

雾对 10.6 μm 红外辐射的衰减特性研究*

赵振维^{1,2)} 吴振森¹⁾ 沈广德²⁾ 林乐科²⁾

¹⁾西安电子科技大学, 陕西, 西安, 710071;

²⁾中国电波传播研究所, 山东, 青岛, 266071)

摘要 基于 gamma 雾滴尺寸分布模型及辐射雾和干流雾含水量与能见度的经验关系, 计算并回归得到了平流雾和辐射雾对 10.6 μm 红外辐射的衰减与含水量和能见度的关系, 其对浓辐射雾得到的雾衰减与含水量的线性关系与文献所给实验结果和半经验公式均有很好的一致性。最后对雾的红外衰减和可见光衰减进行了比较, 结果表明浓平流雾对 10.6 μm 红外辐射的雾衰减大于可见光的雾衰减。

关键词 红外, 雾衰减, 雾滴尺寸分布, 含水量, 能见度。

ATTENUATION DUE TO FOG FOR 10.6 μm WAVELENGTH*

ZHAO Zhen-Wei^{1,2)} WU Zhen-Sen¹⁾ SHEN Guang-De²⁾ LIN Le-Ke²⁾

¹⁾Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²⁾China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract Based on gamma fog drop size distribution model and empirical relation of water content and visibility for radiation fog and advection fog, the attenuation due to fog was calculated and analyzed for 10.6 μm infrared wavelength. The empirical relations between fog attenuation and water content as well as visibility were derived through regression analysis. The linear relation between fog attenuation and water content for dense radiation fog is in good agreement with available results of experiments and semi-empirical formula. Finally, the fog attenuation between 10.6 μm and visible wavelength was compared, and the results show that the attenuation at 10.6 μm is greater than that at visible wavelength for dense advection fog.

Key words infrared, fog attenuation, fog drop size distribution, water content, visibility.

引言

雾是影响毫米波和红外系统性能的重要因素, 由于红外光学系统的工作波长与雾滴的尺度相当, 对红外系统的影响较对毫米波系统的影响严重得多, 因此雾对红外和光波的衰减特性的理论和实验研究受到关注^[1,2]。

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种胶体, 由于雾的存在, 使空气中的能见度降低, 如果水平能见度降低到 1000m 以内, 这种飘浮在近地面的水汽凝结物即称为雾。根据雾的能见度和雾滴尺度不同, 又将雾分为: 重雾、浓雾、大雾和湿雾^[3]。观测表明, 雾滴半径通常在 1~60 μm 之间, 大多数雾滴半径在温度为正时为 7~

15 μm , 温度为负时为 2~5 μm ^[4]。雾的含水量随雾的强度不同而不同, 同一强度的雾其含水量主要决定于温度^[4]。由于海雾中的雾滴要比陆地上雾中的雾滴大, 相同含水量的海雾的能见度一般较陆上的雾的能见度为佳^[4]。根据形成雾的地域和形成雾的机理, 可把雾分成两大类: 平流雾 (Advection fog) 和辐射雾 (Radiation fog), 海雾通常为平流雾, 而内陆雾通常为辐射雾^[5]。

本文根据上述两类雾的含水量和能见度的经验关系及 gamma 雾滴谱分布模型, 对 10.6 μm 红外辐射的雾衰减特性进行了研究, 并得到了雾衰减与含水量和能见度的经验关系, 其中由辐射雾得到的雾衰减与含水量的线性关系与实验结果^[1]和半经验公式^[2]有很好的 consistency。

* 国防科技预研基金(批准号 3.3.4.1)资助项目
稿件收到日期 2001-07-14, 修改稿收到日期 2002-01-17

* The project supported by the Science and Technology Preliminary Research Foundation of National Defence of China (No. 3.3.4.1)
Received 2001-07-14, revised 2002-01-17

1 雾滴尺寸分布

雾滴尺寸分布通常可用两参数的 gamma 分布模型描述

$$n(r) = ar^2 \exp(-br) (m^{-4}), \quad (1)$$

式(1)中, n 为单位体积、单位半径间隔内的雾滴数, r 为雾滴半径(m), 雾通常用含水量和能见度来描述, 能见度与光学衰减系数 a_0 的关系为^[4]

$$V = \frac{3.912}{a_0} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

雾的含水量 W (g/m^3) 和能见度 V (km) 的经验关系可表示为^[5]

对于平流雾

$$W = (18.35V)^{-1.43} = 0.0156V^{-1.43} (g/m^3), \quad (3)$$

对于辐射雾

$$W = (42.0V)^{-1.54} = 0.00316V^{-1.54} (g/m^3), \quad (4)$$

由于绝大部分雾滴尺寸远大于可见光波长, 此时认为雾滴的归一化消光截面为 2 是可行的, 此时可导出雾滴尺寸分布参数与含水量和能见度的关系^[6]

$$a = \frac{9.781}{V^6 W^5} \cdot 10^{15}, \quad (5)$$

$$b = \frac{1.304}{VW} \cdot 10^4, \quad (6)$$

将式(5)、(6)和式(3)、(4)与式(1)相结合, 即可得到平流雾和辐射雾的雾滴尺寸分布与含水量(或能见度)的关系, 并可得到雾滴浓度 N 、模式半径 r_0 和平均半径 \bar{r}

$$N = \int_0^{\infty} n(r) dr = 2a/b^3 = \frac{8.222}{V^3 W^2} 10^3, (1/m^3) \quad (7)$$

$$r_0 = 2/b = 1.534 \cdot 10^{-4} VW (m), \quad (8)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} rn(r) dr = 3/b = 2.301 \cdot 10^{-4} VW (m). \quad (9)$$

为了检验在可见光频段取雾滴的归一化消光截面为 2 的合理性, 利用上述含水量和能见度的经验关系得到的雾滴尺寸分布, 取水的折射指数为 1.33, 在 $0.5\mu m$ 可见光波长, 利用 Mie 理论计算的雾衰减和取归一化消光截面为 2 计算的雾衰减的比较表明: 对于能见度小于 1km 平流雾, 两者计算的误差小于 6.1%; 对于能见度小于 1km 辐射雾, 两者计算的误差小于 19%, 当能见度低于 200m 时, 两者计算的误差小于 10%. 由此可见, 在可见光频段取雾滴的归一化消光截面为 2 得到雾滴尺寸分布参数是合理的.

2 雾衰减及可见光衰减的比较

2.1 雾衰减

由于雾滴的尺度与红外的波长相当, 此时需利用 Mie 散射理论计算雾滴的消光截面, 雾的衰减可表示为

$$A = 4.343 \cdot 10^3 \int_0^{\infty} Q_t(r) n(r) dr (dB/km), \quad (10)$$

式(10)中 Q_t 为雾滴的消光截面, 它与雾滴半径、复折射指数和工作波长有关. 在 $10.6\mu m$ 红外波长, 水的复折射指数为 $(1.178 - j0.071)^{[1]}$, 此时利用上述

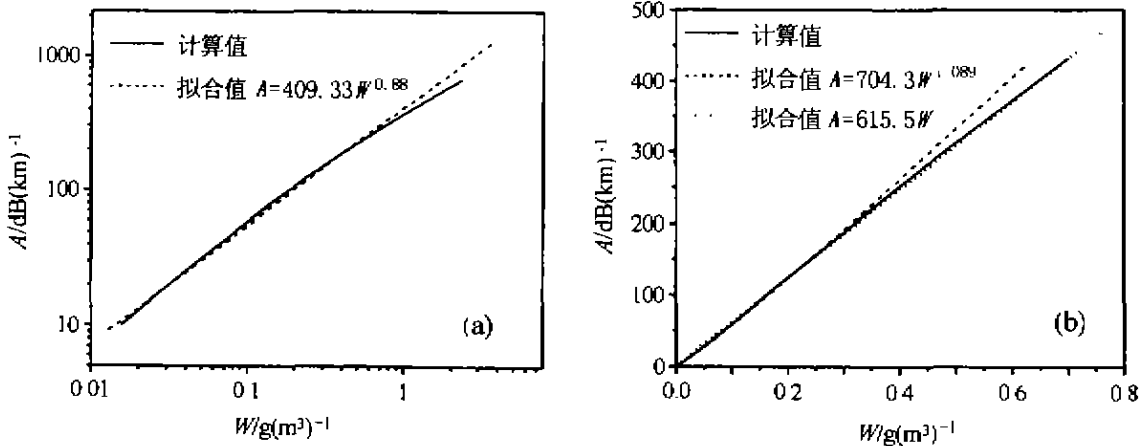


图 1 雾对 $10.6\mu m$ 波长的特征衰减与含水量的关系 (a) 平流雾 (b) 辐射雾

Fig. 1 The relationship between specific fog attenuation and water content at $10.6\mu m$ wavelength

(a) advection fog (b) radiation fog

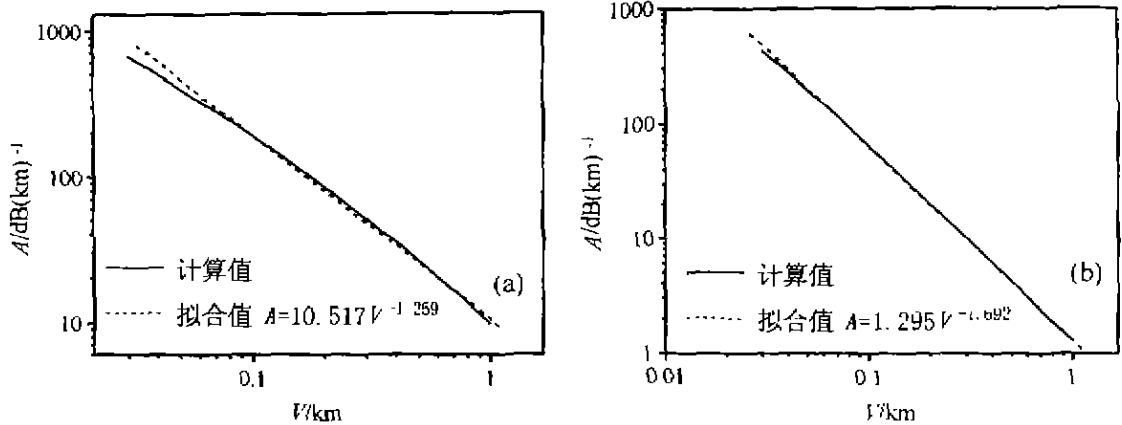


图2 雾对 10.6μm 波长的特征衰减与能见度的关系 (a) 平流雾 (b) 辐射雾
Fig. 2 The relationship between specific log attenuation and visibility at 10.6μm wavelength
(a) advection fog (b) radiation fog

雾滴尺寸分布模型,通过 Mie 散射理论计算不同尺寸雾滴的消光截面,即由式(10)得到平流雾和辐射雾衰减与含水量的关系及雾衰减与能见度的关系,它对能见度大于 30m 的计算结果分别如图 1 和图 2 所示,从图 1 和图 2 中可见,不论是辐射雾还是平流雾,雾衰减与含水量或能见度有较好的对数线性关系,对能见度为 30~1000m 的雾衰减计算结果回归的雾衰减与含水量(能见度)关系为

辐射雾: $A = 724.4 W^{1.099} = 1.295 V^{-1.692}$ (dB/km), (11)

平流雾: $A = 409.3 W^{0.88} = 10.517 V^{-1.258}$ (dB/km), (12)

对于辐射雾,在能见度大于 50m 时,式(11)的拟合误差小于 3.5%,在能见度为 30m 时,式(11)的拟合误差为 13.2%。对于平流雾,在能见度大于 60m 时,式(12)的拟合误差小于 10%,在能见度为 30m 时,式(12)的拟合误差为 31%。从图 1 中也可以看出,对于辐射雾,雾衰减和含水量之间可以用简单的线性关系拟合,其结果为

$$A = 615.5 W \text{ (dB/km)}, \quad (13)$$

对于含水量大于 0.1g/m³(能见度小于 100 米)的浓雾,其拟合误差小于 2.5%。在含水量大于 0.04g/m³(能见度小于 200m)的浓雾,其拟合误差小于 15%,因此式(13)可用于浓辐射雾的衰减计算。式(13)与其它经验关系也有很好的一致性,其中文献[1]利用 10.6μm 红外辐射的雾衰减试验数据回归得到的经验关系为

$$A = 610 W \text{ (dB/km)}, \quad (14)$$

而 Chylek 提出的雾衰减系数半经验公式为^[2]

$$\alpha = 1.5\pi C W / \lambda \text{ (1/m)}, \quad (15)$$

式(15)中 λ 为波长(μm), C 为利用 Mie 理计算的消光截面曲线的平均斜率确定的经验常数,在 10.6μm 时 C 为 0.33,此时得到的雾衰减的半经验公式为

$$A = 4.343 \cdot 10^3 \alpha = 637.1 W \text{ (dB/km)}. \quad (16)$$

显然,式(13)、(14)和式(16)间有很好的 consistency,这进一步说明利用本文所述方法确定雾滴尺寸分布参数,并由此研究雾衰减是可行的。此外,对于辐射雾,虽然雾衰减与含水量有简单的线性关系,但文献[1]由此得出在红外波段雾衰减与雾滴尺寸分布无关显然是不正确。取同一含水量,不同雾滴尺度均匀分布的雾计算的雾衰减有较大差异,即可说明这一点。

2.2 与可见光衰减的比较

由式(2)可得到可见光衰减与能见度的关系^[3]

$$A = \frac{16.99}{V} \text{ (dB/km)}. \quad (17)$$

图 3 给出了可见光和 10.6μm 红外雾衰减与能见度的关系,从图 3 中可以看出,当能见度相同时,平流雾衰减大于辐射雾衰减,可见光衰减大于 10.6μm 红外的辐射雾衰减和能见度较高的平流雾衰减;当平流雾为能见度小于 200 米的浓雾时,10.6μm 红外衰减反而大于可见光衰减;造成以上衰减特性的原因在于:对于相同能见度的雾,平流雾较辐射雾含有更多大尺度雾滴和更高的含水量,因此平流雾中雾滴的消光截面远大于辐射雾中的雾滴的消光截面,引起更大的雾衰减;当平流雾为能见度较低的浓雾时,雾滴的平均半径与 10.6μm 红外波长相当,此时雾滴对 10.6μm 红外波长的散射处于 Mie 散射的

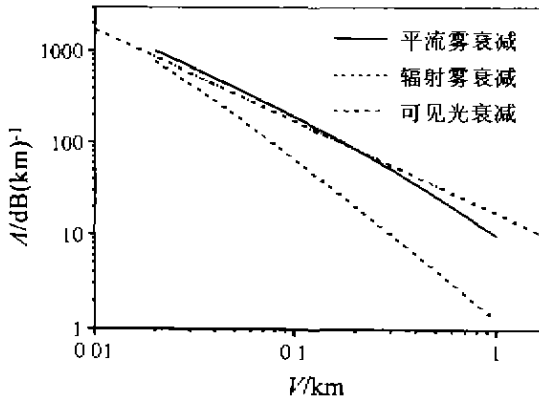


图3 10.6 μm 红外辐射和可见光雾衰减比较
Fig.3 Comparison of attenuations due to fog between
10.6 μm and visible wavelengths

振荡区域,其平均消光截面大于光学极限值($2\pi r^2$),因此可引起较可见光更大的衰减.

3 结语

本文利用雾的含水量和能见度导出的 gamma 雾滴谱分布模型及平流雾和辐射雾的含水量与能见度的经验关系,对 10.6 μm 红外的雾衰减特性进行了研究和分析,由此可得到以下结果:

(1) 雾衰减和含水量及能见度之间有很好的指数关系.

(2) 对于浓辐射雾,雾衰减和含水量之间有很

好的线性关系.所得到的线性关系与文献[1]所给实验结果和半经验公式^[2]有很好的—致性.

(3) 对于相同的能见度,平流雾衰减较辐射雾衰减大得多.

(4) 对于浓平流雾,10.6 μm 红外的雾衰减比可见光雾衰减更大.

REFERENCES

- [1] Vasseur H, Gibbins C J. Inference of log characteristics from attenuation measurements at millimeter and optical wavelengths. *Radio Science*, 1996, 31(5):1089—1097
- [2] SONG Zheng-Fang. *Foundation of Applied Optics*. Beijing: Weather Publishing House(宋正方.应用光学基础.北京:气象出版社),1990:80—120
- [3] WANG Bin-Hua. *General Meteorology*. Jinan: Shandong People's Publishing House(王彬华.普通气象学.济南:山东人民出版社),1961:301—302
- [4] ZOU Jin-Shang, LIU Chang-Sheng, LIU Wen-Bao. *Foundation of Atmosphere Physics*. Beijing: Weather Publishing House(邹进上,刘长盛,刘文保.大气物理基础.北京:气象出版社),1982:95—328
- [5] Ippolito L J. Propagation effects handbook for satellite system design. NASA Reference Publication, 1082(04), 1989: 6—71
- [6] ZHAO Zhen-Wei, WU Zhen-Sen. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds. *Conference Digest 25th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, Beijing: Sept 12—15, 2000, 469—470. (See also the full paper in: *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 21(10):1607—1615)