

## 水雾遮蔽性能的计算和分析

许波, 时家明, 汪家春, 袁忠才, 王甲寅

(解放军电子工程学院, 安徽合肥 230037)

**摘要:**水雾干扰波段宽, 使用成本低, 对生物和环境都不产生毒副作用, 是一种新型的干扰材料。利用 Mie 散射理论, 对粒径服从对数正态分布和正态分布的水雾在可见光波段、红外传输大气窗口和两种常用的军用激光波长处的质量消光系数进行了计算, 得到了水雾在这些波段(波长)处的遮蔽性能, 分析了计算结果与粒径分布参数之间的关系。

**关键词:**水雾; 遮蔽性能; 粒径分布

**中图分类号:** TN21    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2005)01-0038-04

## Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog

XU Bo, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun, YUAN Zhong-cai, WANG Jia-yan

(Institute of Electronic Engineering, PLA, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The water fog is a novel jamming material with wider jamming band, cheap cost and non side effect to the creature and environment. Using the Mie Scattering Theory, mass extinction coefficients (MEC) of the water fog with lognormal distribution and normal distribution are calculated in visible-light band, in IR transmission windows and at two military laser wavelengths. The extinction characteristics of the above bands and the lengths are obtained. The relationship between the calculated results and the parameters of the size distribution is analyzed.

**Key words:** Water fog; Extinction characteristics; Particle distribution

### 0 引言<sup>[1,2]</sup>

在现代高技术战争中, 如何保护目标免受光电制导武器的打击是一个十分重要的课题。水雾对人无毒副作用, 也不污染环境, 而且对可见光和红外线具有较强的衰减作用, 这些特点使得它成为一种值得注意的干扰材料。在广阔无垠的大海上, 可以利用海水产生水雾来遮蔽舰船的光学特性, 阻断光电制导武器光

学探测器的探测光路, 使其发现不到或者分辨不清目标, 达到保护舰船目标的目的。在远离大海的陆地上, 也可以用水雾来保护重要的军事、政治和经济目标免受光电制导武器的打击。

为了从理论上预测水雾遮蔽目标光学特性的可行性, 定量地得到水雾的消光性能, 需要在可见光波段、红外大气窗口和常用的军用激光波长等处对水雾的质量消光系数进行计算。

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-04-17

作者简介: 许波(1977-), 男, 安徽芜湖人, 博士生, 主要从事烟幕技术及隐身技术的研究。

### 1 理论模型

烟幕的消光性能通常用质量消光系数 (MEC) 来描述。质量消光系数指的是单位质量干扰物的消光截面,它是反映烟幕消光性能的一个重要参数。

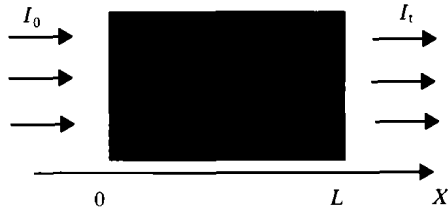


图 1 一束平行辐射穿透厚度为 L 的水雾

Fig.1 A beam of radiation goes through a water fog layer with thickness of L

考虑一个厚度为 L 的水雾层,被一束平行辐射照射并穿透(如图 1 所示),根据 Lambert-Beer 定律<sup>[2]</sup>,透射的辐射强度为:

$$I_1 = I_0 \exp \left[ - \int_0^L \beta(\lambda) dx \right] \quad (1)$$

式中  $I_0$  是入射辐射强度;  $I_1$  是透射辐射强度;  $\beta(\lambda)$  为消光系数,且:

$$\beta(\lambda) = \int_0^\infty N \sigma_e(\lambda, r) n(r) dr \quad (2)$$

式中  $n(r)$  是水雾粒子半径的分布函数;  $N$  为水雾粒子数密度;  $\sigma_e(\lambda, r)$  为半径为  $r$  的粒子在波长为  $\lambda$  处的消光截面。对于球形的水雾粒子,该消光截面  $\sigma_e(\lambda, r)$  可以由 Mie 散射理论求出,其表达式由参考文献[3]和[4]分别给出。

实际上光电设备都在某一波段工作,因而又需评价在特定波段内的消光系数,引入波段平均消光系数:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

对于密度为  $\rho$  的物质组成的气溶胶,其质量消光系数为:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{\int_0^\infty \sigma_e(\lambda, r) n(r) dr}{\rho \int_0^\infty \frac{4\pi}{3} r^3 n(r) dr} \quad (4)$$

则波段平均质量消光系数为:

$$\bar{\beta}_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_m(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

水雾的粒子大多服从对数正态分布或正态分布<sup>[5]</sup>,即服从:

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} r \ln b_0} \exp \left[ - \frac{1}{2} \left( \frac{\ln r - \ln r_0}{\ln b_0} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中  $\ln r_0$  是  $\ln r$  的均值;  $\ln b_0$  是  $\ln r$  的方差,或

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} b_0} \exp \left[ - \frac{1}{2} \left( \frac{r - r_0}{b_0} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中  $r_0$ 、 $b_0$  分别是  $r$  的均值和方差。

### 2 计算结果

利用上述公式;运用 Matlab 语言进行编程,分别计算了具有一定粒径分布的水雾在可见光波段(0.3~0.8  $\mu\text{m}$ )、大气红外窗口(3~5 和 8~14  $\mu\text{m}$ )波段平均质量消光系数以及在军用激光的两个常用波长(1.06 和 10.6  $\mu\text{m}$ )处的质量消光系数。计算结果如图 2~图

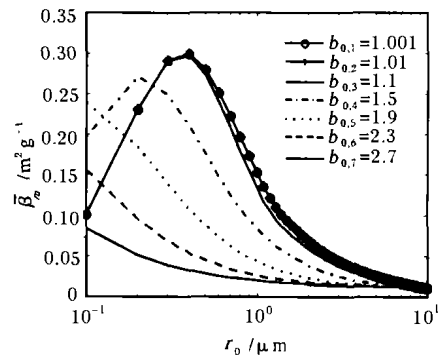


图 2 对数正态分布在 0.3~0.8  $\mu\text{m}$  波段的 MEC

Fig.2 MEC of lognormal distribution in 0.3~0.8  $\mu\text{m}$

11 所示。水的复折射率数据引自参考文献[6]。图 2、4、6、8、10 分别为对数正态分布的水雾在 0.3~0.8  $\mu\text{m}$ 、3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$ 、1.06  $\mu\text{m}$  激光和 10.6  $\mu\text{m}$  处的质量消光系数计算结果,图 3、5、7、9、11 分别为正态分布的水雾在对应波段(波长)处的计算结果。

### 3 分析与结论

(1) 从图 2~图 11 可以发现,粒径服从对数正态

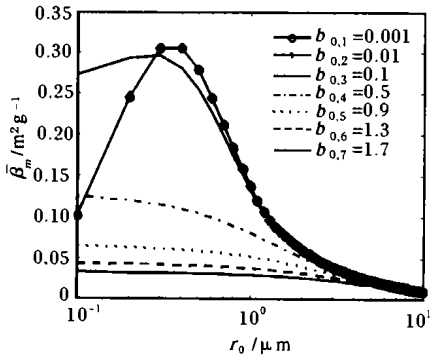


图 3 正态分布在 0.3~0.8 μm 波段 MEC

Fig.3 MEC of normal distribution in 0.3~0.8 μm

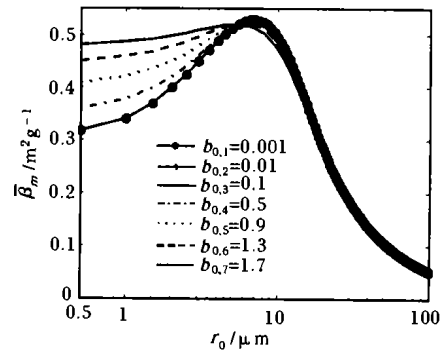


图 7 正态分布在 8~14 μm 波段 MEC

Fig.7 MEC of normal distribution in 8~14 μm

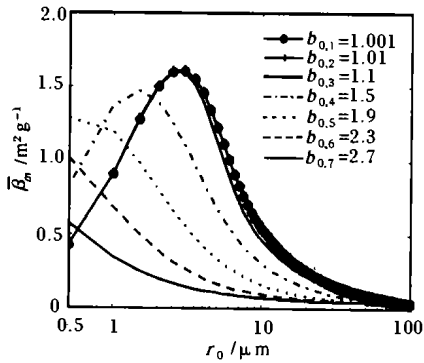


图 4 对数正态分布在 3~5 μm 波段 MEC

Fig.4 MEC of lognormal distribution in 3~5 μm

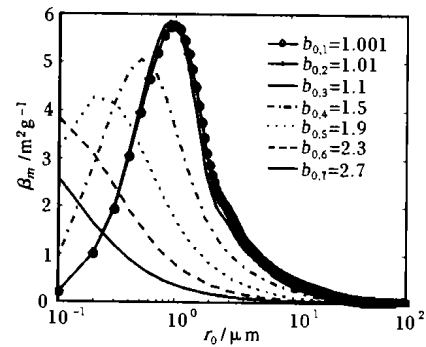


图 8 对数正态分布在 1.06 μm 波长 MEC

Fig.8 MEC of lognormal distribution at 1.06 μm

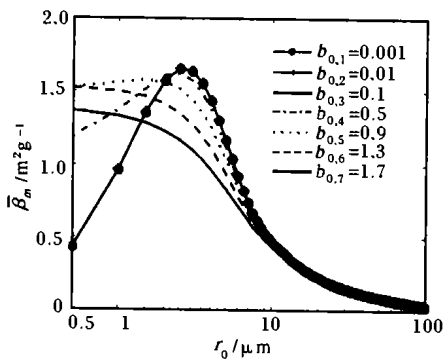


图 5 正态分布在 3~5 μm 波段 MEC

Fig.5 MEC of normal distribution in 3~5 μm

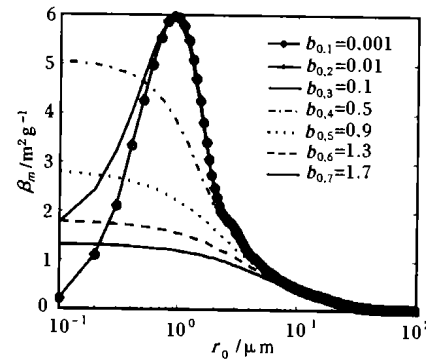


图 9 正态分布在 1.06 μm 波长 MEC

Fig.9 MEC of normal distribution at 1.06 μm

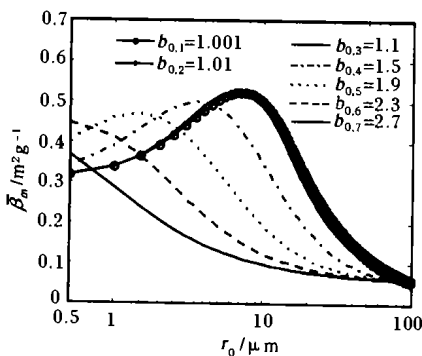


图 6 对数正态分布在 8~14 μm 波段 MEC

Fig.6 MEC of lognormal distribution in 8~14 μm

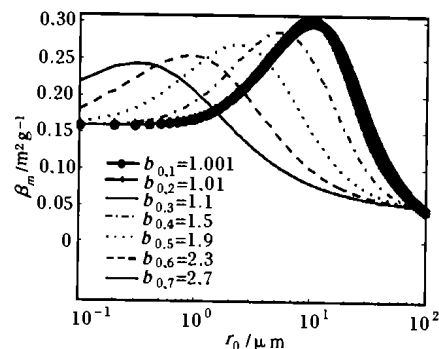
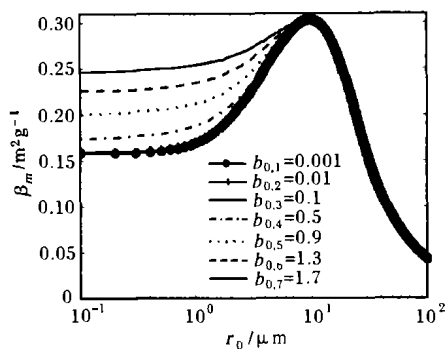


图 10 对数正态分布在 10.6 μm 波长的 MEC

Fig.10 MEC of lognormal distribution at 10.6 μm

图 11 正态分布在 10.6  $\mu\text{m}$  波长 MECFig.11 MEC of normal distribution at 10.6  $\mu\text{m}$ 

分布的水雾在 0.3~0.8  $\mu\text{m}$ 、3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$  波段以及 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长处的质量消光系数曲线呈现两翼不对称的钟形。当  $b_0$  一定时,  $\bar{\beta}_m$  (或  $\beta_m$ ) 先随着  $r_0$  单调上升, 达到极大值后, 再随  $r_0$  单调下降。当  $b_0$  变化时,  $\bar{\beta}_m$  (或  $\beta_m$ ) 的极大值随  $b_0$  的减小而增大。

(2) 从图 2~图 11 可发现, 粒径服从对数正态分布的水雾, 在  $b_0$  分别为 1.01 和 1.001 时的两条曲线基本重合; 粒径服从正态分布的水雾, 在  $b_0$  分别为 0.01 和 0.001 时的两条曲线也基本重合并且从公式(6)和公式(7)可看出, 两种粒径分布  $b_0$  的取值范围分别为  $(1, +\infty)$  和  $(0, +\infty)$ 。这说明: 粒径服从对数正态分布的水雾在  $b_0$  趋近于 1  $\mu\text{m}$  时, 粒径服从正态分布的水雾在  $b_0$  趋近于 0  $\mu\text{m}$  时, 其质量消光系数的峰值趋于最大水雾的粒径分布越集中, 消光性能越好。

(3) 在质量消光系数(无论是  $\bar{\beta}_m$  还是  $\beta_m$ )取得最大值的时候, 要求  $r_0$  的尺度在对应的波段中, 或与该波长非常接近。例如, 图 10 和图 11 说明,  $r_0$  稍大于 10.6  $\mu\text{m}$  的水雾(无论是对数正态分布还是正态分布), 其质量消光系数可以在 10.6  $\mu\text{m}$  处取得最大值。

(4) 在相同的波段内(或波长上), 粒径服从对数

正态分布的水雾的质量消光系数的最大值, 与粒径服从正态分布的水雾的质量消光系数非常接近。并且, 取得最大值的那对曲线的形状也非常相似。产生这一现象的原因是, 这两条曲线分布对应于同一种接近均匀分布的粒径分布, 且这两种均匀分布的均值相等。

(5) 在粒径服从某些特定参数的分布时, 水雾可以很好地遮蔽一定波段/波长上的光能量, 质量消光系数的最大值接近  $6 \text{ m}^2 / \text{g}$ 。尽管当其粒径分布参数为某些值时, 水雾的质量消光系数数值并不是很大, 但可以利用大量的水, 同样也能达到遮蔽目标的目的。

## 4 结束语

从以上分析可看出, 在特定的粒径分布下水雾可在不同程度上有效地遮蔽可见光、红外辐射和激光。通过计算, 得到了水雾的粒径分布参数与其遮蔽性能之间的关系, 在实际应用中, 可有针对性地产生具有一定粒径分布的粒子, 从而获得最佳的遮蔽性能。

## 参考文献:

- [1] Pollock D. Countermeasure System Vol 7. Accetta J S, Shumaker D L. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook[M]. Michigan: Environment Research Institute, 1993.
- [2] 时家明, 路远. 红外对抗原理[M]. 北京: 解放军出版社, 2002. 232-234.
- [3] 江长荫. 均匀圆球对平面波的散射[J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 65-88.
- [4] H C van de Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: Dover Publications, 1981. 114-164.
- [5] 卢正永. 气溶胶科学引论[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 12-14.
- [6] Hale M, Query M R. Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  wavelength region[J]. Applied Optics, 1973, 12(3): 556-562.

## 征 订 消 息

我部尚有部分会议资料(《2002年全国光电技术学术交流会论文集》(上、下册),《2004年全国光电技术学术交流会论文集》(上、下册)), 内容涉及光电总体技术; 光电探测; 制导及目标特性研究; 光电子器件技术; 光学系统设计及光学元件加工技术; 图像处理与目标识别技术; 光电系统测试与仿真技术; 光电系统应用。有需求者请与《红外与激光工程》编辑部联系。