] ARTURO Quirantes. A T-matrix method and computer code for randomly oriented, axially symmetric coated scatterers[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **92**:373-381.
- [10] FAN Meng, CHEN Liang-fu, LI Shen-shen, *et al.* Scattering properties of non-spherical particles in the CO₂ shortwave infrared band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(20):204202.
范萌,陈良富,李莘莘,等.非球形气溶胶粒子短波红外散射特性研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(20):204202.
- [11] WEI Xiao-dong, ZHANG Hua. Analysis of optical properties of nonspherical dust aerosols[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5):0501002.
卫晓东,张华.非球形沙尘气溶胶光学特性的分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5):0501002.
- [12] YANG Hong-long, LI Lei, YANG Su, *et al.* The measurement of aerosol optical properties over Shenzhen [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12):1427-1434.
杨红龙,李磊,杨溯,等.深圳城市气溶胶物理光学特性观测研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12):1427-1434.
- [13] LEI Cheng-xin, FENG Dong-tai, WU Zhen-sen. Influence of impurity on radiative properties of randomly oriented cluster agglomerates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7):1055-1060.
类成新,冯东太,吴振森.掺杂对随机取向团簇粒子辐射特性的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7):1055-1060.
- [14] FAN Wei, WANG Yi, RAO Rui-zhong. Measurement of the atmospheric transmittance from visible to near infrared bands [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3):402-407.
范伟,王毅,饶瑞中.可见到近红外波段整层大气光谱透过率的测量研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3):402-407.
- [15] BIAN Jian, CAO Ya-nan, XU Meng-chun, *et al.* Simultaneous determination of aerosol optical thickness and exponent of Junge power law over East China Sea based on MODIS data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1):101003.
边健,曹亚楠,徐梦春,等.利用MODIS数据同时反演中国近海海域气溶胶光学厚度和Junge谱指数[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1):101003.
- [16] HAN Biao, LIU Ji-Fang, ZHOU Shao-Jie, *et al.* Influence of laser pulse width on backward detection of long-distance wake bubbles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):1372-1375.
韩彪,刘继芳,周少杰,等.激光脉冲宽度对远距离尾流气泡后向检测的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9):1372-1375.
- [17] ZHANG Jing-guo, LIANG Xiao-geng, LIU Jian-xin, *et al.* Effect of pulse width on cloud-and-fog backscattering signal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12):1422-1426.
张京国,梁晓庚,刘建新,等.脉冲宽度对云雾回波的影响研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12):1422-1426.