我国海雾总体特点及其对中红外辐射能量衰减的分析

李 伟1,邵利民1,李树军2,周红进1

(1. 海军大连舰艇学院 航海系,辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院 海洋测绘系,辽宁 大连 116018)

摘 要:在对我国不同纬度海雾观测资料总结归纳的基础上,建立了我国海雾微物理结构的拟合分 布模型,归纳了我国海雾的总体特点。标定了最常见海雾的尺度参数,并根据红外辐射在海雾中的散 射与吸收特性,定量分析了不同海雾的消光系数,根据米氏散射定律定量计算了中红外波段下海面平 流雾的散射衰减度,并据此与实验结果进行了比对,吻合性较好。根据米氏理论,在较浓平流雾条件 下,雾滴为盐溶液时,中红外波段的消光系数均值为 2.90,海雾消光系数随着尺度参数的增大呈现出 单调减小的特点;而在纯水条件下,消光系数均值为 3.35,消光系数随着尺度参数的增大而单调增 加。

关键词:海雾; 尺度参数; 中红外辐射; 衰减 中图分类号: P714 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0804001

Features of China sea fog and its influence on intermediate infrared radiation energy attenuation

Li Wei¹, Shao Limin¹, Li Shujun², Zhou Hongjin¹

(1. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;
 2. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Based on the summary for the sea fogs of different areas of China sea, an overall distribution model about its micro-physics structure was put forward and its characteristics for China sea fog was summarized. The scale parameter was calibrated for most common sea fog, the extinction coefficient of different sea fogs were quantitatively analysed according to Mie theory, then, the attenuation coefficient was calculated in accordance with the formulars given by Mie and the final attenuation level was known. After a comparison, it witnessed a good agreement between theoretical calculation and experimental statistics. According to Mie theory, under the condition of salty fog drop, the average extinction coefficient decreased monotonously along with the increase of scale parameter; while under the condition of pure water, the average extinction coefficient of intermediate infrared radiation was 3.35, the extinction coefficient increased monotonously along with the increase of scale parameter. **Key words:** sea fog; scale parameter; intermediate infrared radiation; attenuation

收稿日期:2016-12-15; 修订日期:2017-01-18

基金项目:国家自然科学基金(41571441)

作者简介:李伟 (1980-),男,讲师,博士生,主要从事天文与气象方面的研究。Email:apuredrop@163.com 导师简介:邵利民(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事气象导航方面的研究。Email:shaolm@163.com

0 引 言

第8期

海雾是海上最多发的自然现象之一,它不但会 对航行安全造成不利影响,还会对电磁辐射能量产 生严重衰减,大大限制舰载光电武器性能的发挥。 近年来,随着红外接收技术的突飞猛进,主流红外 设备工作波段越来越集中于中远红外区域,这意味 着能量信号波长已完全与雾滴直径处于相同的数 量级,海雾雾滴将对在海面传播的红外信号造成严 重的散射衰减。因此,研究海雾的微物理结构及其 对红外辐射能量的衰减将有助于合理使用红外设 备,对提升舰载武器系统的总体性能具有重要意 义。

1 我国海雾的微物理结构

长期以来,海雾作为海洋上特有的一种天气现 象,由于受人们生活区域与研究条件等的限制,尤 其在微物理结构的实验分析方面,一直没有较深入 系统的研究。近年来,随着国家经济地位和海洋意 识的提高,海雾的研究逐渐兴盛,但仍然相对较 少。较具有代表性的有:杨中秋等^[1]从雾的成因入 手,着重分析了海洋性雾与大陆性雾在数密度、酸 碱性方面的不同;徐静琦等^[2]则把重点放在了含水 量的研究上,并与同纬度的国外地区作了对比;张 舒婷等^[3]利用较为先进的实验设备,对海雾能见 度、含水量、雾滴谱曲线进行了全方位描述。此外, 黄辉军等^[4]在茂名进行的实验也具有一定的参考 价值。

1.1 典型实验海雾雾滴谱

1985年4~5月间,杨中秋等在浙江舟山海域进行了为期44天的海雾观测实验,共采集有效海雾标本128个,主要实验结论如下:

(1)海洋平流雾平均数密度为 31 个/cm³,明显 低于大陆雾的 48 个/cm³;

(2) 海雾雾滴直径平均为 18 µm;

(3) 含水量平均为 0.10 g/m³。

图 1 为杨中秋等得到的海雾雾滴谱^[1],其中实线 为海雾的观测值拟合曲线,虚线为大陆雾的观测值 拟合曲线。海雾的拟合曲线解析式为:

 $n(r)=0.001 \ 3r^{3.5}\exp(-0.186r)$





图 T 能免疫为 500 m 的两募务商宿(实线部分), Fig.1 Droplet size distribution of 500 m visibility sea fog (solid part)

从图 1 中可以看出,海雾雾滴直径主要分布 在 20 μm 左右,而大陆雾主要集中在 10 μm 区域 前后,在所有粒径范围内大陆雾数密度均高于海 雾。

2010年3月间,张舒婷等在湛江进行了较长时间的观测,主要结论如下:

(1)海雾平均数密度为 57 个/cm³,平均含水量为 0.02 g/m³;

(2) 雾滴的平均直径为 4.7 μm,90%以上数目的 雾滴直径小于 5 μm,雾滴直径主要集中在 2~8 μm 区 间,峰值直径 2.8 μm,拟合优度 0.96。

张舒婷等根据观测结果拟合出了如图 2 所示的 Junge 分布曲线 (又称为幂指数分布),雾滴谱函数 为:n(r)=24.3r^{-1.33}。



图 2 能见度约为1 000 m 的海雾雾滴谱



1.2 能见度与含水量的关系

事实上,1.1节所述类型的海雾占实际海雾发生 频率的半数以上,综合已有其他的实测数据^[1-2],能 见度与含水量的关系可归纳如表1所示。

表 1 主要实验测得海雾的能见度(V) 与含水量(W)的关系

Tab.1 Relation between visibility (V) and water amount (W) of sea fog

Number	V/m	$W/g \cdot m^{-3}$	Area
1	30	0.16	Qingdao
2	100	0.1	Qingdao
3	300	0.12	Qingdao
4	400	0.1	Zhoushan
5	A little more than 1 000	0.02	Maoming ^[4]
6	1 000-2 000	0.013	Zhanjiang

据此进行拟合,可得图 3 所示曲线,解析式为 W=4.8×10⁻³ V²-1.65×10⁻⁴ V+0.15。





2 海雾微物理结构对红外辐射能量的衰减 分析

为形象描述雾滴粒子尺寸与红外辐射波长的关系,文中引入尺度参数的概念,定义尺度参数 $\chi = \frac{2\pi r}{\lambda}$,其中r为雾滴半径, λ 为红外波长。根据 Lorenz-Mie 理论,当 0.1< χ <50 时,入射辐射能量的 衰减以米氏散射为主^[5]。从第1节的海雾数据可以 获知,当今主流红外设备的工作波长(约 8~12 μ m) 已经与雾滴尺寸相差无几,绝大多数海雾的尺度参 数散布在 1.5~7 之间,就海上最常见的平流雾来说, 能见度大都在 500 m 左右,即对应图 1 所示类型海 雾,其尺度参数集中分布在 4.5~7 之间,这也是文中 衰减研究的主要区间。

2.1 米氏原理与消光系数

在散射能量的计算上,Lorenz-Mie 理论的核心

是根据气溶胶粒子的尺寸与折射率求出粒子群的消 光系数 Qext,然后介质整体衰减由密度谱积分求得。 介质的消光系数是一个与介质微物理结构、入射波 长、介质折射率三维相关的关键变量,具有复杂的递 推法则,是衰减求解的主要困难所在。

根据 Michael I.Mishchenko 等封装于互联网的 计算程序^[5],在不考虑吸收的情况下,在纯水的折射率 (1.3)下,红外辐射消光系数与雾滴尺度参数的关系如 图 4 所示。在大河的入海口或者雾滴凝结核没有盐粒 时,海雾雾滴可以近似看作纯水,其折射率 *m*=1.3。



图 4 纯水条件下消光系数与尺度参数的关系 Fig.4 Relation between Q_{ext} and χ under the condition of pure water

可以看出,研究区间内消光系数大致呈抛物线 变化,消光系数随着雾滴尺寸的减小而单调增加,综 合考虑区间曲线形态特点及拟合效率,对所选区间 (4.5~7)函数按照二次曲线进行拟合,得到平均消光 系数为 3.35。

考虑到海雾的复杂情况,根据参考文献[6]的研究,一般海雾雾滴有明显的盐结晶体,说明海雾雾滴 是具有一定浓度的盐溶液。相关资料显示,在没有其 他杂质的情况下,15%浓度盐水的折射率 m 近似等 于 1.4。当 m=1.4 时,消光系数与尺度参数之间具有 如图 5 所示的对应关系。



the condition of sea fog droplet

可以看出,在含盐核的海雾条件下,研究区间内 消光系数基本呈线性变化,消光系数随着雾滴尺寸 的减小而单调减小,在该区间(4.5~7)内,同样考虑到区 间曲线形态及拟合效率,对该区间内函数按照线性变 化规律进行取样拟合,得到平均消光系数为2.90。

2.2 仅考虑散射的红外能量衰减计算

根据米氏理论,在仅考虑散射的情况下,红外 辐射在特定波段上每千米的衰减程度可用下式计 算求得^[7-9](单位为 dB/km):

 $A(\lambda) = 4.314 \times 10^{-3} \int_{0}^{\infty} Q_{\text{ext}} r^2 n(r) dr^2$

可见,在同样的雾滴谱下,有盐雾滴对 8~13 μm 波段的散射衰减要明显小于纯水雾滴。实际上,对于 大多数的红外传感器来说,聚焦成像对电磁波的相 位波动并不敏感,因此,只要衰减后的辐射功率满足 最低门限要求即可正常工作。

3 实验验证与应用分析

为了验证上述分析,2016 年春季在大连进行了 多次海雾成像实验,效果良好。2016 年 3 月 3~4 日, 黄海北部发生大规模平流雾,持续影响大连市海陆 交接处两天之久。实验所用设备为美国"FLIR"公司的 "F-SERIES"红外热像仪,工作波段为 7.5~13.5 μm。 设备安放地点距离海边 200 m,以建筑物作为物标 选择了多次能见度为 500 m 的海雾进行了成像实 验,图 6 为所在方位稳定的红外成像。



图 6 500 m 能见度海雾条件下中红外波段红外成像 Fig.6 Infrared imaging under 500 m visibility sea fog for intermediate infrared band

大连市地处辽东半岛最南端,三面环海,常年受 海洋气团控制,属典型温带海洋性气候。在此次大雾 天气过程中,海岸雾与海洋表面平流雾同时生消,可 以近似看作是海雾环境。事实上,由于海雾成像实验 所需硬件较多,又需要距离标定设备,近似替代研究 也是常用手段。

经实地测量计算,图 6 中椭圆内物标距离设备 2 100 m,其在可接收波段的、不考虑海雾衰减因素的辐射总功率为 5 000 W,根据 2.1 节的分析,海 雾的平均消光系数取 2.9,采用图 1 所示雾滴谱和 2.2 节所提供公式并进行归一化修正进行计算可得 红外辐射能量的衰减程度为 5.1 dB/km。考虑到无 线电波能量在空中衰减逐次递减的规律,2.1 km 处 的衰减程度应该在 8.5~9.5 dB 之间,按照设备能够 显影的最低门限计算,图 6 所示的图像在临界显示 状态,其信号衰减程度为 9.2 dB。

4 结 论

从多次实验观测的结果来看,在中红外特定波 段,以文中总结建立的海雾微物理分布模型与消光 系数进行辐射能量衰减的计算结果与实测数据的吻 合性较好,能够进行常见海雾下红外传感器工作效 果的计算。这意味着根据已知的海雾预报信息可以 预知舰载红外设备的使用效果,并据此进行战术决 策,军舰在未来战争与非战争使用的各个领域将发 挥不可替代的重要作用。

参考文献:

- Yang Zhongqiu, Xu Shaozu, Geng Piao. The microphysical structure of the spring sea fog in Zhou – shan area [J]. Journal of Oceanology, 1989, 11(4): 431–438. (in Chinese) 杨中秋,许绍祖,耿骠. 舟山地区春季海雾的形成和微物 理结构[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 431–438.
- [2] Xu Jingqi, Zhang Zheng, Wei Hao. Analysis of Qingdao sea fog for it's drop size distribution and water content [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1994(2): 174– 178. (in Chinese)

徐静琦,张正,魏皓.青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析[J].海洋湖沼通报,1994(2):174-178.

- [3] Zhang Shuting, Niu Shengjie, Zhao Lijuan. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2013, 37(3): 552–562. (in Chinese) 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例 分析[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 552–562.
- [4] Huang Huijun, Huang Jian, Liu Chunxia, et al. The

microphysical structure of sea fog inmaomingarea[J]. *Journal of Oceanology(Chinese Edition)*, 2008, 29(2): 213-215. (in Chinese)

黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 茂名地区海雾的微物理特征 [J]. 海洋学报(中文版), 2008, 29(2): 213-215.

[5] Mishchenko M I, Travis L D. Scattering Absorption and Emission of Light by Small Particals [M]. Wang Jiang'an, Wu Ronghua, Ma Zhiguo, et al. translated. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese) Mishchenko M I, Travis L D. Travis. 微粒的光散射、吸收

和发射[M]. 王江安, 吴荣华, 马志国, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2013.

- [6] Lv Xuliang, Ping Yang, Li Xiaopeng, et al. The microphysical structure of fog and it's influence for infrared radiation attenuation [C]//The Ninth Avenue of Chinese Institution of Civil Engineers, 2004: 1226–1231. (in Chinese) 日绪良, 平洋, 李晓鹏, 等. 雾滴的微观特征对其红外辐射 衰减性能的影响 [C]//中国土木程学会防护工程分会第九 次学术年会, 2004: 1226–1231.
- [7] Zhao Zhenwei, Wu Zhensen. Method for determining fog

drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength [J]. Journal of Xidian University (Natural Science Edition), 2002, 29(2):253-255. (in Chinese) 赵振维, 吴振森.确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减 特性 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版), 2002, 29 (2): 253-255.

- [8] Guo Banghui, Huang Jianbo. Analysis of effections on the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system with the change of object distance and field
 [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2011, 34(1): 1238–1244. (in Chinese)
 郭帮辉,黄剑波. 目标距离和视场角变化对红外热像仪测温精度影响的理论分析 [J]. 长春理工大学学报, 2011, 34 (1): 1238–1244.
- [9] Li Bo, Zhao Huaici, Hua Haiyang. Radiation influence research between buildings in IR multispectral simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3222-3226. (in Chinese)

李波,赵怀慈,花海洋.红外多光谱仿真中的建筑物间辐射研究[J].红外与激光工程,2014,43(10):3222-3226.