

文章编号 1004-924X(2018)06-1354-08

雾和气溶胶前向散射对消光的影响

魏昊明*, 赵 威, 戴星灿
(清华大学 物理系, 北京 100084)

摘要:光电工程中探测器接收的光强包括透射光和大气前向散射光。雾和大气气溶胶粒子的前向散射增强了透射光,从而导致测量的衰减比实际衰减小。本文采用 Mie 散射理论,根据气溶胶谱分布以及雾滴的谱分布模型及其与能见度的经验关系,计算了可见光到中波红外波长的前向散射修正因子。详细分析了激光在气溶胶和雾衰减中前向散射修正因子随粒子平均半径、能见度和波长等参数的变化关系,并拟合出前向散射修正因子随粒子平均半径和视场乘积的经验关系式,在 10°视场内平均残差小于 0.02,可为相关光电工程提供参考。

关键词:前向散射;消光;修正因子;气溶胶;雾

中图分类号:P427.12;P413 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182606.1354

Influence of fog and aerosol particles' forward-scattering on light extinction

WEI Hao-ming*, ZHAO Wei, DAI Xing-can

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: weihm15@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: In opto-electronic engineering, the light intensity received by the detector includes transmitted light and forward-scattered light. Fog and atmospheric aerosol particles' forward-scattered light increases the transmission, resulting in a measured extinction that is lower than the real amount. Using the Mie scattering theory, based on the atmospheric aerosol particles' size distribution function and an empirical relationship between water content and visibility in fog, the correction factor (CF) of forward-scattering for the extinction of wavelengths in the visible to middle-infrared region was calculated. The influence of parameters such as effective radius, visibility, and wavelength on the forward-scattering CF was discussed in detail. An empirical relationship between the CF and the product of the Field-of-View (FOV) and size parameter was fitted out based on the calculated results, and the mean residual is less than 0.02. The results may be applied in related engineering programs.

Key words: forward scattering; extinction; correction factor; aerosol; fog

收稿日期:2017-12-29;修订日期:2018-02-10.

基金项目:自然科学基金资助项目(No. 11474178)

1 引言

在遥感工程领域通常通过定量测量大气的衰减来获得大气成分的含量,通过测量透过大气的光强来推算大气透过率,如前向散射能见度仪^[1]测量能见度、太阳光度计测量整层大气透明度^[2]等。这些遥感工程通常选在大气分子吸收很弱的大气窗口波长区,在这些波长上,大气的衰减主要表现为大气中的悬浮粒子(气溶胶)的吸收和散射,并且多数情况下以散射为主。而粒子前向散射强度大,特别是雾、雨等大的粒子。探测器具有一定的视场,接收的光强不可避免地包括透射光和大气前向散射光。前向散射的作用减少了大气衰减,使测量的衰减比实际的衰减要小,减小的程度与粒子的性质、视场等因素有关。为了定量精确地实现大气参数的遥感以及光电工程性能的估算,必须确定前向散射在总衰减中所占的比例。

Deepak 等人^[3]研究了前向散射问题,提出一个前向散射修正系数的近似公式,并认为在粒子半径大于波长且视场小于 1.5° 时,该公式同精确公式相比误差小于 2%。魏合理等^[4]测量了雨在红外波段的衰减并用该公式修正了在小视场、大尺度的雨滴粒子条件下的前向散射,修正后的结果与实验测量结果相符。杜永成等^[5]研究了水雾中前向散射的修正问题,给出了分别包括散射角和粒子尺度参数较精确的修正公式,但他们没有考虑粒子尺度谱分布对修正因子的影响。柯熙政等^[6]用 Mie 散射理论计算了激光在不同强度雨中的衰减。

在晴天和雾天中,气溶胶粒子一般可以认为是球形的液态水滴组成的,其尺度分布较广,不同条件下的尺度谱分布不同,不同设备有不同的视场,有必要对具体情况进行分析,得到具体的修正系数,从而定量地确定这些粒子的衰减。实际使用过程中,粒子的尺度参数不易实际测量,而像能见度这样的常规气象参数很容易获得,因此把修正因子参数化成这些常规参数的函数,在光电工程中有重要的应用价值。

本文采用 Mie 散射理论,根据大气气溶胶和有雾天气雾滴的尺寸分布模型计算了可见光到中波红外波长的大气衰减前向散射修正因子,详细分析了在雾霾气溶胶衰减中前向散射修正因子随

粒子平均半径、能见度、波长等参数的变化关系,并把修正因子参数化成雾中能见度的函数,为有关工程提供参考。

2 理论基础

2.1 前向散射修正因子

大气窗口区气溶胶的衰减满足比尔-布给定律,波长为 λ 的光经过气溶胶衰减后的大气透过率为:

$$T(\lambda) = \exp\left[-\int_a^L \sigma(\lambda, r_{\text{eff}}) dx\right], \quad (1)$$

其中消光系数 $\sigma(\lambda, r_{\text{eff}})$ 是波长和粒子群的平均半径 r_{eff} 的函数,即:

$$\sigma(\lambda, r_{\text{eff}}) = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} Q_e(\lambda, r) \pi r^2 n(r) dr, \quad (2)$$

式中: $Q_e(\lambda, r)$ 为消光效率因子, $n(r)$ 为粒子尺度谱分布。

粒子平均半径为:

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^3 n(r) dr}{\int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} r^2 n(r) dr}. \quad (3)$$

式(3)中的消光系数 $\sigma(\lambda, r_{\text{eff}})$ 包括粒子吸收和各个方向散射的总和。由于气溶胶颗粒对入射辐射的前向散射,会形成朝向探测器方向的前向辐射,而探测器总有一定的视场 θ , 视场 θ 内的散射光不可避免地被探测器接收,到达探测器的这一部分辐射被记录为非散射光,使得测量的衰减小于粒子吸收和散射引起的衰减,测量的视透过率大于实际透过率,测量得到的视消光系数小于实际消光系数。在很多工程中需要区分这部分能量,比如前向散射能见度的测量^[1]、太阳辐射计整层大气光学厚度的测量^[2]等。包含前向散射在内的视消光效率因子 $Q_e'(r)$:

$$\begin{aligned} Q_e'(r) &= Q_e(r) - \frac{Q_e(r)}{4\pi} \int_0^{\Delta\Omega} P(\theta) d\Omega = \\ &= Q_e(r) \left[1 - \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{\Delta\Omega} P(\theta) d\Omega \right] = \\ &= Q_e(r) \left[1 - \frac{\omega}{2} \int_0^{\frac{\theta}{2}} P(\theta) \sin(\theta) d\theta \right], \quad (4) \end{aligned}$$

其中: r 为粒子半径, $\Delta\Omega$ 为仪器视场的立体角, θ 为仪器视场角, P 为散射相函数, θ 为散射角。

定义前向散射修正因子为视消光效率因子和消光效率因子的比值,即:

$$CF = \frac{Q_e'(r)}{Q_e(r)} = 1 - \frac{\omega}{2} \int_0^{\frac{\theta}{2}} P(\theta) \sin(\theta) d\theta, \quad (5)$$

其值介于 0~1。若 $CF=1$, 表明无前向散射光, 探测器接收到都是透射的光强。仅当视场 $\theta=0^\circ$, 才会出现 $CF=1$ 的情况。

有了该修正因子, 根据测量的视消光系数就可以方便地得到实际的消光系数:

$$\sigma(\lambda, r_{\text{eff}}) = \frac{\sigma'(\lambda, r_{\text{eff}})}{CF}. \quad (6)$$

2.2 气溶胶和雾的粒子谱分布

对于实际大气中的粒子, 都不是单一大小的粒径, 通常用粒子尺度谱分布 $n(r)$ 来表示粒子群的不同大小。上述散射效率因子、散射相函数等参数都是粒子尺度谱分布加权平均的结果。

晴天, 气溶胶一般可用荣格(Junge)谱分布来表示^[7], 即:

$$n(r) = ar^{-(v+1)}, \quad (7)$$

其中: r 为粒子半径, v 为荣格指数。

雾中粒子的滴谱分布常用广义伽马分布(Gamma)来表示^[7]:

$$n(r) = ar^\alpha \exp(-br^\beta). \quad (8)$$

当常数设为 $\alpha=2, \beta=1$ 时, 即为常用的 Khragian-Mazin 云雾尺寸分布模型。柯熙政等^[8]考虑雾中含水量和能见度的经验关系, 建立了雾中粒子半径(以微米为单位)的雾滴尺度谱分布公式。其中, 平流雾为:

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V^{1.15} r^2 \times \exp(-0.8359 V^{0.43} r). \quad (9)$$

辐射雾:

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V^{1.7} r^2 \times \exp(-4.122 V^{0.54} r). \quad (10)$$

雾中含水量为:

$$W = \int_0^\infty \frac{4\pi}{3} r^3 n(r) dr. \quad (11)$$

2.3 Lorenz-Mie 理论简介

一束平面线极化光照射到粒子上, 球形粒子对光的散射吸收可以用 Lorenz-Mie 散射理论来处理(简称 Mie 散射理论)。Mie 散射理论给出了球形粒子在远场条件下的散射场振幅 a_n, b_n 以及粒子内部的电磁场振幅 c_n, d_n 的计算表达式。 a_n, b_n 称为 Mie 散射系数, 具体形式为^[9]:

$$a_n = \frac{\psi'_n(y)\psi_n(x) - m\psi_n(y)\psi'_n(x)}{\psi'_n(y)\xi_n(x) - m\psi_n(y)\xi'_n(x)}, \quad (12)$$

$$b_n = \frac{m\psi'_n(y)\psi_n(x) - \psi_n(y)\psi'_n(x)}{m\psi'_n(y)\xi_n(x) - \psi_n(y)\xi'_n(x)}, \quad (13)$$

式中 x 为尺度参数, $x=2\pi r/\lambda$, 且 $y=mx$, r 为球形粒子的半径, m 为微粒外部的相对复折射率, $\psi_n(x)$ 和 $\xi_n(x)$ 分别为 Bessel 函数和 Hankel 函数。

散射效率因子为:

$$Q_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(|a_n|^2 + |b_n|^2). \quad (14)$$

消光效率因子为:

$$Q_e = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(|a_n| + |b_n|). \quad (15)$$

归一化散射相函数为:

$$P(\theta) = \frac{1}{\pi x^2 Q_s} \frac{(S_1^* + S_2^* S_2)}{2}, \quad (16)$$

其中:

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)\}, \quad (17)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} \{b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)\}, \quad (18)$$

其中两个角度函数 p_n 和 t_n 分别为一阶连带勒让德(Legendre)多项式及其对角度的微分。

从中可以看出, 只要给定粒子的复折射率 m 和粒子的尺度参数 x , 就可以精确地计算出粒子的衰减和散射特性。其中, 复折射率 m 和尺度参数 x 都和波长 λ 有关。同时, 用 Mie 散射理论也可以计算出粒子散射能量的空间分布(散射相函数 $P(\theta)$)。张学海等^[10]分别用 Mie 理论和几何光学方法计算了球形粒子的前向散射, 发现在粒子尺度参数大于 60 时, 几何光学方法计算的球形粒子的散射特性与 Mie 散射非常接近。

本文首先从常用的激光波长 0.532 μm 和 1.06 μm 开始, 研究光在气溶胶和有雾大气中传输时前向散射修正系数随粒子尺度、视场、能见度等参数的变化。计算时, 假定大气气溶胶和雾中的粒子都是由水滴组成的球形粒子。水在可见光到红外波长的复折射率取自文献^[11], 在 0.532 μm 和 1.06 μm 波长处分别是 (1.34, 1.80 $\times 10^{-9}$) 和 (1.32, 1.28 $\times 10^{-6}$)。

图1是用Mie散射计算程序^[12]计算的1.06 μm 处3种平均半径水滴粒子的散射相函数。计算时假定为伽马分布,粒子平均半径分别为0.1, 1和10 μm 。由图可以看出,前向散射强度与粒子尺度密切相关,粒子尺度越大,前向散射越强。平均半径为10 μm 的粒子的前向散射显著地高于其它两种情况,前向很小的散射角内,散射的能量随粒子尺度的增大而迅速增大。另外,从式(5)可以看出,修正因子是前向一定角度内的积分,因此,与仪器视场也密切相关。所以,散射粒子的平均尺度、接收仪器视场等因素决定了前向散射修正因子的大小。

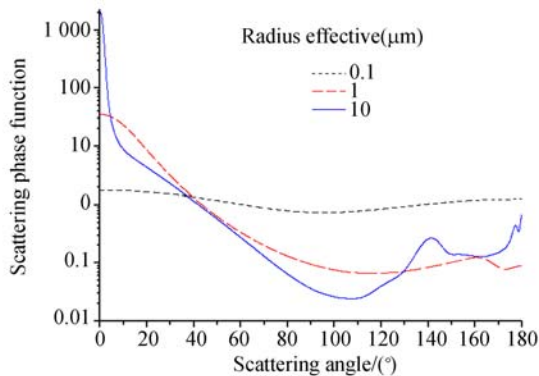


图1 三种平均半径水滴的散射相函数

Fig. 1 Scattering phase functions for three effective radii

3 前向散射修正系数计算

3.1 前向修正因子随粒子有效尺度参数的变化

假定晴天气溶胶粒子服从如式(7)的荣格分布,图2计算了0.53 μm 波长处前向散射修正因子随荣格指数的变化。计算时假定仪器接收视场角 θ 为 1° 、荣格指数从0.2变化到4,对应粒子的平均半径从6 μm 到0.19 μm 。从图2可以看出,当荣格指数较小(粒子平均半径较大)时,修正因子显著偏离1;随着荣格指数的增大,粒子平均半径减小,修正因子也逐渐增大接近于1;当荣格指数大于2.5时,修正因子大于99.5%,即前向散射的贡献不足0.5%。目前,多数太阳辐射计的视场设计为 1° ,因此,对于通常情况下小粒子(荣格指数介于2~4之间),前向散射在总透射光中的贡献并不是很重要。但是,李建玉等^[2]在我国几个地方的观测表明,气溶胶的Anstrom指数在

0.1~1.8之间,即荣格指数介于2.1~3.8之间。在有风沙的情况下,若荣格指数在2以下,此时前向散射在消光中的贡献将超过2%,因此必须考虑前向散射修正。

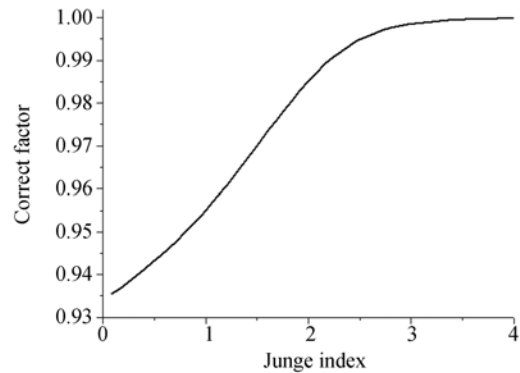


图2 气溶胶粒子前向散射修正因子随荣格指数的变化
Fig. 2 Dependence of aerosol particles' forward scattering correct factor on Junge index

由于雾中粒子尺度显著地大于晴天气溶胶的粒子尺度,因此前向散射显得更为重要。本课题组计算了辐射雾和平流雾中前向散射修正因子随能见度的变化。雾中粒子尺度谱及它与能见度的关系见式(9)和式(10)^[7]。当能见度从20 m变化到10 km,辐射雾对应粒子的平均半径从10变化到0.25,平流雾对应粒子的平均半径从32变化到1.74。从图3中可以看出,雾中,特别是浓雾时,前向散射相当严重。对于辐射雾,当能见度小于100 m时,前向散射在衰减中的贡献超过5%;而对于粒子平均半径较大的平流雾,能见度即使达到km,前向散射在衰减中的贡献仍大于5%;当能见度达到20 m时,前向散射对衰减的贡献超过37%。

为了定量地研究前向散射对衰减的贡献随粒子尺度的变化,这里把上述3种粒子尺度谱分布模式计算的前向散射修正因子随平均尺度参数 x 的变化绘制于图4中。从图中可以看出,修正因子随粒子尺度参数的增大呈现单调减小的趋势。粒子尺度越大,修正因子越小,偏离1的值越大。修正因子与粒子尺度谱分布关系不大,晴天气溶胶、辐射雾、平流雾3种粒子尺度谱分布得到的修正因子随粒子平均半径的变化几乎一致。因此,实际应用中,只需考虑粒子平均尺度参数,而不需要考虑具体的粒子谱分布形式,这给应用带来了极大的方便。

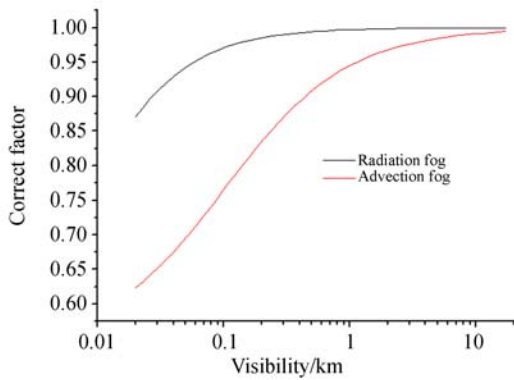


图 3 辐射雾和平流雾中前向散射修正因子随能见度的变化

Fig. 3 Dependence of forward scattering correct factor on visibility in radiative fog and advection fog

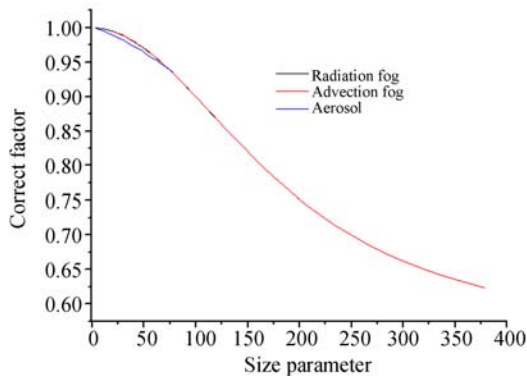


图 4 气溶胶和雾中前向散射修正因子随粒子平均尺度参数的变化

Fig. 4 Dependence of forward scattering correct factor on effective size parameter in aerosol particles and fog

前向散射修正因子随仪器接收视场的变化与粒子平均尺度变化相似,本文不再赘述。

3.2 前向修正因子随波长的变化

用水在可见光到近红外波段的复折射率^[10],分别计算了固定粒子平均半径为 $2.15 \mu\text{m}$ 和固定粒子尺度参数 x 为 25.3 时前向散射修正系数随波长的变化,波长在 $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$,结果见图 5。

由于粒子尺度参数 $x = \frac{2\pi r_{\text{eff}}}{\lambda}$,固定粒子平均半径时,随着波长的增大,粒子尺度参数减小,前向散射减弱,修正因子增大并接近于 1,如图 5 中实线所示;当固定粒子尺度参数 x 时,修正因子基本不随波长变化。同时,由于吸收的影响,单次散射

反照率随波长的变化,表现为修正因子随波长有小幅度的变化,如波长 $2.85 \mu\text{m}$ 附近,由于水的吸收,在该波长处单次散射反照率较小,修正因子出现一定的变化。

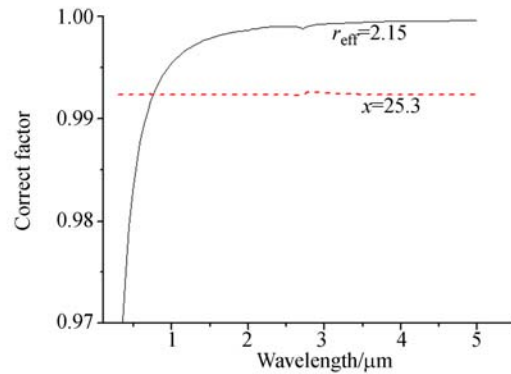


图 5 粒子平均半径和尺度参数分别固定时修正因子随波长的变化

Fig. 5 Dependence of correct factor on wavelength with fixed effective radius and effective size parameter

4 前向散射修正因子的参数化

4.1 参数化数值拟合

从上述计算结果看,影响前向散射修正因子的主要因素包括仪器视场、粒子平均尺度参数等,与波长关系不大。为了便于实际应用,把前向散射修正因子参数化为粒子平均尺度参数 x ($x = \frac{2\pi r_{\text{eff}}}{\lambda}$) 和仪器视场的乘积的函数。本文计算了视场角 Θ 在 $0 \sim 10^\circ$, 粒子尺度参数为 $2.4 \sim 300$ 的前向散射修正因子,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,修正因子近似是 $x\Theta$ 的单值光滑变化函数。把视场分成 $0 \sim 1^\circ$ 和 $1 \sim 10^\circ$ 两种情况分别拟合。

当视场 $\theta \leq 1^\circ$ 时,用 5 阶多项式拟合:

$$CF(x, \Theta) = \sum_{i=0}^5 C_i (x\Theta)^i, \Theta \leq 1^\circ. \quad (19)$$

拟合系数 C_i ($i=0 \sim 5$) 见表 1。相关系数为 0.998, 平均残差为 0.003 2。

当视场角大于 1° 不大于 10° 时,用指数衰减的形式拟合:

$$CF(x, \Theta) = 0.513 + 0.525 \exp\left(-\frac{x\Theta}{1.43}\right), 2^\circ < \Theta \leq 10^\circ, \quad (20)$$

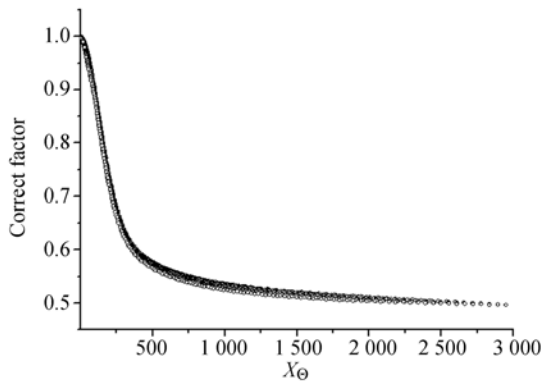


图 6 前向散射修正因子随粒子尺度参数和视场角变化的点散图

Fig. 6 Dependence of correct factor on product of size parameter(x) and field of view(Θ)

拟合相关系数为 0.989, 平均残差为 0.02。从拟合的相关系数和残差来看, 式(19)和式(20)可以

很好地表征前向修正因子随视场和粒子尺度的变化。

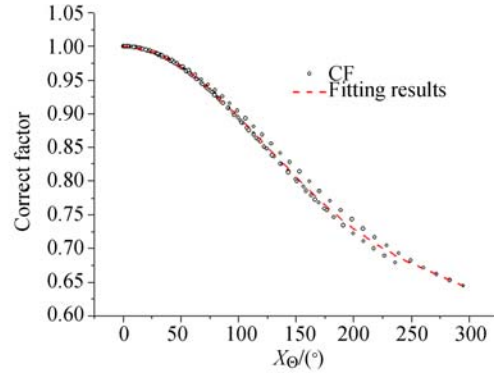


图 7 前向散射修正因子的经验拟合结果

Fig. 7 Empirical fitting results of forward scattering correct factor with product of $x\Theta$

表 1 视场不大于 1°时的拟合系数

Tab. 1 Fitting coefficients with $\Theta \leq 1^\circ$

i	0	1	2	3	4	5
C_i	1.00	1.98×10^{-5}	-1.41×10^{-5}	2.66×10^{-8}	9.82×10^{-11}	-2.51×10^{-13}

对于雾,由式(10)和式(11)容易推得有效尺度与能见度的经验关系:

$$\text{辐射雾: } r_{\text{eff}}(\text{radiation}) = \frac{1.22}{V^{0.54}}. \quad (21)$$

$$\text{平流雾: } r_{\text{eff}}(\text{advection}) = \frac{5.98}{V^{0.43}}. \quad (22)$$

把式(21)和式(22)分别带入式(19)和式(20),得到辐射雾中前向修正因子与能见度、视场和波长的关系式:

$$CF(V, \lambda, \Theta) = \sum_{i=0}^5 C_i \left(\frac{7.66\Theta}{\lambda V^{0.54}} \right)^i, \Theta \leq 1^\circ. \quad (23)$$

$$CF = 0.513 + 0.525 \exp\left(\frac{-6.40\Theta}{\lambda V^{0.54}}\right), 1 < \Theta \leq 10^\circ. \quad (24)$$

平流雾中前向修正因子与能见度、视场和波长的关系式:

$$CF(V, \lambda, \Theta) = \sum_{i=0}^5 C_i \left(\frac{37.6\Theta}{\lambda V^{0.43}} \right)^i, \Theta \leq 1^\circ. \quad (25)$$

$$CF = 0.513 + 0.525 \exp\left(\frac{-45.1\Theta}{\lambda V^{0.43}}\right), 1 < \Theta \leq 10^\circ. \quad (26)$$

4.2 计算结果检验和讨论

Deepak 等人^[3]提出一个前向散射修正系数的近似公式:

$$CF_{\text{Deepak}} = \frac{1}{2}(1 + J_0(x\theta)^2 + J_1(x\theta)^2), \quad (27)$$

式中 J_0, J_1 分别为 0 阶和 1 阶贝塞尔函数。在视场小于 1.5° 时,同精确公式相比误差小于 2%,但是该结果只考虑单粒径而没有考虑粒子尺度谱分布的影响。为了验证本文结果的准确性,使用该公式,考虑雾中粒子尺度谱分布,即式(9)和式(10),得到粒子平均的前向修正散射系数为:

$$CF_{\text{Deepak_avg}} = \frac{\int CF_{\text{Deepak}} n(r) dr}{\int n(r) dr}. \quad (28)$$

假定视场为 1.0° , 波长为 $0.53 \mu\text{m}$, 用本文的得到经验关系式(23)和(25),分别计算了辐射雾和平流雾的前向散射修正系数(CF_This work),取 5 种能见度,计算结果与根据式(27)Deepak 的结果(CF_Deepak_avg)比较见表 2。

从表 2 可以看出:相对 Deepak 的结果,本文计算的前向散射修正系数的相对偏差都小于 2%,最大值为平流雾中能见度为 1 km 时的偏差

1.9%。其原因在于 Deepak 等是用近似公式,而本文采用精确的 Mie 理论进行计算,所以偏差在

视场 1°以内应该小于 2%;而视场 1°以外的计算精度还有待于实际验证。

表 2 本文工作与 Deepak 的结果对比

Tab. 2 Comparisons between this work and Deepak's

Visibility /km	Advection fog			Radiation fog		
	CF	CF	Difference	CF	CF	Difference
	This work	Deepak_avg	/%	This work	Deepak_avg	/%
0.2	0.794	0.806	-1.47	0.977	0.983	-0.606
1	0.918	0.936	-1.90	0.996	0.997	-0.119
2	0.950	0.963	-1.28	0.998	0.999	-0.058
5	0.976	0.982	-0.666	0.999	0.999	-0.022
10	0.986	0.990	-0.386	1.000	1.000	-0.009

5 结 论

本文采用 Mie 散射理论,根据气溶胶谱分布以及雾滴谱分布的经验模型,计算了前向散射修正因子随粒子平均尺度参数、视场、能见度和波长等参数的变化关系。结果表明,前向散射修正因

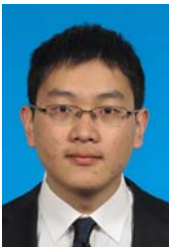
子主要随粒子平均尺度参数和视场而变化,而与粒子谱的分布形式关系不大。将前向散射修正因子拟合成随视场和尺度参数乘积的函数,并分别给出了辐射雾和平流雾的前向散射修正因子随能见度、波长和视场的经验关系式,修正因子的拟合误差在 10°视场内,平均残差小于 0.02,可为相关工程提供参考。

参考文献:

- [1] 李浩,陈晓颖,单陈华,等.雾和气溶胶的光学特性对前向散射和总散射能见度仪性能的影响[J].红外与激光工程,2013,42(6):1568-1574.
LI H, CHEN X Y, SHAN CH H, et al.. Effect of atmospheric fog and aerosol optical properties on the performance of FSV and TSV[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6):1568-1574. (in Chinese)
- [2] 李建玉,魏合理,徐青山,等.中国部分典型地区气溶胶光学特性观测[J].光学精密工程,2012,20(6):1166-1174.
LI J Y, WEI H L, XU Q SH, et al.. Atmospheric aerosol optical characteristics measured at several typical zones in China[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1166-1174. (in Chinese)
- [3] ADARSH D, VAUGHN O. Extinction-sedimentation inversion technique for measuring size distribution of artificial fogs[J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(3): 374-378.
- [4] 魏合理,刘庆红,胡明,等.红外辐射在雨中的衰减[J].红外与毫米波学报,1997,16(6):418-424.
WEI H L, LIU Q H, HU M, et al.. Extinction of infrared radiation by rain[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 1997, 16(6): 418-424. (in Chinese)
- [5] 杜永成,杨立,张修峰,等.红外辐射在水雾中衰减计算的修正方法研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(10):2632-2635.
DU Y CH, YANG L, ZHANG X F, et al.. Study on the correctional method for the attenuation calculation of infrared radiation in the water fogs[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10):2632-2635. (in Chinese)
- [6] 柯熙政,杨利红,马冬冬.激光信号在雨中的传输衰减[J].红外与激光工程,2008,37(6):1021-1024.
KE X ZH, YANG L H, MA D D. Transmitted attenuation of laser signal in rain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6):1021-1024. (in Chinese)
- [7] 刘长盛,刘文保.大气辐射学[M].南京:南京大学出版社,1990.
LIU CH SH, LIU W B. *Atmospheric Radiation* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1990. (in Chinese)
- [8] 柯熙政,马冬冬,刘佳妮.激光在雾中传输的衰减研究[J].光散射学报,2009,21(2):104-109.
KE X ZH, MA D D, LIU J N. Study attenuation of

- laser transmission in fog[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2009,21(2):104-109. (in Chinese)
- [9] BOHREN C F, HUFFMAN D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*[M]. New York: John Wiley,1983.
- [10] 张学海,魏合理. 基于用几何光学和米散射法的球形粒子前向散射特性计算研究[J]. *红外与激光工程*. 2015,44(5):1485-1490.
ZHANG X H, WEI H L. Forward scattering properties of spherical particles based on the geometrical optics method and Mie scattering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (5): 1485-1490. (in Chinese)
- [11] SEGELSTEIN D. *The Complex Refractive Index of Water*[D]. Kansas City: University of Missouri, 1981.
- [12] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms[J]. *Appl. Opt.*, 1980,19(9):1505-1509.

作者简介:



魏昊明(1993—),男,安徽合肥人,2015年于清华大学获得学士学位,主要从事激光光谱与物理学方面的研究。E-mail: weihm15@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



戴星灿(1975—),男,研究员,博士生导师,1997年于清华大学获得学士学位,2006年于美国伯克利大学获得博士学位,主要从事超快傅里叶光谱、半导体纳米结构光谱的研究。E-mail: XingcanDai@tsinghua. edu. cn