

· 光电工程系统技术 ·

## 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气散射模型研究

赵宏鹏<sup>1</sup>, 雷 萍<sup>3</sup>, 姚 梅<sup>1</sup>, 李 华<sup>1,2</sup>

(1. 63892 部队, 河南 洛阳 471003; 2. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073; 3. 63891 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 运用米氏散射理论, 分析了单个粒子散射特性, 建立了 1.06  $\mu\text{m}$  激光近地面大气传输散射模型. 通过该模型的仿真计算, 得到了不同离轴距离条件下, 探测方向与散射照度的变化关系曲线; 不同气象能见度条件下, 散射照度随离轴距离的变化曲线. 散射照度不仅与气象能见度有关, 而且与激光传输距离也有很大关系. 使用实测数据对模型进行了校验, 结果表明, 实测数据与模型计算数据能够较好地吻合.

**关键词:** 米氏散射; 大气传输; 气溶胶谱分布; 能见度

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)02-0006-04

## Atmospheric Scattering Model of 1.06 $\mu\text{m}$ Laser

ZHAO Hong-peng<sup>1</sup>, LEI Ping<sup>3</sup>, YAO Mei<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1,2</sup>

(1. 63892 Army Unit, Luoyang 471003, China; 2. Institute of Aerospace and material engineering, NUDT, Changsha 410073, China; 3. 63891 Army Unit, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** According to Mie scattering theory, the single particle scattering characteristics are analyzed and an atmospheric scattering model of 1.06  $\mu\text{m}$  laser is built. Through simulation calculation using the model, the detection direction vs scattering intensity curves in different abaxial distance and the scattering intensity vs abaxial distance curves in various visibilities are obtained. Scattering intensity is not only influenced by meteorological visibility but also by propagation distance. The model is verified with practical tested data, the results show that the tested data accords with the simulated data approximately.

**Key words:** Mie scattering; atmosphere propagation; aerosol size distribution; visibility

在激光测距、无线激光通信等领域, 大气对激光传输的影响是必须考虑的一个重要因素. 激光在大气中传输时其能量会在空气密度的起伏(分子散射)、气溶胶粒子(气溶胶散射)以及大气湍流运动产生的不均匀性上发生散射, 导致传输方向上激光能量的减弱. 大气散射和大气吸收是导致大气衰减的主要成因. 随着激光远距离传输应用的不断发展, 大气散射对 1.06  $\mu\text{m}$  激光传输的影响已显得越来越重要, 引起越来越多人的关注.

### 1 单粒子散射仿真计算

散射过程的物理基础是电磁波和构成物质的电

荷的相互作用. 大气气溶胶粒子米氏散射过程是一个有许多紧靠在一起的由复杂分子的气溶胶粒子组成的多极子阵, 受入射波的激发, 形成多极子. 这些多极子向外辐射次生的电磁波在远场区叠加构成了散射波. 米氏理论从 Maxwell 方程出发, 分析、计算因散射粒子存在所产生的散射场和透射场, 得到粒子对电磁波散射和吸收的严格解.

在对流层内尤其是近地面层, 气溶胶粒子占重要地位, 只要激光波长不太短( $\geq 0.5 \mu\text{m}$ ), 分子散射一般可以忽略不计<sup>[1]</sup>. 独立散射通常假设粒子之间的距离大于其直径的 3 倍. 对于大气中的气体分子之间的距离以及大气中气溶胶粒子之间的距离来

说,都大大超过了 3 倍粒子直径<sup>[2]</sup>. 因此,对大气中的光传播而言,独立散射假设总是适用的.

入射光强为  $I_0$  的平行光,散射光辐射照度  $I_s$  表示为

$$I_s = \frac{I_0 F(\beta, \varphi)}{K^2 l^2} \quad (1)$$

式中,  $\beta$  为散射角;  $\varphi$  为极化角;  $k$  为波数,  $2\pi/\lambda$ ;  $l$  为散射距离;  $F(\beta, \varphi)$  为散射函数;  $I_0$  为入射光强.

图 1 给出了散射光强  $I_s$  的分布与粒子尺度参数  $x$  的关系.  $m$  为相对折射率,表示由 70% 的水溶物加 30% 的尘状物组成的大陆性气溶胶<sup>[3]</sup>. 由图 1 可以看出粒子散射分布状态成规律性变化,粒子尺度参数较小时,散射强度分布接近瑞利散射<sup>[4]</sup>. 随着尺度参数的增加,前向散射光强与总散射光强的比值迅速增大,后向散射光强明显减弱. 在前向小角范围内,散射光强随着角度的增加急剧下降. 小粒子各个方向的散射光强都比大粒子的明显增大.

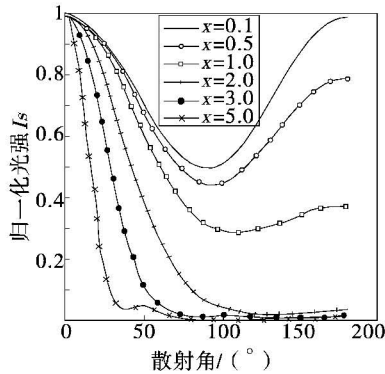


图 1 不同气溶胶粒子尺度参数的散射图样

## 2 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气散射建模

下面以波长为 1.06  $\mu\text{m}$  脉冲激光为例研究激光大气散射模型. 激光大气传输示意图如图 2 所示,激光源位于  $E$  点,激光主光束沿  $EO$  方向传输,激光探测设备位于  $D$  点,  $O$  是光束主轴上的一点,  $S1$ 、 $S2$  分别是探测器视场与主轴的交点,探测器的法线方向由  $D$  点指向  $F$  点.  $ES1 = X1$ ,  $EO = R$ ,  $OD = d$ ,  $S1D = l$ ,光传播速度是  $C$ ,激光束发散角是  $\theta$ .

从发射第一个脉冲开始计时,激光束沿主轴传输时间是  $T_0$ ,散射光传输到探测点  $D$  的时间与主

轴激光传输到散射介质前端  $S1$  的时间和是  $T_D$ ,那么有  $X1 = CT_0$

$$X1 + \sqrt{(R - X1)^2 + d^2} = CT_D \quad (2)$$

则

$$X1 = \frac{(CT_D)^2 - R^2 - d^2}{2(CT_D - R)}$$

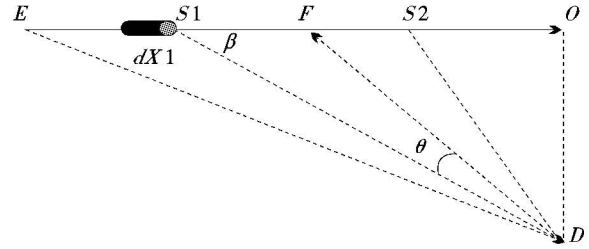


图 2 激光大气传输示意图

因此  $X1$  随散射光传输时间  $T_D$  变化,对  $T_D$  求微商,有

$$\frac{dX1}{dT_D} = \frac{C(CT_D - R)^2 + Cd^2}{2(CT_D - R)^2} \quad (4)$$

散射距离  $l$  为

$$l = \frac{(CT_D - R)^2 + d^2}{2(CT_D - R)} \quad (5)$$

散射角的余弦为

$$\cos(\beta) = \frac{R - X1}{l} = \frac{d^2 - (CT_D - R)^2}{d^2 + (CT_D - R)^2} \quad (6)$$

入射到散射介质前端的激光辐射照度为

$$I_i = \frac{4W}{\pi(\theta CT_0)^2} \exp(-\alpha CT_0) \quad (7)$$

假设探测视场内的介质散射属于单次散射,在某一时刻  $D$  点接收的散射光是点  $S1$  处由激光光束截面以及间距为  $dX1$  所构成圆柱体内各散射粒子所产生前向散射光共同贡献的结果. 因此,主轴上  $S1$  点附近,间距为  $dX1$  的光柱在观测方向  $\beta$ ,散射到  $D$  点的辐射照度为

$$dI_s = W \exp(-\alpha CT_D) \frac{2C}{(CT_D - R)^2 + d^2} dT_D \cdot \int_{r_2}^{r_1} \frac{F(\beta, \varphi) n(r) dr}{k^2 \cos(\theta)} \quad (8)$$

那么对  $T_D$  求积分得到探测视场内总的散射辐射照度为

$$I_s = \int_{T_D} \int_r W \exp(-\alpha CT_D) \frac{2C}{(CT_D - R)^2 + d^2} \cdot$$

$$F(\beta, \varphi) n(r) / k^2 \cos(\theta) dT_D dr \quad (9)$$

式中,  $W$  为脉冲激光功率;  $\varphi$  为极化角;  $l$  为散射距离;  $n(r)$  为粒子谱分布;  $\theta$  为散射光入射方向与告警设备光学系统法线的夹角;  $\alpha$  为气溶胶消光系数.

### 3 散射模型仿真计算

1963年Junge(荣格)提出, 粒子半径处于  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  的范围内的多数粒子甚至更大一些的粒子, 其大小服从幂指数分布即  $\frac{dn}{dr} = Cr^{-\gamma}$ ,  $C$  是常数,  $\gamma$  的取值在  $2 \sim 4$  之间. 参考相关文献[5],  $C$  取 5,  $\gamma$  取 3.

利用散射模型, 对不同离轴距离(3、5、7、9 m)、不同探测方向( $40^\circ \sim 60^\circ$ )的激光散射照度大小进行了仿真, 探测器视场  $30^\circ$ , 见图 3.

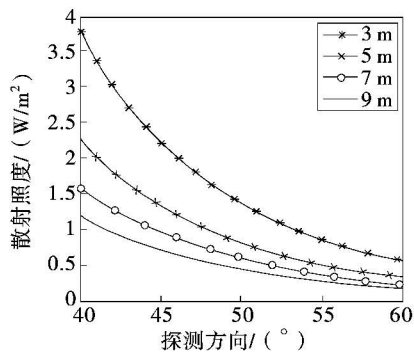


图3 散射照度随探测方向变化曲线

图3中曲线说明, 离轴距离越近, 到达探测器上的散射能量越强; 在散射角度变大的过程中, 散射照度变小. 这 and 实际测试过程中散射信号的变化趋势相一致.

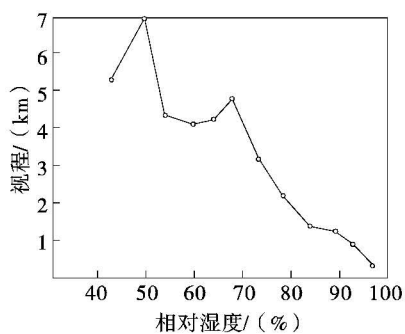


图4 视程随相对湿度的变化

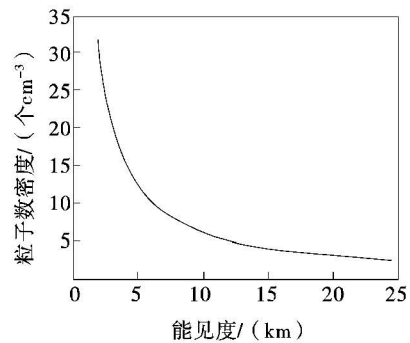


图5 粒子数密度随能见度的变化

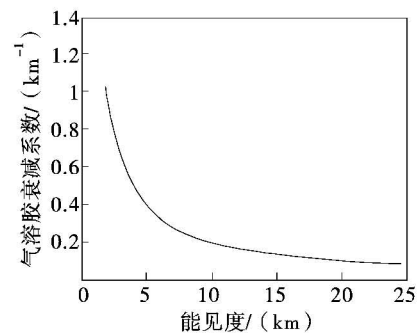


图6  $1.06 \mu\text{m}$  波长激光近地面传输, 气溶胶衰减系数随能见度变化曲线

图7和图8是传输距离2 km和10 km, 不同能见度对应的离轴距离-散射照度曲线. 入射脉冲能量150 mJ, 脉冲宽度10 ns, 气溶胶折射率  $1.52 \sim 0.014^* i$ , 探测方向  $60^\circ$ .

图7中, 能见度很小, 由于图4中视程2 km的相对湿度比5 km的大, 小尺度粒子数密度会减小, 吸湿性粒子数密度增加得快, 所以能见度2 km时的散射较5 km时的弱. 图8中, 离轴距离不变的情况下, 随着能见度变大, 由图5可知粒子数密度变小, 因此相对湿度变小, 小尺度粒子数密度会增加, 吸湿性粒子数密度减小得多; 如果此时传输距离较长, 由图6知气溶胶衰减是主要的贡献; 能见度增大, 透过率也随之增加; 综合以上因素, 最终的散射照度会增大. 因此, 散射照度不仅与主轴光束的传输距离有关, 而且还与能见度有关.

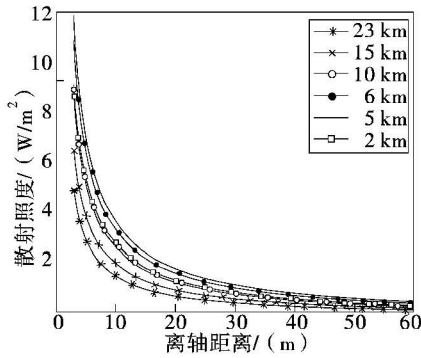


图 7 传输距离 2 km,不同能见度,离轴距离-散射照度曲线

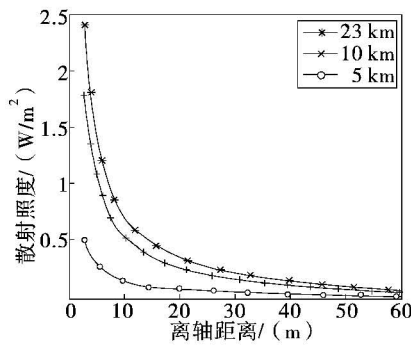


图 8 传输距离 10 km,不同能见度,离轴距离-散射照度曲线

### 4 散射模型实际校验

使用脉冲激光器、高灵敏度光电探测器以及其他辅助测量设备,对室内脉冲激光散射光进行了测量.测试布局及组成图如图 9.

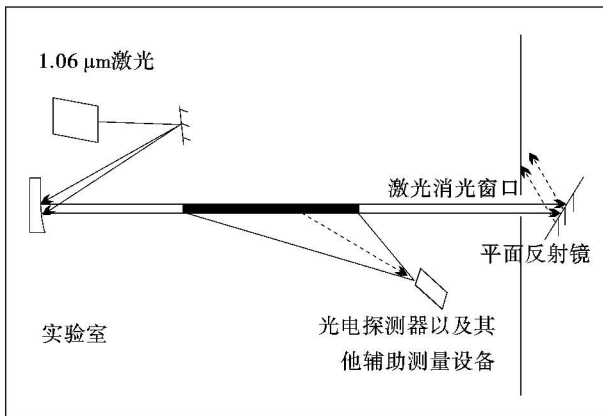


图 9 室内 1 064 nm 激光散射光能量测试组成图

实验室内墙壁进行了消光处理,避免散射光通过多次反射造成测量不准确.激光通过消光窗口出射到实验室外,并通过平面反射镜将激光反射到天空,避免其反射光影响测量.根据校正的探测器响应曲线,可以得到探测器输出一定响应电压  $U$  时其接收到的能量  $E$ .通过激光器出口处加孔径光阑,消除激光器出口溅射光对散射测量的影响.

改变离轴距离,利用 1.06 μm 弱激光能量测量系统,是对传输路径上的某一点进行散射探测,进行了多组实际测试数据,与上述建立的模型仿真曲线对比.图 10 中横轴表示离轴距离,纵轴表示把测量到的信号电压转换为散射辐射能量的归一化数值;实线表示 Mie 散射模型仿真的曲线,离散点表示实际测试数据.

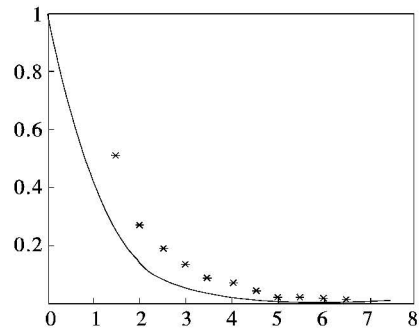


图 10 预测和实际能量对比曲线(归一化结果)

图 10 中数据和曲线表明,模型仿真曲线和实际测试数据总体上符合较好,具有一定的实用价值.但是仿真结果相对实际测量数据来说整体数值偏小,分析形成这一现象的主要原因有:

- (1)由于测量设备的测量误差和激光器稳定性导致的测量误差;
- (2)模型采用的气溶胶谱分布没有实际测试而选用经验模型;
- (3)激光器出口散射光的贡献.

### 5 结 论

初步建立了 1.06 μm 大气散射模型,分析了散射照度不仅与能见度有关,而且与传输距离有很大的关系;通过该模型进行仿真计算,与实际测量数据对比总体符合较好.在工程应用中,需要根据当地的

(下转第 17 页)

表 4 12 lp/mm 和 30 lp/mm 处不同温度影响下的系统 MTF

零视场	15 ℃		18 ℃		20 ℃		22 ℃		25 ℃		27 ℃	
	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
设计 MTF	tangential MTF:0.678 517 sagittal MTF:0.678 673											
12 引入形变	0.585	0.616	0.589	0.619	0.592	0.621	0.594	0.623	0.598	0.626	0.600	0.628
	7	1	6	2	1	1	6	1	3	0	8	0
ΔMTF	0.092	0.062	0.088	0.059	0.086	0.057	0.083	0.055	0.080	0.052	0.077	0.050
	8	5	9	5	4	5	8	5	2	6	8	9
设计 MTF	tangential MTF:0.246 507 sagittal MTF:0.246 589											
30 引入形变	0.213	0.233	0.215	0.233	0.216	0.234	0.217	0.234	0.218	0.235	0.219	0.236
	8	1	2	9	2	4	1	8	4	5	3	0
ΔMTF	0.032	0.013	0.031	0.012	0.030	0.012	0.029	0.011	0.028	0.011	0.027	0.010
	7	5	3	7	3	2	4	8	1	1	2	6

## 4 结 束 语

对于精度要求较高的光学系统,在设计阶段分析环境变化对系统像质的影响是很有必要的.温度梯度分布的形式不同,对于光学元件影响也不同.设计时要充分考虑系统工作环境温度分布,合理选择材料和设计,并进行相关仿真计算,确保系统实际工作正常稳定.

### 参考文献

[1] 王红,韩昌元.温度对航天相机光学系统影响的研究

[J].光学技术,2003,29(4):452-457.

[2] 王红,田铁印.轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J].光学精密工程,2007,15(10):1489-1494.

[3] 马克苏托夫.天文光学工艺[M].杨世杰.北京:科学出版社,1986:19-21.

[4] 杨林华.浅谈温度变化对光学镜面的影响[J].航天器环境工程,2003,20(1):4-18.

[5] 张伟,刘剑峰.基于 Zernike 多项式进行波面拟合研究[J].光学技术,2005,31(5):675-678

[6] 刘家国,李林.光机热集成分析中数据转换接口研究[J].北京理工大学学报,2007,27(5):427-431

[7] 李贤辉.光机集成有限元分析光学面形后处理研究与实现[D].长春:中科院长春光机所,2004:12-19.

(上接第 9 页)

气象环境,对气溶胶的浓度进行标定,获得合理的谱分布函数,提高模型的精度.以后的工作是对近地面的斜程传输进行研究,使模型更加完善.

### 参考文献

[1] [美]E.J.麦卡特尼.大气光学[M].潘乃先,毛节泰,王永生,北京:科学出版社,1988:180.

[2] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003:26.

[3] 李景镇.光学手册[M].陕西:科学技术出版社,1986:852.

[4] 王莲芬,李正亮,成燕归,等.气溶胶激光散射信号的特征分析[J].光散射学报,2006,18(4):351-354.

[5] 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.