

•测试、试验与仿真•

基于正态对数谱的1.06 μm 激光大气散射特性研究

刘宗新, 郝本功

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要:针对当前在大气散射计算中,广泛采用Junge谱带来的对近地面气溶胶粒子分布估计不准确的问题,采用对近地面气溶胶粒子分布描述较好的正态对数谱,建立大气激光散射模型,对1.06 μm 激光的大气散射的空间和时间特性进行仿真分析。结果表明,散射强度随离轴距离的增加,呈先快速减弱,再缓慢减弱的趋势;在离轴位置上,探测光强主要来自距探测点较近的位置;探测光信号峰值随离轴距离的增加逐渐后移,而且脉宽逐渐增加。

关键词:正态对数谱;Mie散射;空间特性;时间特性

中图分类号:TN241

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-06-0071-05

Research on 1.06 μm Laser Atmosphere Scattering Characteristics Based on Normal Logarithm Distribution

LIU Zong-xin, HAO Ben-gong

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: To solve the problem that the Junge distribution widely used in atmosphere scattering calculation makes the estimation of aerosol particles distribution inaccurate near the ground, the normal logarithm distribution which can accurately describe the aerosol particles distribution near the ground is adopted. And a laser atmosphere scattering model is established to simulate and analyze the space and time characteristics of 1.06 μm laser atmosphere scattering. Results show that the scattering intensity has a trend of sharply decreasing then slowly decreasing with the increasing of off-axis distance. The detection scattering intensity mainly comes from the position near the detection point on off-axis. The peak of the detection scattering pulse has a backward movement with the increasing of off-axis distance and pulse width increases gradually.

Key words: normal logarithm distribution; Mie scattering; space characteristic; time characteristic

随着光电技术的发展,激光在制导、测距、通信等技术中广泛使用。激光在大气中传播时,受到大气分子、气溶胶粒子及大气湍流的影响,产生散射、衰减及光强波动等现象,而1.06 μm 激光正处于大气窗口,大气分子的吸收和散射作用影响不大,与激光波长尺度相当的气溶胶粒子的吸收和大气湍流的影响也可以忽略,对其影响较大的主要是气溶胶粒子的散射。基于此,激光设备中多采用1.06 μm 为工作波长,大气的主要因素为大气气溶胶的散射

效应。许多学者对1.06 μm 激光的大气散射特性进行了研究^[1-4],获得了1.06 μm 激光的空间散射特性,但是这些研究在计算中广泛采用了Junge谱作为气溶胶的分布谱,而研究表明,Junge谱只适用于较清洁的大气和小粒子,不适应当前近地面环境下的散射特性计算。文中采用对近地面气溶胶描述较好的正态对数谱^[5]作为粒子分布谱,计算1.06 μm 激光在近地面的散射特性,并对散射光的空间和时间分布进行分析。

收稿日期:2017-10-30

作者简介:刘宗新(1973-),男,辽宁黑山人,学士,高级工程师,研究方向为光电工程;郝本功(1984-)男,山东寿光人,博士,工程师,研究方向为光电工程。

1 气溶胶粒子谱分布

气溶胶粒子的尺度分布,直接反映气溶胶的物理特性。不同类型的气溶胶尺度分布差别较大,但就平均而言,其具有一定的分布形式。常用的粒子谱分布有三种,幂指数分布、修正的 Γ 谱、对数正态谱分布。幂指数分布适用于环境污染不严重的陆地;修正的 Γ 谱适用于海洋型、大陆型等气溶胶模式;对数正态分布适用于范围较广,一般情况下的粒子分布都可用它来描述,因此文中的研究采用该分布,其表达式为^[5]

$$n(r) = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} r \lg \sigma_i \ln(10)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg r - \lg r_{\text{mod},i}}{\lg \sigma_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中, N_i 是单位体积内组分*i*的粒子总数; $r_{\text{mod},i}$ 和 σ_i 为平均半径和标准差。

根据 Hess 的统计,几种典型的大气气溶胶模式如表 1 所示。

表 1 几种典型气溶胶模式下的组分

模式	气溶胶组分			总计
	不可溶性	可溶性	烟灰	
一般陆地型	0.4	7 000	8 300	15 300
污染陆地型	0.6	15 700	34 300	50 000
城市型	1.5	28 000	130 000	158 000

相应的几种大气气溶胶组分粒子谱分布的特征参数如表 2 所示。

表 2 气溶胶组分的特征参数

组分	σ	$r_{\text{mod}}/\mu\text{m}$	$r_{\text{min}}/\mu\text{m}$	$r_{\text{max}}/\mu\text{m}$
不可溶性	2.51	0.471	0.005	20
可溶性	2.24	0.021 2	0.005	20
烟灰	2.00	0.011 8	0.005	20

几种气溶胶组分在 1.06 μm 波长对应的折射率如表 3 所示。

表 3 气溶胶组分的折射率

组分	不可溶性	可溶性	烟灰
折射率	1.52-0.008i	1.52-0.017i	1.75-0.440i

2 数学模型

气溶胶粒子大多为非球形,目前无法利用波动

方程求得解析解。由于气溶胶尺度较小,因此可以将气溶胶粒子等效为球形粒子,利用 Mie 散射理论计算。根据 Mie 散射理论,单个气溶胶粒子的散射强度为^[1-4]

$$I_s = I_0 \cdot \frac{\lambda^2}{8\pi^2 L^2} \left(|S_1(\cos \theta)|^2 + |S_2(\cos \theta)|^2 \right) \quad (2)$$

其中, I_0 为入射到该粒子的光强; L 为观察点与粒子之间的距离; θ 为散射角。幅值函数 $S_1(\cos \theta)$ 与 $S_2(\cos \theta)$ 为垂直于和平行于散射平面的光强分布,分别表示为^[6-8]

$$S_1(\cos \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \quad (3)$$

$$S_2(\cos \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \quad (4)$$

其中, a_n, b_n, π_n, τ_n 分别为 Mie 系数,可通过以下公式计算

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(mx)}{m\psi_n(mx)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\psi'_n(mx)} \quad (5)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi'_n(x) - m\psi_n(x)\psi'_n(mx)}{\psi_n(mx)\xi'_n(x) - m\xi_n(x)\psi'_n(mx)} \quad (6)$$

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} J_{n+0.5}(z) \quad (7)$$

$$\xi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} [J_{n+0.5}(z) - i \cdot Y_{n+0.5}(z)] \quad (8)$$

$$\pi_n = \frac{P_n^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} \quad (9)$$

$$\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \quad (10)$$

式中, $x=2\pi r/\lambda$ 为粒子尺度; r 为粒子半径; $J_{n+0.5}(z)$ 和 $Y_{n+0.5}(z)$ 为半整数阶的第一类、第二类贝塞尔函数; $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 为一阶 n 次第一类缔合勒让德函数; $P_n(\cos \theta)$ 为第一类勒让德函数。如果使用以上公式直接计算 Mie 散射,计算量非常大,为提高计算速度,通常利用递推公式进行计算。

为详细分析激光的大气散射特性,如图 1 建立激光大气散射模型。

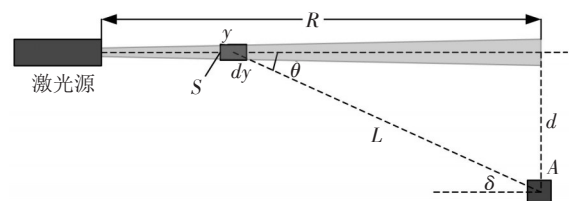


图 1 激光大气散射模型

图1中激光器峰值功率为 P ,脉宽为 τ ,激光发散角为 w ,出光口径为 D 。探测器位于 A 点,离轴距离为 d ,探测器接收的光强为激光沿传播方向所有体元的积分,假设距激光发射点 y 处,体元截面为 S ,长度为 dy ,散射角度为 θ ,探测器法线与体元夹角为 δ ,则位于 y 处激光辐照度为

$$I_0 = \frac{P}{S} \exp(-Q_e \cdot y) = \frac{4P}{\pi(D+wy)^2} \exp(-Q_e \cdot y) \quad (11)$$

其中, Q_e 为大气消光系数,使用以下公式计算

$$Q_e = \int_{r_1}^{r_2} Q_{ext} \pi r^2 n(r) dr \quad (12)$$

式中, Q_{ext} 为大气消光因子。

散射体元到探测点 A 的距离为

$$L = \sqrt{(R-y)^2 + d^2} \quad (13)$$

根据式(2),到达 A 点的散射光可表示为激光传播路径上所有体元散射光的积分,有下式

$$I_s = \int_0^y I_0 \frac{\lambda^2 \cos \delta}{8\pi^2 L^2} \exp(-Q_e \cdot L) \cdot \int_{r_1}^{r_2} (S_1^2 + S_2^2) n(r) dr dy \quad (14)$$

其中, y 、 L 与时间的关系为

$$t = (y+L)/c \quad (15)$$

利用式(14)和式(15)可对激光大气的空间和时间散射特性进行计算。

3 仿真与分析

根据第一节推导公式,对1.06 μm激光散射的空间和时间特性进行分析。

根据粒子的对数正态分布,得到一般陆地型大气模式下,三种大气组分的粒子谱分布曲线,如图2~图4所示。

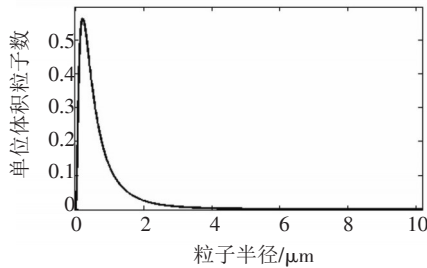


图2 不可溶性粒子分布

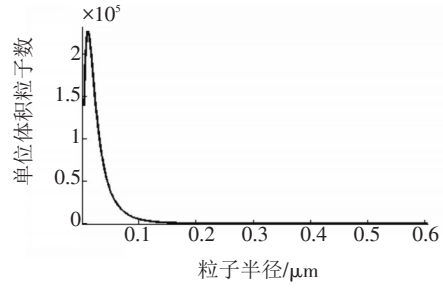


图3 可溶性粒子分布

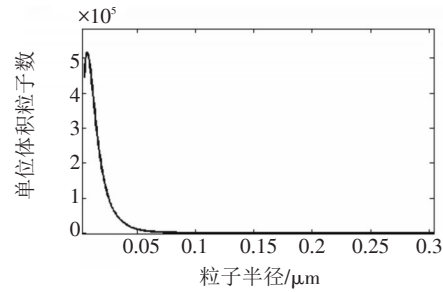


图4 烟灰粒子分布

由图2~图4可知,大气组分中不可溶性、可溶性及烟灰粒子分布的峰值分别在0.200 μm、0.010 μm及0.007 μm附近,三种粒子的平均粒子半径分别为0.719 μm、0.030 μm及0.016 μm。

利用以上三种组分的粒子分布,计算相应的散射光强分布如图5~图7所示。

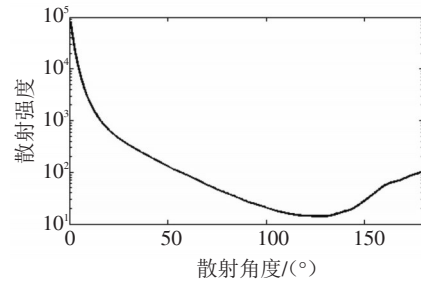


图5 不可溶性粒子的散射光强分布

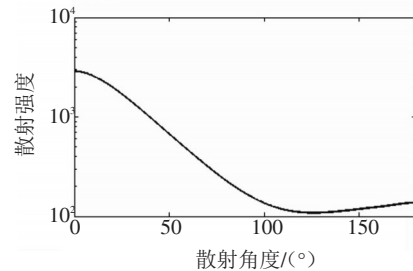


图6 可溶性粒子的散射光强分布

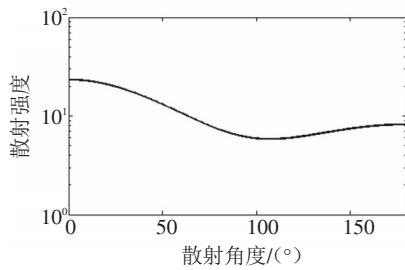


图7 烟灰粒子的散射光强分布

由图5~图7可知,不可溶性粒子具有较强的前向散射,而且前向散射比后向和侧向散射强度高出3~4个数量级,这与可溶性粒子的尺度较大有关;可溶性粒子与烟灰粒子散射强度分布更均匀一些,因为随着粒子尺度减小,会出现前向散射减弱,后向和侧向散射增强的现象。

根据以上对大气组分分布及散射特性的分析,利用表1中的三种大气模式,分析三种大气模式下激光的大气空间散射特性。设定激光器峰值功率为 $P=1\text{ MW}$,脉宽 $\tau=10\text{ ns}$,发散角 $w=1\text{ mrad}$,出光口径 $D=20\text{ cm}$,探测距离为 $R=10\text{ km}$,得到三种大气模式下,散射场的空间分布如图8所示。

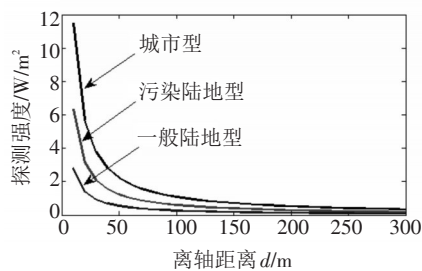


图8 三种大气模式下散射场空间分布图

由图8可知,每种大气模式下,随着离轴距离的增加,散射强度逐渐减弱,而且,散射强度在离轴距离小于100 m时,散射强度急剧下降,大于100 m以后,散射强度下降较缓;城市型、污染陆地型及一般陆地型三种大气模式下,激光的散射作用整体减弱,对比表1可知,这主要是由于三种大气模式下,气溶胶粒子浓度逐渐减少所导致。

以一般陆地型气溶胶模式为例,选定离轴距离 $d=50\text{ m}$ 、 100 m 、 150 m 、 200 m 、 250 m 及 300 m ,分别计算A点接收的光强随散射体元位置的分布如图9所示。其中,曲线由上至下分别对应选定的离轴距离。

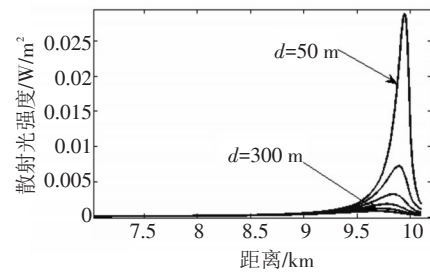


图9 光强随散射体元位置的分布图

由图9可知,A点探测到的散射光强峰值集中在10 km附近,而且随着离轴距离的增加,峰值具有前移的趋势,而远离10 km的路径上散射光对A点光强的贡献较小。

同样以一般陆地型气溶胶模式为例,选定离轴距离 $d=50\text{ m}$ 、 100 m 、 150 m 、 200 m 、 250 m 及 300 m ,根据式(14)分别计算A点散射光的时间特性,如图10所示。其中,曲线由上至下分别对应选定的离轴距离。

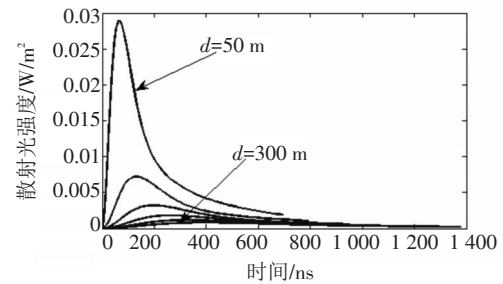


图10 散射场的时间分布图

由图10可知,随着离轴距离的增加,散射光脉冲峰值向后移动,而且脉冲宽度逐渐变宽,在离轴50 m时,脉宽可达200 ns,离轴300 m时,脉宽可达 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

4 结论

利用正态对数谱作为气溶胶分布谱,研究了 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光在三种大气模式下的散射特性。建立了散射光探测模型,并进行了仿真分析。结果表明,散射强度随离轴距离的增加,呈先快速减弱,再缓慢减弱的趋势;在离轴位置上,探测光强主要来自距探测点较近的位置;探测光信号峰值随离轴距离的增加逐渐后移,而且脉宽逐渐增加。通过以上研究为相关的设计和计算提供参考。

参考文献

- [1] 陈晓斯,樊祥,程宝玉,等.单脉冲激光散射探测研究[J].光电技术应用,2013,28(1):12-15.
- [2] 程宝玉,孙晓泉,赵明辉,等.激光信号大气散射探测分析[J].激光技术,2006,30(3):277-279.
- [3] 王龙,张国俊,邹继伟,等.大气中激光散射信号的特征分析[J].应用激光,2002,22(5):487-490.
- [4] 巨养锋,梁冬明,薛建国,等.威胁源参数对激光散射截获半径的影响[J].激光与红外,2011,41(4):426-429.
- [5] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012:145-148.
- [6] 吕跃广,孙晓泉.激光对抗原理与应用[M].北京:国防工业出版社,2015:022-025.
- [7] 袁易君,任德明,胡孝勇.Mie理论递推公式计算散射相位函数[J].光散射学报,2006,17(4):366-371.
- [8] 项建胜,何俊华.Mie光散射理论的数值计算方法[J].应用光学,2007,28(3):363-366.
- [9] 张合勇,赵卫疆,任德明,等.球形粒子Mie散射参量的Matlab改进算法[J].光散射学报,2008,20(2):102-110.
- [10] 吴健,杨春平,刘建斌.大气中的光传输理论[M].北京:北京邮电大学出版社,2005:33-37.

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015年、2016年两年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

期刊所设栏目主要有:综述,光电系统,光学设计,红外技术,激光技术,光电探测,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真等。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,具有审稿速度快、质量高,编辑人员具有较高的职业素质,工作认真负责、反馈速度快,期刊版面设计合理、美观大方,印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号;邮政编码:300308;联系电话:022-59067938;联系人:朱编辑 牛编辑;投稿邮箱:aoe-cetc@vip.163.com。

《光电技术应用》编辑部