

· 光电工程系统技术 ·

## 气溶胶粒径数密度谱的激光大气传输工程应用

陈玉茹, 冯富强, 李 晴

(61251 部队, 辽宁 葫芦岛 125200)

**摘要:**气溶胶粒径数密度谱分布是激光大气传输计算的重要参量, 鉴于气溶胶的时空变化和难于现场测量的特点, 以实测数据为依据, 从工程应用角度出发, 使用数据拟合的方法得到气溶胶粒径数密度谱与能见度的函数表达式, 并通过仿真计算验证该函数的实用性.

**关键词:**气溶胶; 激光大气传输; 衰减系数; 能见度

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0010-04

## Project Application of Size and Number Density Distribution of Aerosol Particle in Laser Atmosphere Transmission

CHEN Yu-ru, FENG Fu-qiang, LI Qing

(61251 Army Unit, Huludao 125200, China)

**Abstract:** Size and number density distribution of aerosol particle is important parameter in calculating laser atmosphere transmission. The aerosol particle have characteristics of change by space-time and difficulty in measurement, therefore, according to measured data and from the project application, the function expression of size and number density distribution of aerosol particle were acquired by curve-fitting method. The validate practicality of this function was verified through simulation and calculation.

**Key words:** aerosol particle; laser atmosphere transmission; attenuation coefficient; visibility gradation

大气气溶胶粒子的尺度分布、复折射指数和浓度及其高度分布等物理特征都对大气中光的衰减有重要影响, 而这些特征又具有明显的时空变化, 难于现场测量, 研究激光大气传输通常的做法是依据一些观测结果总结成一定的气溶胶模型. 目前使用较多的辐射传输模式如 FAS-COD, HITRAN, MODTRAN 等, 在气溶胶模块处理方面都与 LOWTRAN 辐射模式相同. 文献[1]将所观测到的各种能见度下年平均气溶胶光学厚度与 LOWTRAN7 中城市气溶胶模式相同能见度下的光学厚度进行比较, 实际观测的气溶胶光学厚度与 LOWTRAN 的城市气溶胶光学厚度比较表明, 在低能见度下 LOWTRAN 的估值偏高约 40%, 高能见度下偏低大约 35%, 检

验了气溶胶模块的地域性差异. 由此可见, 建立城市气溶胶模式已成为当务之急.

鉴于气溶胶模式的复杂性, 针对不同地区的气溶胶模式研究很多, 但从工程应用角度出发进行的气溶胶模式研究较少. 结合气溶胶观测情况, 分析研究影响气溶胶的各项因素, 建立气溶胶粒径数密度谱分布与各影响因素的数学关系表达式, 为激光大气传输的工程计算提供依据.

### 1 1.06 $\mu\text{m}$ 激光大气传输衰减系数

对 1.06  $\mu\text{m}$  激光波长来说, 几乎不存在分子吸收, 分子散射也比气溶胶衰减约小 1~2 个数量级,

收稿日期: 2009-07-18

作者简介: 陈玉茹(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光大气传输、与光电信息融合; 冯富强(1970-), 男, 博士后, 总工程师, 主要研究方向为电波传播、通信信号检测、分选识别、测向定位以及激光大气传输等; 李晴(1984-), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向为激光技术.

主要的衰减是气溶胶的散射和吸收<sup>[2]</sup>,得到 1.06 μm 激光大气衰减系数为

$$\sigma = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_p^0 \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n \right) N(r) dr \quad (1)$$

式中,  $N(r)$  为气溶胶粒径数密度谱分布;  $n$  为气溶胶折射率;  $r$  为气溶胶粒径;  $\lambda$  为激光波长. 由式(1)可知, 计算某种天气情况下的激光大气传输衰减系数, 关键在于得到该情况下的较为准确的气溶胶粒径数密度谱分布.

## 2 气溶胶粒径数密度谱分布与大气能见度

典型的陆地气溶胶粒径数密度谱分布函数为

$$N(r) = N_{\text{总}} A / r^{(v+1)} = N_{\text{总}} \cdot f(r) \quad (2)$$

也可用一个双模谱型函数, 即 Junge 分布加对数正态分布来拟合, 谱型函数用  $n(r)$  表示<sup>[1]</sup>.

$$n(r) = A_0 \left( r^{-B} + \frac{C}{r} \times e^{-D \log^2(\frac{r}{E})} \right) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中,  $N_{\text{总}}$  为气溶胶总数密度;  $v$  为谱分布指数;  $A_0$  为气溶胶粒子数浓度因子;  $B$  为 Junge 分布指数;  $C$  为对数正态分布权重;  $D$  为方差因子.

气溶胶粒子的数密度和质量浓度随时间和地点的变化较大. 例如, 在海洋上空大粒子和巨粒子的数密度有时仅为 1 个/cm<sup>3</sup> 左右, 而在工业区个别则可高达 10<sup>5</sup> 个/cm<sup>3</sup>, 霾粒子的浓度通常为 10~10<sup>3</sup> 个/cm<sup>3</sup>.

就工程应用而言, 用大气能见度来估算大气气溶胶衰减更为方便实用. 这是因为限制能见度的主要因素不是大气分子而是大气气溶胶, 所以把能见度和气溶胶衰减联系起来是很自然的. 特别对于晴朗、霾、雾天气, 此法更为有效, 按照能见度的高低, 可以把大气状况大致分为 10 个等级.

表 1 给出了经过实测得到的气溶胶粒子数浓度

表 1 能见度分级下的气溶胶粒子谱分布型参数

能见度	$A_0$	$B$	$C$	$D$	$E$	拟合误差
2	1 983 701.0	3.992	2.256	6.221	0.40	0.128E-00
5	1 881 984.88	3.687	1.405	5.341	0.340	0.773E-01
10	1 277 690.25	3.722	2.352	20.454	0.340	0.499E-01
20	948 262.38	3.653 1	1.167	6.430	0.320	0.399E-01
30	693 030.75	3.694	1.041	8.009	0.320	0.690E-01

的因子  $A_0$ 、Junge 分布指数  $B$ 、对数正态分布权重  $C$ , 以及方差因子  $D$  随着能见度变化的变化<sup>[1]</sup>.

## 3 气溶胶粒径数密度谱分布函数的工程应用

从激光大气传输的工程应用角度出发, 研究气溶胶的粒径数密度谱分布函数, 综合考虑影响气溶胶粒径数密度谱分布的各个因素, 建立气溶胶粒子数总浓度、谱分布指数与能见度的函数关系.

以地理位置及空气质量为依据将地区分为农村、污染严重城市、工业城市、沿海城市等几类, 分析气溶胶粒子数总浓度与能见度, 谱分布指数的变化与地理位置、天气类型、能见度之间的关系. 假设气溶胶粒子数总浓度、谱分布指数与能见度的函数关系为

$$N_{\text{总}} = N_0 + f(V_M) \quad (4)$$

$$v = v_{xy} + \varphi(V_M) \quad (5)$$

式中,  $V_{xy}$  表示不同类型地区不同天气类型下的谱分布指数 ( $x=1, 2, 3, \dots$ );  $x=1$  为工业城市;  $x=2$  为尘污染严重城市;  $x=3$  为沿海城市;  $x=4$  为农村.  $y=1$  为一般无云天气;  $y=2$  为扬沙天气;  $y=3$  为浮尘天气.

将式(3)、式(4)代入式(1), 粒径大于 0.1 μm 的气溶胶 Junge 谱分布可表示为

$$n(r) = (N_0 + f(V_M)) \cdot A \cdot r^{-[v_{xy} + \varphi(V_M) + 1]} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1), 得到 1.06 μm 激光的大气衰减系数计算公式为

$$\sigma = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_p^0 \left( \frac{2\pi r}{\lambda}, n \right) e^{-\frac{h}{h_0}} (N_0 + f(V_M)) \cdot A \cdot r^{-[v_{xy} + \varphi(V_M) + 1]} dr \quad (7)$$

表 1、表 2 为实测的一个尘污染严重地区能见度、气溶胶粒子数浓度因子  $A_0$  等, 应用插值法求出

其他能见度下的气溶胶粒子数浓度因子、谱分布指数值,供大气辐射传输模式工程计算使用。

### 3.1 气溶胶粒子数总浓度函数式

依据气溶胶粒子数浓度因子与能见度的函数关系,以及气溶胶模型提供的气溶胶粒子总浓度数,可得到气溶胶粒子总浓度数与能见度的函数关系。

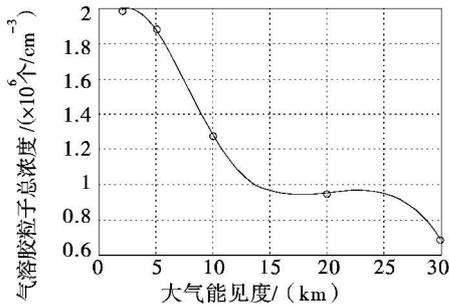


图1 气溶胶粒子数浓度因子与能见度关系曲线图

该地区气溶胶粒子数浓度因子与能见度的关系曲线如图1所示,由图1可以看到能见度与气溶胶粒子数浓度因子的关系为2个正态分布叠加的关系,利用MATLAB拟合得到气溶胶粒子数浓度因子与能见度的函数关系为

$$A_0 = a + \frac{b}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(V_M - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + \frac{c}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(V_M - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (V_M > 0) \quad (8)$$

当式中各参数取值为:  $a = 1.335 \times 10^5$ ;  $b = 3.1 \times 10^7$ ;  $c = 2 \times 10^7$ ;  $\mu_1 = 1.5$ ;  $\mu_2 = 23$ ;  $\sigma_1 = 7$ ;  $\sigma_2 = 10$  时,该函数的曲线如图2所示,图2中虚线为拟合得到的函数曲线,实线为根据表1实测数据拟合曲线。

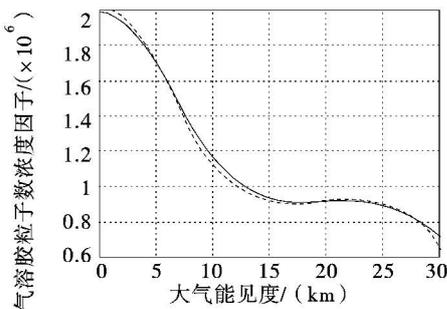


图2 气溶胶粒子数浓度因子与能见度关系拟合曲线图

根据光学手册提供,高度为0的地平面,能见度为23 km的晴天,  $N_{\text{总}} = 2\ 828$  个/cm<sup>3</sup>;能见度为5 km的阴天,  $N_{\text{总}} = 13\ 780$  个/cm<sup>3</sup>.结合式(6)的气溶胶粒子数浓度因子的变化规律,得到不同能见度下的气溶胶粒子数总浓度  $N_{\text{总}}$

$$N_{\text{总}} = N_0 + f(V_M) = 865 + \frac{2.375 \times 10^5}{6\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(V_M - 1)^2}{72}\right) + \frac{5 \times 10^4}{10\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(V_M - 25)^2}{200}\right) \quad (V_M > 0) \quad (9)$$

根据气溶胶粒子数总浓度与能见度的函数关系式(9),可以得到能见度大于2 km情况下任何能见度情况下的气溶胶粒子数总浓度。

### 3.2 气溶胶粒径谱分布指数函数式

不同天气情况、不同能见度情况下谱分布指数  $v$  是不同的.表2为2000~2001年该地区气溶胶光学厚度观测结果显示数据表明,当有沙尘天气时,空气中大的粒子增加,2~4月份沙尘天气下气溶胶参数明显小于其他月份。

表2 某地区气溶胶光学厚度观测结果

年	月/日	能见度	$v$
2000	12/14	10	3.179 8
2001	2/8	10	3.323 6
2001	2/15	20	3.041 8
2000	12/15	25	3.188 0
2001	1/11	25	3.380 3
2001	1/3	22.5	2.862 5
扬沙			
2001	3/3	8.0、扬沙	2.201 6
2001	3/6	15、扬沙	2.169 4
2001	3/22	9、扬沙	2.196 6

分别考虑一般无云、扬沙等不同天气类型下尘污染严重地区的气溶胶粒径分布指数的数学表达<sup>[3]</sup>。

#### (1)一般无云天气情况下尘污染严重地区

根据表2数据得到Junge谱分布指数与能见度的关系曲线如图3所示,可知能见度与Junge谱分布指数的关系为一个正态分布与正弦函数叠加的关系,利用MATLAB拟合得到谱分布指数与能见度的函数关系为

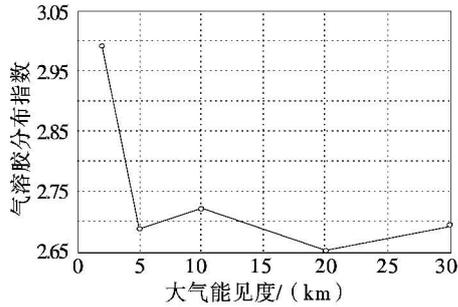


图 3 气溶胶谱分布指数与能见度关系曲线图

$$v = v_{21} + \varphi(V_M) = v_{21} + \frac{B}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(C \cdot V_M - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + D \cdot \sin[\pi/11 \times (V_M - 5)] \quad (V_M > 2) \quad (10)$$

当式(10)中各参数取值为:  $v_{21} = 2.675$ ;  $B = 9$ ;  $C = 3$ ;  $\mu = 0$ ;  $\sigma = 5$ ;  $D = 0.025$ ;  $E = \pi/11$ ;  $F = 5$  时, 该函数的曲线如图 4 所示, 图 4 中虚线为拟合得到的函数曲线, 实线为实测数据拟合曲线。

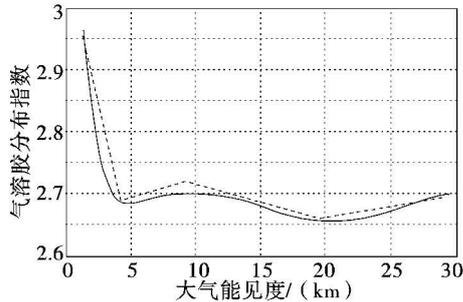


图 4 气溶胶谱分布指数与能见度关系拟合曲线图

(2) 扬沙天气情况下尘污染严重地区

已知能见度与谱分布指数的函数关系  $\varphi(V_M)$ , 则该地区扬沙天气情况下 Junge 谱分布指数为

$$v = v_{22} + \varphi(V_M) = V_{22} + \frac{9}{5 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(3V_M - 0)^2}{50}\right) + 0.025 \cdot \sin[\pi/11 \times (V_M - 5)] \quad (V_M > 2) \quad (11)$$

式中,  $V_{22}$  为未知量, 将表 2 中不同能见度下的扬沙天气谱分布指数带入式(10), 得到  $V_{22} = 2.175$ , 存在误差小于 0.57%。

则得到尘污染严重地区扬沙天气情况下谱分布指数与能见度的函数关系为

$$v = 2.175 + \frac{9}{5 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(3V_M - 0)^2}{50}\right) + 0.025$$

$$\sin[\pi/11 \times (V_M - 5)] \quad (V_M > 2) \quad (12)$$

4 仿真计算及分析

依据  $1.06 \mu\text{m}$  激光的大气衰减系数计算公式(7), 气溶胶粒子数总浓度函数式(9)以及 Junge 谱分布指数函数式(10), 仿真计算该地区一般无云天气、扬沙 2 种天气情况下不同能见度的  $1.06 \mu\text{m}$  激光大气衰减系数, 气溶胶折射率查表为  $1.52 - 0.014 3i$ 。

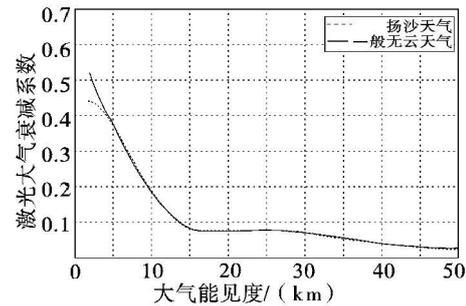


图 5  $1.06 \mu\text{m}$  激光大气衰减系数与大气能见度的关系曲线

计算结果如图 5 所示, 其中实线为一般无云天气情况下的激光衰减系数, 虚线为扬沙天气情况下的激光衰减系数, 图 5 中可以看见衰减系数随着能见度增大而减小的变化规律, 衰减系数值在  $0.026 267 \sim 0.523 99 (\text{km}^{-1})$  范围内, 另外, 2 条曲线在能见度小于 5 km 时, 无云天气的激光大气消光系数反而大于扬沙天气, 在能见度大于 5 km 后完全重合。这一现象与激光波长有关, 由图 6 已知, 在波长小于  $1.1 \mu\text{m}$  的情况下, 平均消光截面并非随着气溶胶谱分布指数的增大而减小, 从而验证了图 5 的正确性。

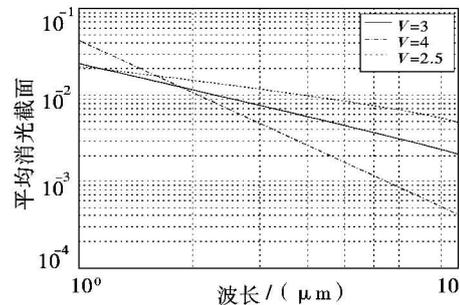


图 6 平均消光截面与波长关系曲线

5 结 论

仿真计算得到的某地区  $1.06 \mu\text{m}$ (下转第 16 页)

一个拖曳式的双色诱饵. 由于此方式易于通过飞机的尾喷系统实时控制, 较易达到干扰效果. (2) 通过高温气流将其大面积散布, 形成像云一样的等离子区, 遮蔽双色探测器对目标辐射的探测(目标辐射实质上被有源屏障“淹没”或压制)<sup>[8]</sup>.

## 2.4 新型气动红外诱饵弹

人们根据空气动力学研制成功“灵巧诱饵弹”, 其光谱特性更接近于目标, 能显示出更逼真的弹道. 美国空军赖特研究所已研究了一种专用的红外干扰弹, 可模拟飞机的飞行和光谱信号. 这种气动红外干扰弹本身带有推进系统, 投放后可在一段时间内与飞机并行飞行, 使红外导弹的反诱饵措施失败.

能模仿飞机的气动特性并具有伴飞能力的 LO-RALEI 诱饵弹、可产生红外特征与大型飞机的红外特征十分相似的新型拖曳式红外诱饵弹, 可有效干扰多谱制导导弹<sup>[7,9-10]</sup>.

## 2.5 复合干扰系统

现有的红外诱饵弹系统大都比较单一, 为适应制导技术的发展, 对抗各种导弹的攻击, 可以将气溶胶红外诱饵<sup>[11]</sup>、可燃箔条弹<sup>[9]</sup>、人工水雾<sup>[4]</sup>、激光器闭环红外定向干扰系统、红外烟幕、激光致盲等多种干扰手段有机结合起来, 发展一体化的复合干扰系统. 如美国桑德斯公司正在研制的先进威胁红外对抗措施(ATIRCM), 共采用了 4 个导弹探测器, 先进的目标跟踪装置能在 0.3 s 内实现对威胁导弹的跟踪, 直接利用激光器或红外诱饵弹、箔条弹等对来袭导弹实施干扰, 被誉为 21 世纪飞机的生存设备<sup>[10]</sup>.

## 3 结 束 语

通过上述分析, 要干扰红外双色复合制导导引

(上接第 13 页)

激光大气衰减系数值与该波长激光大气衰减系数理论分析相一致, 且不同类型天气情况下的大气衰减系数变化规律符合 1.06  $\mu\text{m}$  激光大气消光原理.

文中建立的气溶胶粒径数密度谱分布函数关系式, 减少了计算激光大气传输衰减所需现场测量的大气参量, 简化了计算过程的复杂性, 可快速计算得到该地区不同天气类型下 1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气衰减系数, 并且为不同地区的激光大气传输工程计算

头, 必须要全面考虑红外双色复合制导的特点, 针对红外双色复合制导系统在不同阶段所具有的弱点, 寻找有效的干扰途径, 准确探测来袭导弹的方位、时间, 运用经过有机结合的干扰方式, 实施有针对性的干扰, 尽量避免使用单一的干扰方式, 对来袭导弹进行全程、全面干扰, 即综合干扰. 需要说明的是, 综合干扰不是多种干扰方式的罗列, 而是从整体上综合考虑运用各种干扰方式, 对导弹飞行的每个阶段都实施干扰, 从而提高对导弹干扰的成功率.

## 参考文献

- [1] 聂妍. 双模复合探测器技术的发展现状和趋势[J]. 激光与红外, 2008, 38(3): 197-199.
- [2] 方斌, 邓领民. 双色红外导引头光学系统设计[J]. 激光与红外, 2003, 33(3): 200-202.
- [3] 李丽娟, 黄士科, 陈宝国. 双色红外成像抗干扰技术[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 141-143.
- [4] 沈均平, 刘建永, 胡登高, 等. 两栖装甲车辆对抗双红外制导伪装方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007(8): 555-559.
- [5] 李丽娟, 黄士科. 红外诱饵弹及其发展[J]. 航空兵器, 2000(2): 26-27.
- [6] 陈苹苹. 先进的红外干扰技术—特种材料诱饵[J]. 航天电子对抗, 2001(6): 32-33.
- [7] 蒋耀庭, 孙晓明. 红外诱饵技术的现状与发展[J]. 红外技术, 2001(5): 24-28.
- [8] 汪涛, 樊详. 双色导引头的光电对抗与双色干扰诱饵[J]. 红外与激光工程, 1999(2): 28-32.
- [9] 付伟, 侯振宁. 红外干扰弹的干扰机理与战术应用[J]. 激光与红外, 2000(3): 171-174.
- [10] 施德恒, 许启富, 黄宜军. 红外诱饵弹系统的现状与发展[J]. 红外技术, 1997(1): 9-14.
- [11] 高勇, 时家明, 汪家春. 红外对抗与新型红外诱饵[J]. 舰船电子对抗, 2001(1): 22-24.

应用提供了一个有效、简单、准确的计算方法.

## 参考文献

- [1] 李放, 吕仁达. 能见度分级约束下的大气气溶胶光学厚度特征[J]. 中国环境监测, 1996, 12(6).
- [2] 杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06  $\mu\text{m}$  激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1).
- [3] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(Z1): 136-143.